

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

Departamento de Ingeniería Mecánica

Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras



TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE
UNIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA
CON USO DE
ELEMENTOS CLAVIJA**

Por:

Manuel Domínguez Lorenzo

Ingeniero Industrial

Director de Tesis:

José González Fueyo

Zamora, 2015

Autor

Prof. Manuel Domínguez Lorenzo

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECCIÓN (ADDRESS):

E.P.S. de Zamora, Avda. Requejo N°33

49022, Zamora

España (Spain)

TFNO (PHONE):0034 980 545 000 EXT.: 3641

FAX: 0034 980 545 002

EMAIL: mdominguez1@usal.es

Director

Prof. Dr. Jose González Fueyo

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECCIÓN (ADDRESS):

E.P.S. de Zamora, Avda. Requejo N°33

Zamora 49022

España (Spain)

TFNO (PHONE):0034 980 545 000 EXT.: 3641

FAX: 0034 980 545 002

EMAIL: fueyo@usal.es

Universidad de Salamanca

Descripción breve

**ESTUDIO DE UNIONES EN
ESTRUCTURAS DE MADERA CON USO DE
ELEMENTOS CLAVIJA**

Por Manuel Domínguez Lorenzo

Departamento de Ingeniería Mecánica

Con este trabajo se pretenden desarrollar y mejorar los procedimientos de cálculo y construcción de uniones en estructuras de madera mediante el empleo de elementos clavija. Las técnicas de dimensionado más empleadas actualmente están basadas en las ecuaciones de Johansen, que no tratan efectos como la presencia del encolado, fricción, roscado en la clavija, fijación de tuercas-arandelas en extremos o sistemas expansivos. El desarrollo analiza el comportamiento de clavija expuesta a cargas y sus elementos complementarios. Se proponen modelos de cálculo que amplían las ecuaciones propuestas tanto a nivel europeo en el Eurocódigo 5, como en su trasposición a nivel nacional en el CTE a través del DB SE-M.

Originalidad

La originalidad del estudio supone trasladar al campo estructural las técnicas de unión que tradicionalmente se han empleado en otras disciplinas, como por ejemplo roscado, presencia de tuerca y arandela en extremo de clavija, sistemas expansivos, utilizados en el encolado en muebles, o la unión por taladros químicos en otro tipo de materiales distintos a la madera. Estas soluciones se pretenden aplicar a las uniones en estructuras de madera, lo que implica desarrollar un modelo que permita dar respuesta a las necesidades del mercado de metodologías que den mayor resistencia, ligereza y flexibilidad frente a las uniones más tradicionales.

Palabras Clave: Madera, uniones, clavija, Johansen, pernos encolados, ensayos, elementos finitos.

University of Salamanca

Abstract

**STUDY OF UNIONS IN
TIMBER STRUCTURES USING
DOWEL ELEMENTS**

By Manuel Domínguez Lorenzo

Department of Mechanical Engineering

This work tries to develop and improve the methods of calculation and construction of joints in wood structures by using pin elements. The sizing techniques most used are currently based on the equations of Johansen, who do not treat effects as the presence of gluing, friction, threaded pin, fixing nuts-washers in extreme or expansive systems. The development analyzes the behavior of dowel exposed to loads and complementary elements. Calculation models that expand the equations proposed at european level in Eurocode 5, and its transposition at national level through the CTE DB SE-M are proposed.

Originality

The originality of the study is to transfer the structural field, joining techniques that have traditionally used to other disciplines, such as threading, presence of nuts - to washers, expansive systems, which is the bonding in furniture, or chemical bonding drills other materials other than wood. These solutions are to be applied to the joints in wood structures develop a technique to answer the market needs methodologies to give greater strength, lightness and flexibility towards more traditional unions.

Keywords: Timber, joints, dowel, Johansen, glued bolts, testing, finite elements.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea dar las gracias muy especialmente al profesor Dr. D. José Luis González Fueyo, como director y tutor de esta tesis, por las referencias, trabajo y consejos aportados durante la elaboración de la misma, así como a los compañeros del Departamento de Ingeniería Mecánica, en particular al profesor Dr. D. José Antonio Cabezas Flores por su ayuda y respaldo.

A D. Manuel Teso y Dña. Elena Domínguez, por su generosa entrega en la revisión y corrección del presente documento. A la profesora Dra. Dña. M^a Dolores Otero, de la Universidad de La Coruña, y al Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) por la aportación de inestimables conocimientos sobre la materia.

También desea agradecer la contribución de REARASA, Restauración de Edificios, Artesonados y Retablos Alonso S.A., e INZAMAC Asistencias Técnicas S.L. y particularmente a su personal, por la colaboración experimental.

A mi familia, a ella se dedica este trabajo.

1 Introducción y objetivos

1.1 Antecedentes

1.1.1 La madera estructural

La madera se ha utilizado de manera extensiva desde tiempos muy antiguos en la construcción de refugios y como solución a las necesidades del hombre para protegerse. Como elemento estructural ha contado con gran difusión y uso, especialmente en aquellos países donde se puede disponer de ella. Los cientos de edificaciones históricas y los numerosos cascos urbanos en los que se ha utilizado la madera como material estructural principal dan fe de la importancia estructural que la madera ha tenido en el pasado.

Las estructuras de madera presentan ventajas estéticas, de resistencia y medioambientales, frente a otros materiales tan utilizados como el acero, con serios problemas de resistencia al fuego; y el hormigón, de gran peso propio. Pero tienen inconvenientes como la ortotropía, fluencia, hinchazón y merma, atenuados en parte gracias a la aparición de nuevos materiales basados en la misma, como los compuestos laminados y microlaminados. Otro inconveniente añadido al empleo de la madera ha sido la ausencia de una normativa oficial (Labèrnia et al., 2010), resuelto con la entrada de documentos normativos de respaldo legal como el Eurocódigo 5 (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). En España, también ha habido una carencia histórica para el cálculo de estructuras de madera hasta la aparición del Código Técnico de la Edificación en 2006 (DB SE M, 2009). La implantación de una normativa específica ha sido positiva para difundir las bases de referencia asociadas al diseño, y con ello potenciar el consumo, pero destaca por su conservadurismo (Nuere, 2007). En cualquier caso, la aparición de estas normativas permite vislumbrar un cambio en la trayectoria en los últimos años.

Europa es una consumidora importante de madera a nivel mundial: se puede decir que el Viejo Continente consume del orden de 55,5 millones de metros cúbicos al año; de ellos, importa un total de 33,5 millones, frente a los 22 millones que suponen la producción del mercado interior (Ariza, 2002). Actualmente son múltiples las construcciones con estructuras de madera, tanto en edificación como en obra civil, que están en uso o se están construyendo (Figura 1-1). Se pueden encontrar puentes, pasarelas, centros deportivos, recintos industriales o edificios religiosos que incluso se están reconociendo como bienes de interés cultural (Basterra et al., 2004).



Pasarela peatonal de Essing, Alemania (Argüelles, 2010)



Cerchas de cubierta en la iglesia de Belver de los Montes, Zamora

Figura 1-1. Sistemas estructurales con madera

1.1.2 Los elementos de unión en estructuras de madera

Las estructuras de madera están formadas por piezas unidas entre sí en los denominados nudos, que son de vital importancia porque son los encargados de transmitir las solicitaciones entre los miembros que conforman la estructura, de tal forma que el conjunto permanezca estable. Existen múltiples formas de transmitir estas solicitaciones, que pueden clasificarse atendiendo a la forma de encuentro o bien medio de unión empleado, según el cual se pueden subdividir en uniones tradicionales, mecánicas y con adhesivos.

En las estructuras de madera, del 20 al 25 % del coste de la estructura está vinculado con el diseño y construcción de las uniones entre sus diferentes elementos, y requieren una gran dedicación en tiempo (Argüelles et al., 2003). Se ha estimado que, de un cálculo estructural completo, el diseño de las uniones puede representar hasta el 70 % del tiempo total de cálculo para una estructura de madera (Rodd & Leijten, 2003). No obstante, dado que las uniones se dimensionan al final del proceso, se les suele prestar menos atención.

Uno de los medios de unión más común para elementos estructurales de madera son las clavijas. Aunque tienen su origen en el empleo de clavos, abarcan de forma genérica a clavos, grapas, pernos, tirafondos y pasadores; pudiéndose encontrar en una amplia gama de tamaños formas y materiales (Argüelles et al., 2003). Si bien su uso se remonta muy atrás en la historia, fue después de la revolución industrial cuando los elementos clavija se convirtieron en un sistema de fijación común en construcciones de madera, que ha permanecido hasta nuestros días (Figura 1-2).



Unión articulada en la clave de un arco



Nudo de un pilar de madera con la base de cimentación

Figura 1-2. Nudos de unión con clavijas en estructuras de madera (Argüelles, 2010).

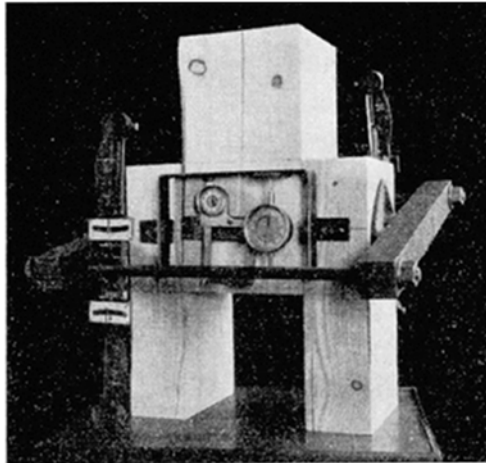
La mejora de las técnicas de diseño en este campo de la ingeniería pronto mostró la necesidad de investigación, debido a lo delicado que resulta el diseño de este tipo de uniones, porque presentan distintas configuraciones de fallo, y pueden aparecer tensiones variables y localizadas en zonas, como los vértices de las piezas de madera; o rótulas de plastificación en las clavijas, provocadas por el momento flector. Por otro lado, la orientación de las fibras de la madera no tiene por qué estar alineada con la dirección de las cargas, influyendo esta diferencia de orientación en la capacidad resistiva de la unión. Es importante conocer cómo las diversas variables que intervienen en la configuración de éstos tipos de elementos afectan a los distintos modos de fallo y a la magnitud de las tensiones. Por ello, las uniones en estructuras de madera que usan elementos de tipo clavija suponen un reto, que da lugar al presente trabajo de investigación.

1.1.3 Marco de trabajo y orígenes del problema

Los trabajos descritos en la presente Tesis Doctoral tienen por objeto la mejora de conexiones tipo clavija en estructuras de madera.

Las uniones con clavija simple (sin elementos adhesivos o expansivos) constituyen un tipo de unión muy empleado en la ejecución de las estructuras de madera. Su diseño se basa en la denominada teoría del rendimiento, que fue

desarrollada en Europa en la década de 1940, y proporciona expresiones para el límite de carga de uniones con diferentes configuraciones mixtas, especialmente para uniones madera-madera y madera-acero (Johansen, 1949) y (Hilson, 1995). En América del Norte también fue adoptada y se denominó "European Yield Model" (Rodd & Leijten, 2003). El dimensionado de uniones mediante estas ecuaciones partió de estudios que analizaban su estado de plastificación, considerando uniones de tamaño real y teniendo en cuenta las principales características de la madera y de los elementos de unión, en especial el comportamiento ortótropo de la madera y los modos de fallo de tipo plástico, como las rótulas en la clavija o el aplastamiento de determinadas zonas de la madera (Figura 1-3).



Disposición de una probeta para el estudio de una unión de madera con clavija (Johansen, 1949)



Estado final de la unión de madera con clavija una vez sobrepasada su capacidad de carga (Argüelles, 2010)

Figura 1-3. Disposiciones de uniones con clavija para su estudio.

En el ámbito europeo, los fundamentos de dimensionado de clavijas han sido recogidos en la normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). Dichos procedimientos para el cálculo de las uniones están asimilados en España en el Código Técnico de la Edificación y, más concretamente, en el Documento Básico de Seguridad Estructural para Estructuras de Madera (DB SE M, 2009), en su Apartado 8.3.

Los nuevos sistemas de fijación, la búsqueda de una distribución de tensiones más uniforme en toda la clavija y el análisis de técnicas de cálculo más ajustadas a la evolución de la unión son el objetivo de esta investigación. Este trabajo toma importancia porque estudia la teoría del rendimiento asumida en normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y analiza el efecto de la reducción del tamaño de los agujeros, que debilitan la escuadría de madera al distribuir las tensiones en las clavijas.

Las técnicas actuales de construcción tienden al empleo de uniones rápidas y más fiables, permitiendo considerar más factores que las técnicas de construcción tradicionales como, por ejemplo, el uso de nuevos adhesivos. Además del aplastamiento de la madera, la flexión de la clavija y el efecto sogá, existen distintas variables, como el uso de bulón roscado, encolados, expansiones dentro del agujero y uniones con tuerca-arandela, que pueden ayudar a optimizar el comportamiento de la unión. En este trabajo se analiza cómo se modifica la relación carga-deslizamiento de la unión al añadir elementos constructivos que distribuyen la tensión de aplastamiento de la madera y la deformación plástica de la clavija.

Se buscan sistemas de unión de tipo clavija que permitan reducir el diámetro de la misma, ya que mayores tamaños de clavija aumentan las posibilidades de rotura frágil en la unión de madera (Guan & Rodd, 2001). El trabajo aborda el estudio de la dependencia de los diversos factores con el diámetro de la clavija, utilizando procedimientos acordes con situaciones reales, y añadiendo además otros condicionantes, como el cambio en la dirección longitudinal en la fibra de la madera (Bainbridge et al., 2002).

Una tendencia habitual en la construcción es el empleo de materiales más ligeros, de mayor resistencia y menor sección. En consecuencia, la realización de agujeros para alojar las clavijas que intervienen en la unión es delicada. Se acentúa la influencia de tensiones locales y resulta necesario considerar el análisis de las secciones netas (descontando los orificios para las clavijas), frente al cálculo simplificado con secciones brutas, habitual cuando se tienen grandes escuadrías.

Otro aspecto que se debe considerar es la resistencia al fuego. En el caso de uniones con elementos clavija no protegidas, como la conexión con clavos, tirafondos, pernos o pasadores, éstas se consideran estables durante 15 minutos. El desarrollo de uniones protegidas frente al fuego es un factor especialmente importante si se pretende mejorar la competitividad de las uniones estructurales; por este motivo, el diseño de unión con clavija y sus posibles modos de fallo deben contemplar disposiciones que reduzcan los efectos del fuego en la medida de lo posible.

La optimización del diseño de la unión debe tener muy presente la teoría del eslabón más débil, lo que puede suponer que un fallo local se propague llevando a un colapso global de la estructura. Existen modos de fallo, como los originados por hiedas, deslizamiento de la unión o excentricidades, que pueden ocasionar colapsos estructurales no previstos en las hipótesis inicialmente consideradas. Por ello, cuanto más simple sea la unión y menos herrajes se necesiten, mejor será el resultado final (Argüelles et al., 2003).

El trabajo desarrollado para realizar la Tesis Doctoral ha implicado labores propias de la Ingeniería Mecánica como:

- Análisis del comportamiento mecánico de materiales estructurales.
- Estudio, selección y validación de modelos resistentes, considerando los fundamentos del Cálculo Estructural y la normativa.
- Modelización de estructuras reales con una revisión de su durabilidad, aspecto aplicado en una construcción rehabilitada y declarada de interés histórico: las Dársenas del Canal de Castilla, en Alar del Rey, Palencia.
- Integración con técnicas numéricas y uso de aplicaciones de elementos finitos.
- Fabricación de prototipos y probetas, para la recopilación de datos resistentes mediante ensayo de las mismas.
- Estudio de distintas composiciones de uniones con clavija, orientado a definir y cuantificar qué efectos mejoran el rendimiento de la unión.

1.2 Interés y originalidad

La originalidad del presente trabajo está en estudiar a fondo tanto los mecanismos resistentes como los de fallo en las uniones tipo clavija, buscando proponer mejoras en su diseño que permitan hacer fijaciones más eficientes. También en trasladar al campo de las estructuras de madera estructural las técnicas de unión que se emplean en otras disciplinas, como por ejemplo las clavijas encoladas (en muebles), la unión por taladros con adhesivos químicos (en diversos materiales) o los sistemas expansivos (en hormigón). Con estas soluciones propias del mercado actual se pretenden desarrollar técnicas de conexión entre elementos de madera con mayor resistencia, ligereza y flexibilidad que las uniones tradicionales.

La novedad radica en poder aplicar y estudiar técnicas que permitan la superposición (sobre la clavija sencilla y lisa) de otros elementos, como pueden ser fijaciones en los extremos, adhesivos y conectores; o modificaciones en la propia clavija, como su rugosidad. Tradicionalmente se han utilizado uniones de tipo metálico, con bases de cálculo fundamentadas en el aplastamiento de la madera o en la formación de rótulas plásticas en la clavija (habitualmente metálica). Resulta interesante introducir simultáneamente mejoras complementarias, como la fricción en todo el hueco del agujero con superficies de mayor rugosidad, la expansión o adherencia en el contacto entre clavija y madera, para determinar la evolución de la carga a medida que progresa el deslizamiento de la unión.

Se pretende reforzar la seguridad para construir con este tipo de uniones tipo clavija y aumentar su rendimiento, ampliando las garantías de cálculo sobre nuevas especificaciones superpuestas, dando:

- Un mayor soporte a las normativas actuales, con una nueva forma de calcular que integre con más precisión el efecto de fijaciones, adhesivos y expansiones, y orientada a lograr una distribución tensional extendida a nuevas zonas.
- Una definición de la metodología para proceder con estas formas de construir, e información más precisa del comportamiento a rigidez de la unión.
- Más información sobre la evolución de estos elementos estructurales, con métodos de ensayo más completos, en paralelo con el cálculo analítico y la simulación basada en el Método de los Elementos Finitos (MEF).

1.3 Objetivos globales

El objetivo global de esta Tesis Doctoral se centra en el análisis de las principales configuraciones utilizadas en uniones de tipo clavija en estructuras de madera y sus modos de fallo, así como en su optimización, determinando las tensiones que aparecen en ellas y las resistencias que las caracterizan, e intentando afectar lo menos posible a las secciones de la viga en que se insertan estas uniones.

Se comparan los resultados obtenidos mediante las ecuaciones analíticas contempladas en las normas (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y la bibliografía de referencia con los obtenidos mediante simulaciones numéricas y ensayos experimentales.

Se pretende conocer qué complementos, como por ejemplo el encolado, las fijaciones en los extremos o los kits de expansión, se pueden añadir a la clavija para mejorar su rendimiento, considerando variables geométricas, de carga, de contorno o de material.

Las conclusiones obtenidas de este estudio aspiran a facilitar el cálculo, ensayo, elección y composición de elementos que constituyen la unión, así como sus los parámetros geométricos. En definitiva, obtener un diseño más eficiente, seguro, económico y de mayor calidad.

1.4 Objetivos parciales

El abanico de objetivos globales se puede desglosar en otros más particulares y concretos, que corresponden con desarrollo del trabajo:

- 1) Analizar el estado del arte en lo referente a uniones en estructuras de madera, e identificar tipologías afines al contexto de la madera estructural, junto con sus posibles variantes de diseño.
- 2) Someter a revisión las expresiones que permiten determinar la resistencia de las uniones tipo clavija. Estudiar cuáles son las principales indicaciones de diseño propuestas por las normas, así como sus límites. Analizar las ecuaciones de dimensionado e identificar propuestas que mejoren el estado de la técnica, tanto en resistencia como en rigidez.
- 3) Estudiar los elementos que participan en la unión, para garantizar su buen comportamiento, caracterizando los materiales empleados y otros elementos que pudieran suponer una contribución positiva al comportamiento del conjunto.
- 4) Realizar un acercamiento a estructuras reales y casos prácticos con exigencias concretas, tanto estructurales como de durabilidad, a fin de dar una proyección aplicada del trabajo de investigación e identificar motivos de fallo en estructuras operativas, tomándolas como referencia para definir nudos, materiales, geometrías, cargas y comportamientos prácticos y aplicados.
- 5) Desarrollar modelos numéricos, como el de elementos finitos o el relacionado con los diagramas de cuerpo libre y las ecuaciones de equilibrio estático en distintas situaciones de carga, con la intención de conocer

en detalle la evolución de las distintas clases de unión con clavija a medida que entran en carga y las magnitudes de las tensiones en las zonas de interés, especialmente interiores a la unión, que de otra forma sería complicado determinar.

- 6) Estudiar el comportamiento de los nudos desde un enfoque experimental, fijando los procedimientos de ensayo, y estableciendo el número de ensayos representativos y su composición en muestras como base de posibles tratamientos estadísticos. Realizar gráficas comparativas y valorar posibles fallos en la unión. Comparar los resultados experimentales con los correspondientes a las simplificaciones asumidas por las normas y los modelos de elementos finitos.
- 7) Integrar los resultados obtenidos de los ensayos en una aplicación de gestión que permita generar informes normalizados, de modo que sirva como base de datos para otros trabajos futuros, y facilite el tratamiento y análisis de la información.
- 8) Valorar elementos adicionales que puedan reforzar a la unión con clavija, al objeto de reducir los valores del diámetro de clavija y evitar el debilitamiento de las vigas de madera.
- 9) Obtener las conclusiones finales del estudio y propuestas de mejora que puedan ampliar los conocimientos sobre el diseño de este tipo de uniones.

1.5 Estrategia para el desarrollo

Los principios del método de los componentes suponen la descomposición de un problema complejo en variables más fáciles de estudiar. Esto es muy habitual en el cálculo vectorial asociado a las ecuaciones de equilibrio estático que se dan en el cálculo de estructuras. También ha sido tomado como referencia en trabajos de montajes mecánicos de tipo clavija con madera (Dong Phuong, 2006). El hacer uso del método de los componentes puede ser una tendencia que permita la integración futura de otros complementos mecánicos en la unión. El método se desarrolla en las siguientes fases:

1. Identificación de los elementos constitutivos de la unión, sometidos a tracción, compresión o cortadura y flexión.
2. Determinación del comportamiento mecánico de cada uno de estos componentes.
3. Conjunción de distintos elementos, con el fin de establecer el comportamiento a resistencia, a rigidez y a plastificación del conjunto o partes de él.

La aplicación de este método al estudio del comportamiento de las uniones mecánicas objeto de estudio supone un estudio "local" de los componentes que contribuyen al diagrama del cuerpo libre. Consiste principalmente en desarrollar modelos analíticos para el análisis del comportamiento del nudo. Posteriormente, otro estudio "global" de las uniones analiza como se cambian otros elementos de refuerzo.

Este método también ha sido asumido por otros autores (Otero, 2009) a la hora de introducir complementos de mejora en sus trabajos sobre "Barras roscadas de acero encoladas en madera de frondosa". En este caso, los posibles fallos deben ser tratados y descritos con detalle, porque cualquiera de ellos puede dar lugar al colapso del sistema. Entre los fallos más significativos que pueden aparecer están los siguientes:

1. Fallo del elemento de madera. Implica la revisión del dimensionado de este elemento. Supone la caracterización de la madera y su comportamiento como viga para transmitir esfuerzos al nudo.
2. Fallo de la clavija. Supone verificar el dimensionado del elemento de enlace teniendo en cuenta los fallos que se pueden producir, como las rótulas plásticas.
3. Fallo de cohesión en la zona de contacto entre la clavija y la madera. Supone considerar la mayor o menor distribución tensional y de efecto soga a lo largo del agujero) o fallos por cortante en zonas muy localizadas de la clavija, como la correspondiente a intercaras de madera.

4. Fallo de elementos de refuerzo, como el adhesivo introducido entre clavija y madera, debido al desprendimiento que en éste se puede producir ante deslizamiento de la clavija respecto al agujero.
5. Fallo por hendidura del elemento de madera y verificación de las distancias mínimas de la madera para evitar problemas como la aparición de hiedas.

La Tesis considera los nuevos desarrollos normativos basados en prestaciones u objetivos, independientemente de las técnicas que se hayan utilizado para la construcción de la estructura. Para ello se estudian los estados límite últimos, especialmente por la plastificación en la zona de unión; pero también las deformaciones que puede tener la unión en función de la situación de carga, facilitando criterios de diseño cercanos a los estados límite de servicio. Distintas organizaciones internacionales (CEPE, CIB, IRCC, etc.), relacionadas con la normativa de la edificación y estructuras, reconocen estos sistemas basados en prestaciones (Wikipedia CTE, 2014). Este enfoque facilita la innovación y el uso de nuevas técnicas, permitiendo su uso aunque no existieran cuando se redactó una norma, siempre que el resultado que proporcionen las nuevas técnicas sea el adecuado. Las tendencias anteriores estaban orientadas a prescripciones, donde los trabajos de construcción eran fijados por norma y no era posible utilizar técnicas desarrolladas posteriormente y/o había un desajuste entre la investigación básica y el desarrollo aplicado.

El desarrollo de la Tesis Doctoral ha estado orientado al estudio de uniones realizadas mediante la composición de piezas comerciales. El sistema de evaluación de la resistencia de la madera y, en general, la aplicación normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) están orientados a sistemas estructurales que consideran las fases de proyecto, construcción, mantenimiento y conservación. Por ello, desarrollar el estudio a partir de piezas pequeñas y libres de defectos no siempre da lugar a resultados ajustados a la realidad (Ariza, 2002).

Teniendo presente esta estrategia, se utilizó una estructura en el desarrollo del estudio basada en:

1. Objetivos: Éstos deben ser cumplidos por las estructuras y sus uniones, según una extensa normativa con el mayor grado de actualización posible.
2. Exigencias: Requieren un desarrollo más técnico, considerando las exigencias que se establecen en las estructuras para que se den por cumplidos los objetivos.
3. Métodos de verificación: Supone establecer métodos de verificación que se admitan para comprobar que un trabajo cumple con las exigencias.
4. Soluciones aceptadas: Se trata del compendio de soluciones constructivas válidas y que cumplen con los métodos de verificación.

Los puntos anteriores se hacen eco de las indicaciones de las principales Organizaciones Internacionales relacionadas con los códigos de la edificación, tales como el Comité Interjurisdiccional de Colaboración Reglamentaria o el Consejo Internacional de la Edificación, ambos “inspiradores de los códigos de países avanzados”, tal y como indica el Código Técnico de la Edificación en su exposición de motivos y que es la base de distintos documentos relacionados con la seguridad estructural (DB SE, 2009), (DB SE AE, 2009) o (DB SE M, 2009).

1.6 Estructura de la memoria

La presente memoria, que expone el desarrollo de la Tesis Doctoral, se organiza en 7 capítulos, cuyo contenido se describe brevemente a continuación.

En el Capítulo 1 se ha realizado una breve revisión de los antecedentes, divididos en tres apartados correspondientes a la madera, las uniones estructurales y el problema en particular que ha sido objeto de estudio. Se enumeran los objetivos y se expone la estrategia para alcanzar éstos, junto con otros elementos de interés.

En el Capítulo 2 se recopilan las características de la madera estructural y sus propiedades mecánicas, se clasifican los distintos elementos de unión y, finalmente, se centra en las uniones con elementos de tipo clavija, desarrollando más detalladamente su comportamiento mecánico con las bases de cálculo reconocidas.

El Capítulo 3 describe los modelos de referencia que han sido utilizados, partiendo de las premisas que se esperan para un buen comportamiento de la unión. Se describen las actividades para ratificar la caracterización de las propiedades de los materiales que dan origen a la unión. Se valoran y seleccionan los elementos de refuerzo, como adhesivos, conectores y sistemas de expansión. Se finaliza el capítulo analizando una estructura real y restaurada, mostrando los fallos que tuvieron lugar en ella (especialmente en lo referente a los nudos), así como las soluciones que han sido adoptadas en su reconstrucción y el proceso de cálculo que define las capacidades de carga requeridas en las uniones.

En el Capítulo 4 se exponen los modelos numéricos que se han utilizado para el dimensionado y obtención de resultados, donde se han empleado especialmente dos técnicas: las ecuaciones analíticas de dimensionado, ya reconocidas, y un modelo de elementos finitos. En éste último se ha incluido una subrutina programada de forma específica para simular el comportamiento mecánico de la madera.

En el Capítulo 5 se recopilan las técnicas de ensayos empleadas para determinar las propiedades de la madera y, posteriormente, de todo el conjunto de unión de madera con clavija. Se describen los controles y el procedimiento de ensayo que ha sido aplicado para garantizar la fiabilidad de los resultados experimentales. Finaliza el capítulo con la descripción de los informes de resultados (facilitados en el anexo correspondiente) y cómo estos informes se han gestionado y conectado con los resultados numéricos a través de una base de datos desarrollada a tal efecto.

En el Capítulo 6 se muestran los resultados de los modelos y trabajos descritos en capítulos anteriores. Están estructurados según los siguientes apartados:

- Evolución de las variables geométricas y resistentes que afectan a la unión, según el modelo analítico reconocido, y la importancia que presentan cada una de ellas para conseguir una mayor capacidad de carga en la unión.
- Resultados de tensiones y deformaciones, especialmente en la zonas expuestas a mayor trabajo, junto con los resultados de la capacidad de carga de la unión frente al deslizamiento, haciendo uso del modelo de elementos finitos
- Análisis de los informes de ensayos en consideración a: las variaciones geométricas, las propiedades mecánicas más relevantes y los elementos de refuerzo que se han empleado. Se muestran las curvas que relacionan la capacidad de carga en la unión frente al deslizamiento fruto de los trabajos empíricos, se realiza un estudio de la energía que puede recoger la unión y se comparan los resultados de los ensayos con los modelos numéricos previos.
- Se exponen los resultados de la propuesta analítica que permite conocer la evolución de carga frente al deslizamiento, junto con la superposición de elementos de refuerzo y la introducción de efectos que el modelo analítico inicial no contemplaba.

Éste capítulo concluye con la validación de los resultados obtenidos que han sido generalizados a todos los ensayos y comparados con la nueva propuesta analítica realizada, para ratificar que ésta es acertada y permite obtener soluciones seguras.

Finalmente, en el Capítulo 7 se recopilan las conclusiones alcanzadas y se hace una revisión de los objetivos iniciales junto con las evidencias que ratifican su logro. También se exponen los patrocinios (tanto públicos como privados) que ha tenido este trabajo, las publicaciones en revistas científicas y congresos a los que ha dado lugar, para terminar con la propuesta de posibles líneas de trabajo a futuro.

La memoria finaliza con una relación de la bibliografía consultada, las Tablas y Figuras enumeradas en la tesis. Se incluyen también los anexos en formato digital, que contienen: los modelos numéricos, la base de datos y los resultados (tanto numéricos como experimentales) que han sido fruto de este trabajo.

2 Estado de la técnica sobre la madera estructural y los elementos de unión

2.1 Introducción

Este capítulo recopila el estado de la técnica en la madera y sus elementos de unión. Es necesario para establecer las bases de trabajo con las que luego se desarrolla el proceso de investigación. Se inicia describiendo el comportamiento de la madera, en especial sus propiedades mecánicas, y cómo a partir de éstas se ha establecido un sistema normalizado que permite agruparlas en función de sus tipos y calidades. Se describe este sistema de clases resistentes que permite identificar las especies de madera más empleadas en el ámbito estructural y su relación con las propiedades mecánicas, en especial las de resistencia característica y las de rigidez. También se describen las singularidades de afectan a la madera y cómo afectan a su comportamiento mecánico.

Posteriormente se hace una recopilación general y clasificación de los tipos de uniones más empleados en estructuras de madera, situando las uniones de tipo clavija en este contexto. Se pasa a realizar un estudio más detallado de éstas, partiendo del estado de investigación de este tipo de elementos y cómo ha evolucionado en el tiempo. Se identifica una de las corrientes de investigación más importantes en el diseño de estas uniones que se asocia con la plastificación en determinadas zonas del conjunto, se desarrollan de forma detallada sus hipótesis, los modos de fallo que contempla y las ecuaciones a las que han dado lugar y que actualmente se emplean a través de las normas de cálculo y diseño.

El capítulo finaliza con la exposición de otros efectos que se pueden dar en las uniones de madera con clavija, como por ejemplo: la superposición del efecto sogá, el fallo por hienda, el comportamiento de la unión expuesta a fuego o la evolución de la deformación en la unión como consecuencia del tiempo.

2.2 La madera como material estructural

La madera es un material de comportamiento mecánico complejo en comparación con otros materiales de uso estructural, como son el acero o el hormigón, ya que presenta propiedades como la anisotropía, fenómenos de hinchazón y merma, y deformaciones diferidas en el tiempo, que en acero y hormigón se consideran despreciables.

En los siguientes apartados se van a exponer, para este material, las anteriores propiedades, así como otras que pueden resultar de interés para entender su comportamiento como material estructural.

Las estructuras de madera están alcanzando gran popularidad, debido a sus ventajas estéticas, de resistencia y medioambientales, frente a otros materiales tan utilizados como el acero, con serios problemas de resistencia a fuego, y el hormigón, de gran peso propio. Algunas ventajas de la madera para la realización de estructuras son:

1. Requiere poco gasto energético para su fabricación, transporte y puesta en obra.
2. Es fácilmente manejable y mecanizable.
3. Permite realizar montajes de forma rápida, limpia y en ausencia de agua.
4. Es un material ligero, con una relación interesante entre resistencia y peso.
5. Permite salvar grandes luces, sobre todo en las variantes laminadas, adaptándose prácticamente a cualquier estilo.
6. Confortable, ya que es un buen aislante térmico, presenta una buena absorción de las ondas acústicas (lo que se traduce en una reducción de la reverberación), regulariza la humedad del medio interior y mantiene un equilibrio higroscópico con el medio (tomando o cediendo humedad hasta alcanzar un equilibrio).
7. Con un diseño y puesta en obra correctos, las soluciones constructivas con madera pueden llegar a ser muy duraderas.

8. Bajo impacto ambiental. Los protocolos sobre el cambio climático, como el de Montreal y el de Kioto, complementado por revisiones como el Plan de Acción de Bali, han potenciado el uso de la madera en la construcción (y también en el sector energético), basándose en su gran capacidad fijadora de CO₂ y su positivo efecto en la reducción de la huella ecológica dejada por el proceso edificatorio.

Frente a estas ventajas, se presentan también algunos inconvenientes, como son la ortotropía, fluencia, hinchazón y merma, atenuadas en parte gracias a los materiales compuestos laminados y microlaminados. Otro inconveniente para su uso estructural ha sido la falta de un suministro regular de madera (especialmente en España en los últimos 50 años), junto con la ausencia de una normativa oficial que amparase al proyectista en sus cálculos y diseños (Labèrnia et al., 2010), lo que derivó en un paulatino desuso del material, resuelto con la entrada de documentos normativos de respaldo legal. El Código Técnico de la Edificación con el Documento de Seguridad Estructural en Madera (DB SE M, 2009) en España y su base de referencia en el ámbito europeo, el Eurocódigo 5 (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), permiten vislumbrar un cambio en la trayectoria en los últimos años.

2.2.1 Anisotropía

Debido a su importante efecto sobre el resto de variables mecánicas, la anisotropía es una propiedad destacable. Ésta se debe a la particular estructura macroscópica en forma anular de la madera, ocasionada por los diferentes ciclos de crecimiento anuales.

Dentro del tronco de un árbol existen diferentes zonas, con peculiaridades a nivel microestructural, que provocan diferentes propiedades físicas y mecánicas. Entre las partes del árbol se pueden distinguir:

- La **médula**, restos del tejido vascular primario del centro del tronco, con escasa resistencia.
- El **duramen**, en la zona interior, suele ser más oscura y dura. Está formada por células fisiológicamente inactivas.
- La **albura** es la zona exterior del tronco más joven. Por ella viajan la mayoría de los compuestos de la savia; es más blanca, menos densa y más susceptible al ataque de los xilófagos, pero fácilmente impregnable en comparación con el duramen, por lo que es fácil de tratar.
- El **cámbium**, se trata de una capa que sigue a la corteza; en ella se distingue el xilema, que es la capa interior que va formando la madera, y el floema, que va dando lugar a la corteza.
- La **corteza externa**, formada por células muertas, sirve de protección al árbol frente a los agentes atmosféricos.

Es aconsejable fijar un sistema de coordenadas para el tronco al completo, de tipo cilíndrico. En la Figura 2-1 se muestra un esquema de la sección de un tronco con sus diversos anillos, así como del sistema de coordenadas radial apropiado para definirlo. Bajo estas condiciones, los tres planos de trabajo presentan diferentes valores en sus propiedades mecánicas, es decir, existirá ortotropía. Estos planos también se denominan: transversal o axial (perpendicular al eje axial), tangencial (perpendicular al eje radial) y radial (perpendicular al eje tangencial).

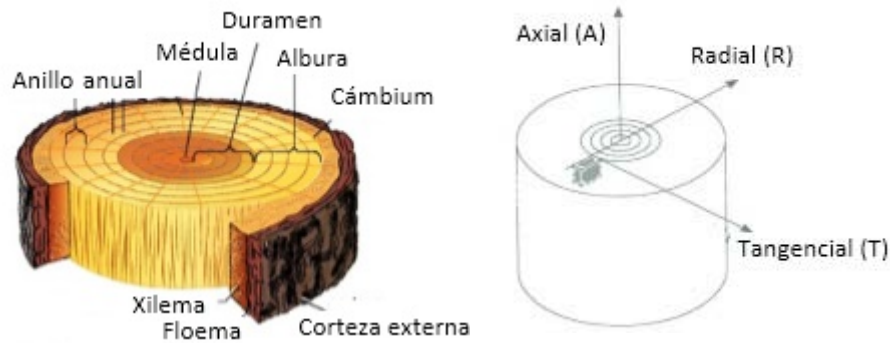


Figura 2-1. Ejes principales de crecimiento de la madera en un tronco (Argüelles, 2010).

Entre los componentes de la madera se pueden distinguir la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, cuyas proporciones se pueden ver en la Tabla 2-1, y elementos químicos base en los anteriores, como carbono (50 %), oxígeno (44 %), hidrógeno (6 %), cenizas (0,5 %) y nitrógeno (0,1 %).

Tabla 2-1. Elementos primarios en la madera.

	Coníferas	Fronchosas
Celulosa	50%	50%
Hemicelulosa	23%	26%
Lignina	27%	24%

Los componentes cumplen funciones específicas:

- La **celulosa** forma parte de los tejidos de sostén.
- La **hemicelulosa** es un polisacárido que forma parte de la matriz, junto a la lignina, donde reside la celulosa y constituye la pared rígida. Protege a la célula de la presión ejercida sobre ésta por el resto de las células que la rodean.
- La **lignina** es un polímero que realiza múltiples funciones esenciales en el desarrollo vegetal. Por ejemplo, se encarga de engrosar el tallo y proporciona rigidez a la pared celular. Los tejidos lignificados resisten el ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular.

La justificación del comportamiento anisótropo reside en la estructura microscópica de este material, que se compone de fibras colocadas en la dirección axial o longitudinal del tronco. En el plano perpendicular a ésta aparecen otras dos direcciones, ambas perpendiculares entre sí, con diferente comportamiento mecánico. La razón de este comportamiento se debe a la diferencia en la densidad de las fibras en la dirección de crecimiento del tronco asociada con las estaciones del año y sus características climáticas. En cada anillo de crecimiento se distingue la madera formada en primavera (más clara, con células de mayor diámetro y paredes más delgadas) y la madera formada en verano (más oscura, células de menor diámetro y más oscuras). La alternancia en el color entre la madera de primavera y verano da lugar a las vetas. Como se observa en la Figura 2-2, dentro de la sección transversal, se pueden apreciar distintos tamaños en las traqueídeas, o vasos, que tienen influencia en la densidad de la madera.

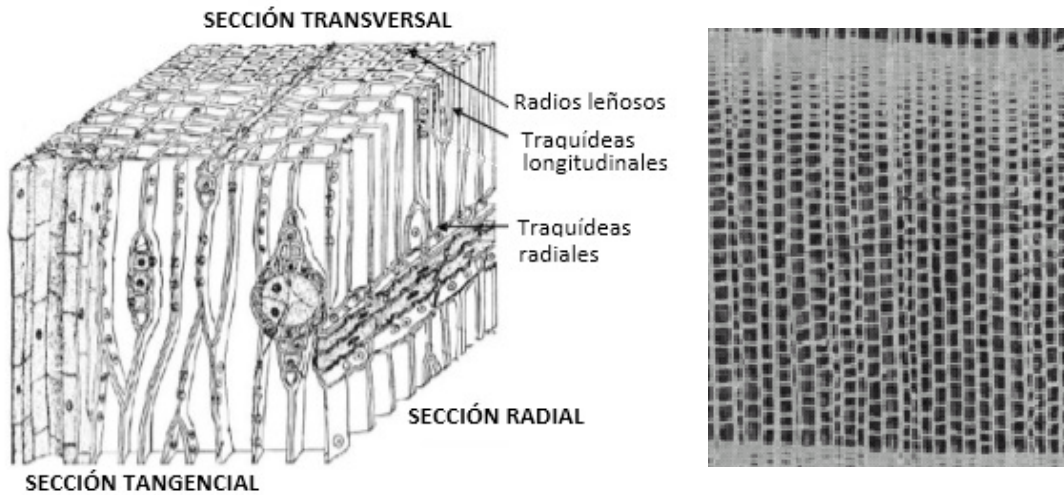


Figura 2-2. Corte anatómico en la madera y diferentes densidades de las fibras en función del ciclo de crecimiento (Queipo et al., 2010).

Las fibras se encuentran sensiblemente alineadas en la dirección tangencial. En la radial, la alineación no es tan perfecta, lo que disminuye su capacidad de resistencia (Holmberg & Persson, 1999). La diferencia entre ambas direcciones se representa en la Figura 2-3, donde se pueden apreciar las irregularidades en la formación de los vasos, entre las direcciones transversal y radial de la fibra.

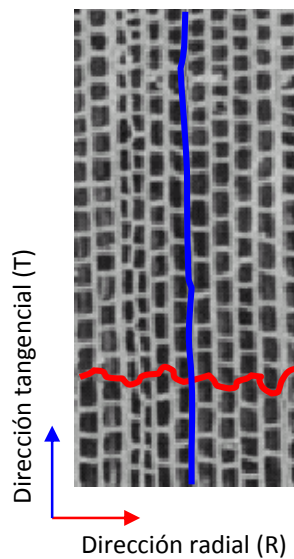


Figura 2-3. Diferencias de alineación en las fibras para las dos direcciones transversales.

No obstante, la diferencia de comportamiento entre estas dos direcciones es menos acusada que la que existe entre cualquiera de éstas y la correspondiente al eje axial. De modo orientativo, la Figura 2-4 presenta las tres direcciones con la resistencia relativa a la compresión.

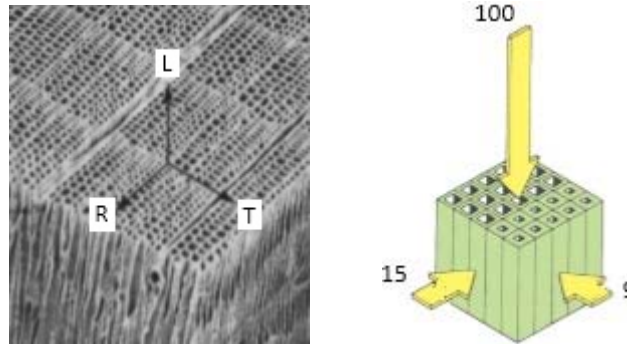


Figura 2-4. Resistencia relativa a la compresión en cada una de las tres direcciones de ortotropía (Holmberg & Persson, 1999).

El sistema cilíndrico expuesto en la Figura 2-1 es adecuado para la descripción global del tronco, pero las piezas de madera utilizadas en estructuras (que se obtienen del mismo tronco) se estudian mejor mediante un sistema de coordenadas cartesianas, puesto que las capas en éstas quedan casi planas y paralelas.

El comportamiento ortótropo de la madera con tres direcciones distintas se simplifica a dos en el cálculo habitual de estructuras, ya que entre las dos direcciones de simetría perpendiculares a la longitudinal (radial y tangencial) apenas existe diferencia de comportamiento. Además, tanto si se trata de una pieza de madera aserrada o laminada, la posición relativa de extracción de cada pieza con respecto a los anillos del árbol no modifica sustancialmente el comportamiento en las direcciones radial y tangencial. Por otro lado, la aleatoriedad de su posición haría imposible una adecuada consideración de las diferentes magnitudes de comportamiento en cada caso, como muestran la Figura 2-5 y la Figura 2-6.

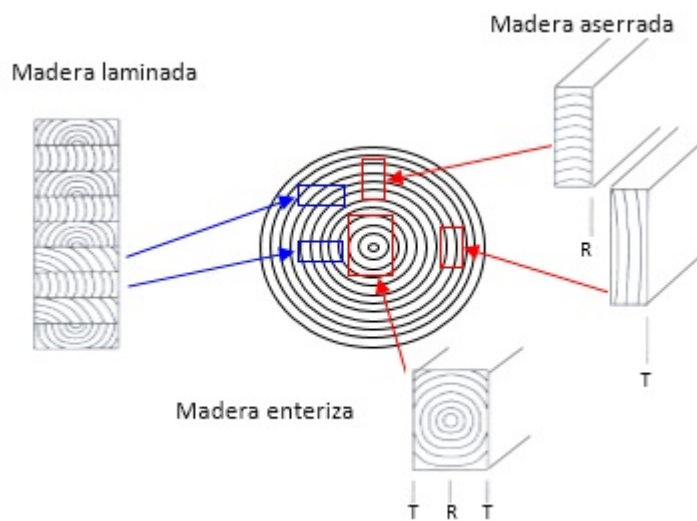


Figura 2-5. Posición relativa de las direcciones transversales de la madera con respecto a la sección.

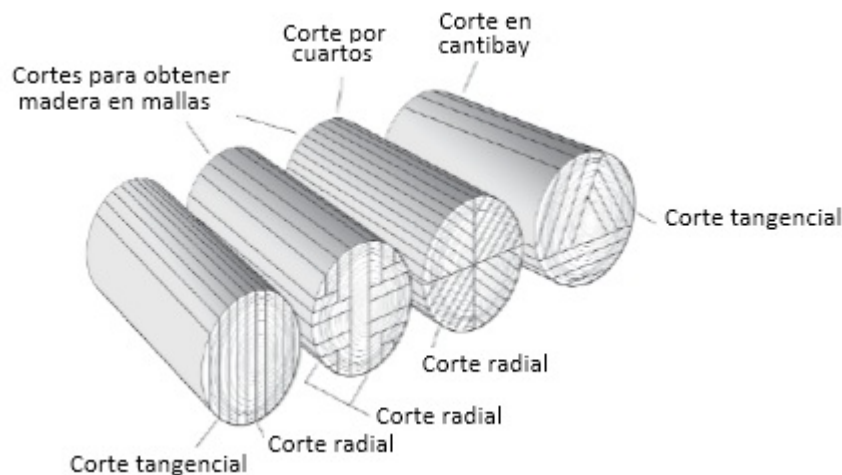


Figura 2-6. Tipos de corte para el aprovechamiento en escuadrías de madera.

2.2.2 Propiedades físicas

Al ser la madera de origen orgánico, presenta algunas características que no aparecen en otros materiales de construcción, como el acero o el hormigón.

- **Higroscopicidad.** El grado de humedad que contiene la madera se reduce desde el momento de su tala por un efecto de secado en el ambiente, alcanzando un valor que no es constante, sino que varía con la temperatura y humedad relativa de éste.
- **Hinchazón y merma.** La variación de la humedad en la madera implica una variación de su volumen, con la consiguiente modificación de las dimensiones de los elementos que se fabrican con ésta (Figura 2-7). En consecuencia, pueden surgir problemas de tensiones añadidas a las de trabajo debido a la variación de las dimensiones iniciales de la estructura, desajustes en las uniones y aparición de grietas o fendas de secado que favorecen el ataque de insectos xilófagos y hongos. Para evitar todos estos problemas, a la madera, tras su tala, se la somete a secado hasta alcanzar una humedad lo más parecida a la humedad de equilibrio higroscópico que tendrá durante su servicio. Este valor oscila desde un 30 %, si forma parte de una obra hidráulica, hasta un 10 %, si el elemento se va a situar en un local calefactado. Por otro lado, no todas las direcciones son igual de sensibles, siendo la tangencial la más variable, mientras que la axial apenas cambia.

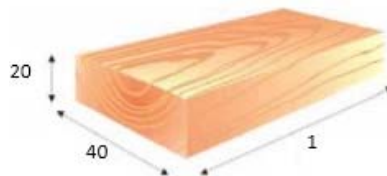


Figura 2-7. Hinchazón y merma relativa en la madera (en %).

- **Densidad.** Es otro dato importante que se ha de considerar, debido a que va a participar en la concarga de la estructura (esto es, cargas cuya magnitud se va a mantener constante a lo largo de la vida de la estructura). Su valor va a depender de cada especie, y de su contenido de humedad; en general, se toma como referencia para la misma un 12 % (UNE-EN 384, 2004). Bajo estas condiciones, las coníferas más utilizadas tienen una densidad comprendida entre 420 y 550 kg/m³, y las frondosas estarán entre 550 y 700 kg/m³, aunque pueden llegar a oscilar entre valores de 350 y 900 kg/m³ (DB SE M, 2009).

2.2.3 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la madera deben estar en coherencia con un trabajo de diseño conjunto que permita valorar las soluciones más interesantes a elegir de entre las distintas variables (véase Figura 2-8).

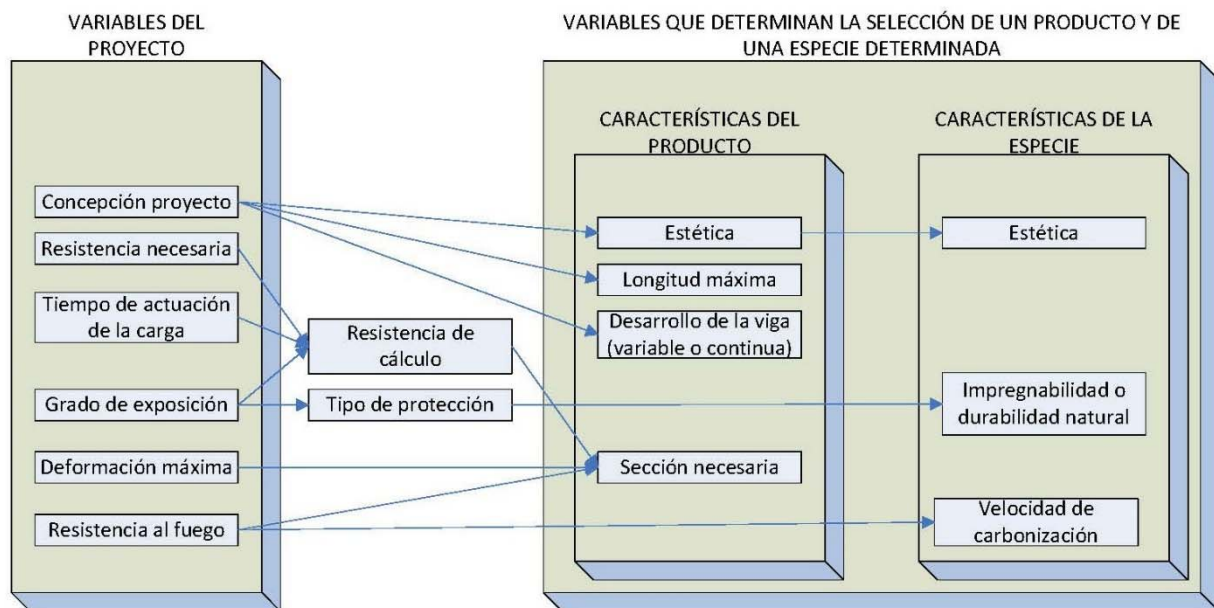


Figura 2-8. Diagrama para la elección del producto más adecuado (Queipo et al., 2010).

El comportamiento mecánico de la madera se caracteriza por su alta resistencia a tracción y compresión en dirección paralela a la fibra longitudinal, en contraposición a su baja capacidad resistiva ante estos mismos esfuerzos en dirección perpendicular. También es baja su resistencia a cortante. Por otro lado, tiene un módulo de elasticidad bajo, lo que provoca deformaciones apreciables, sobre todo comparadas con las del acero.

2.2.3.1 Tracción-compresión paralela a la fibra

La causa del diferente comportamiento, bajo esfuerzos axiales de tracción y compresión, radica en la anisotropía del material. Los valores habituales de la capacidad de resistencia para las diversas clases de madera en la dirección de la fibra varían entre 8 y 30 N/mm² en tracción y de 16 a 29 N/mm² en compresión (UNE-EN 338, 2010). Los tirantes y los pendolones de las cerchas son ejemplos de elementos sometidos a tracción, mientras que en compresión pueden trabajar pilares, montantes de muros y entramados.

Bajo esfuerzos de compresión, deben tenerse en cuenta los efectos de inestabilidad (pandeo) que provoca la disminución de la capacidad portante. En este fenómeno, la propiedad mecánica más importante es el módulo elástico que, para la madera, tiene un valor relativamente bajo. En especial ante esfuerzos de compresión, como se observa en la Figura 2-9, ya que su curva tensión-deformación es más plana que la de tracción y se pueden distinguir distintas fases en su comportamiento. El comportamiento de la madera también es distinto en función de los defectos. La Figura 2-9 muestra la resistencia en tracción y en compresión para madera libre de defectos, pero esta situación se invierte en madera clasificada por la influencia de defectos, especialmente nudos, que afectan sobre todo, a la madera sometida a tracción, reduciendo su capacidad de carga.

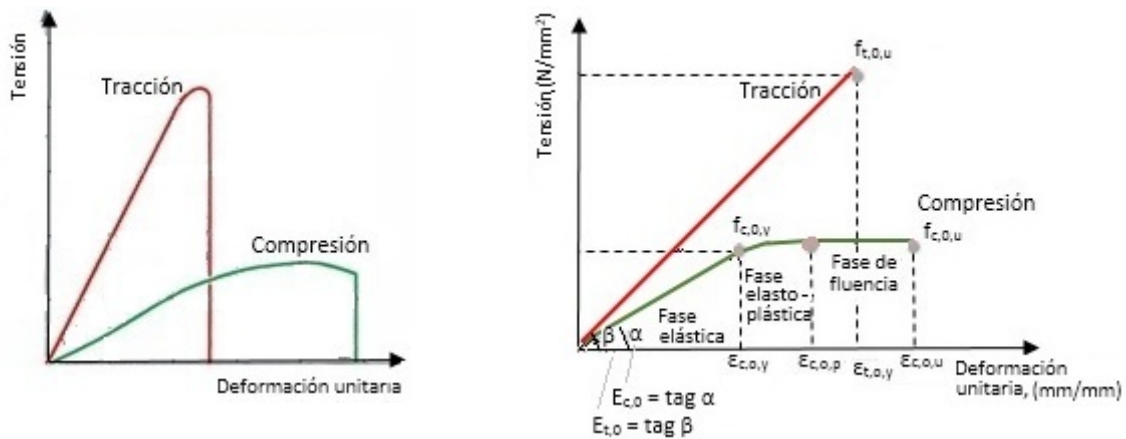


Figura 2-9. Diagrama tensión-deformación para madera general y para el pino silvestre en particular, en dirección paralela a la fibra en madera libre de defectos.

2.2.3.2 Flexión

Según la ley de Navier, un momento flector provocará una distribución lineal de tensiones normales; parte serán de tracción y parte de compresión. Al contrario de lo que pasa con otro tipo de materiales, el comportamiento de la madera bajo un esfuerzo de tracción, debido al momento flector, es diferente del que provoca un axil de tracción, siendo mejor en el primer caso. De hecho, en coníferas, habituales en estructuras, se alcanzan tensiones bajo flexión de 14 a 50 N/mm² (UNE-EN 338, 2010), frente a los 8-30 N/mm² antes indicados para el axil de tracción. Este tipo de esfuerzo aparece en vigas, viguetas de forjado y pares de cubierta.

2.2.3.3 Tracción-compresión perpendicular a la fibra

La resistencia de la madera frente a los esfuerzos perpendiculares a la fibra disminuye enormemente en comparación con los esfuerzos paralelos a la misma. De hecho, en tracción, tiene valores de 0,4 N/mm² para coníferas, con lo que la disminución es del orden de 30 a 70 veces, mientras que en compresión ronda los 2,5 N/mm² para maderas de coníferas medias (entorno a la clase resistente C24), lo que supone una reducción del 80 % de la resistencia del material con respecto a la dirección paralela y este mismo tipo de esfuerzo.

La justificación, para el caso de tracción, vuelve a estar en la constitución microscópica de la madera; las fibras están alineadas en una sola dirección, sin elementos de cohesión para mantenerse unidas. Por bajos que sean los esfuerzos a los que se sometan las fibras en sentido perpendicular, la resistencia es muy limitada. Esta característica puede dar lugar a problemas en tipologías estructurales de madera, como son las vigas curvas y los arcos, donde la propia geometría deriva en la aparición de estos esfuerzos de tracción perpendiculares a la fibra. En la Figura 2-10 se puede identificar una viga curva, donde las tensiones de tracción pueden dar lugar a fallos en la región de vértice. Estas limitaciones pueden atenuarse con la introducción de barras de acero transversales que refuerzan la región (Fueyo et al., 2008). Las vigas entalladas con rebaje en la zona de apoyo son otra situación donde se pueden dar fallos por tracción perpendicular a la fibra, que también pueden ser resueltos mediante el refuerzo con pernos transversales a la fibra.

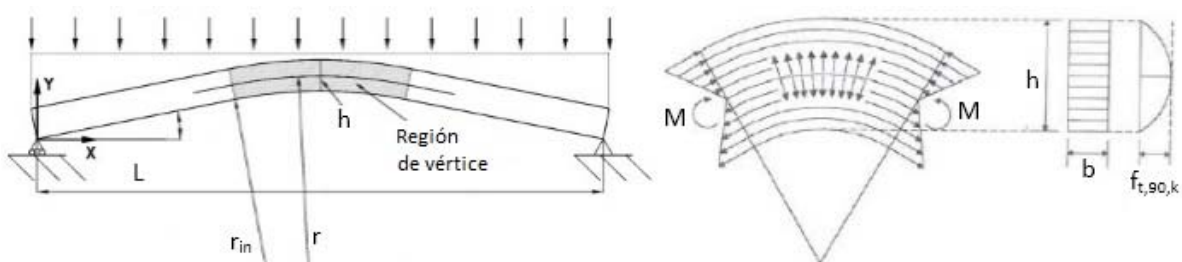


Figura 2-10. Viga curva sometida a tensiones de tracción perpendicularmente a la fibra.

En cambio, en compresión, la resistencia de la madera, aunque baja, aumenta notablemente con respecto al caso de tracción, porque en este caso no se produce una separación de las fibras, sino un fenómeno de aplastamiento; en la Figura 2-11 se observa la curva tensión-deformación que lo representa.

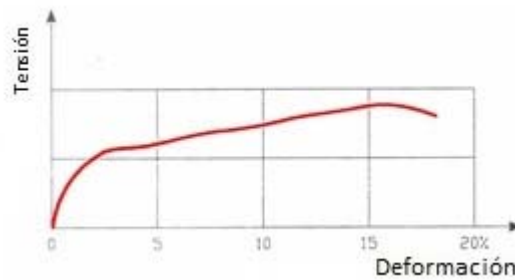


Figura 2-11. Tensión-deformación bajo esfuerzo de compresión perpendicular a la dirección de la fibra longitudinal (Argüelles et al., 2003).

Un caso muy habitual de aparición de este tipo de esfuerzo se da en las zonas de apoyo de las vigas, según se observa en la Figura 2-12.

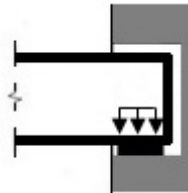


Figura 2-12. Tensiones de compresión en el apoyo de una viga.

2.2.3.4 Cortante

Según la relación entre la dirección en que trabajan las tensiones tangenciales que provoca el esfuerzo cortante y las fibras, tenemos diferentes modos de fallo. Son los que se observan en la Figura 2-13.



Figura 2-13. Modos de fallo por cortante (Argüelles et al., 2003).

Cuando se trate de vigas sometidas a flexión, también aparecerán las tensiones de deslizamiento y cortadura, que tendrán el aspecto representado en la Figura 2-14. En este caso, la forma de fallo será por deslizamiento, pues es la situación en que el material presenta menor resistencia (entre 1,7 y 3 N/mm²).

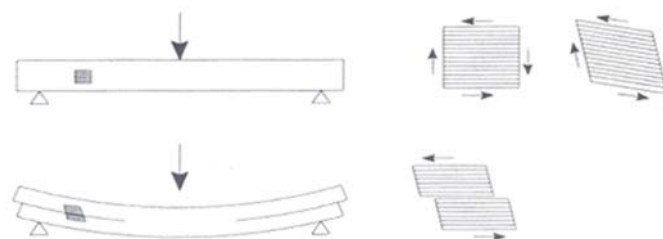


Figura 2-14. Modos de fallo por cortante en viga sometida a flexión (Argüelles et al., 2003).

En el fallo por rodadura, la madera presenta aún menor resistencia (alrededor de un 25 %) frente al deslizamiento, pero afortunadamente no es un caso que aparezca con frecuencia. Se da, por ejemplo, en uniones encoladas entre el alma y el ala de viguetas con sección en doble T.

2.2.3.5 Módulo de elasticidad

En la madera deben adoptarse dos módulos de elasticidad, uno paralelo a la fibra y otro perpendicular a la misma. En el primer caso, también existe un comportamiento diferente del material, según esté sometido a tensiones de compresión o de flexión. En la práctica, se desprecia esta distinción y se toma un único módulo, cuyo valor oscila entre 7 y 16 kN/mm² para los diferentes tipos de madera. Por su parte, en la dirección perpendicular, el módulo de elasticidad oscila entre 0,23 y 0,53 kN/mm², aproximadamente 30 veces inferior al anterior.

2.2.3.6 Criterios de rotura. Comportamiento ante solicitaciones combinadas

Los procedimientos de diseño tienden a simplificar los estados multiaxiales sustituyéndolos por estados aproximados uniaxiales, pero la simplificación no es adecuada en el caso de materiales ortotrópicos como la madera, dado que uno de sus modos de rotura habituales es la tracción perpendicular a la fibra. No es el único inconveniente al analizar la rotura de la madera: sus propiedades resistentes se obtienen a partir de especímenes libres de defectos, que raramente se dan en los casos reales, y las teorías de rotura aplicadas se derivan de las desarrolladas para materiales compuestos, donde no es habitual que existan fallos. Además, las resistencias a tracción y compresión no son iguales. En este apartado, se pretende revisar y comparar algunos de los criterios de rotura más comúnmente utilizados.

Los más empleados tienen forma cuadrática. Para su definición, se requieren las siguientes resistencias uniaxiales del material: compresión ($f_{c,0,d}$) y tracción ($f_{t,0,d}$) longitudinales, compresión ($f_{c,90,d}$) y tracción ($f_{t,90,d}$) transversales, y cortante ($f_{v,d}$). La literatura científica sobre madera es prolija acerca de estados uniaxiales de tensión, pero no lo es tanto en el caso de estados multiaxiales.

En las tareas preliminares de diseño, es importante disponer de modelos adecuados para la predicción de las tensiones de rotura en presencia de tensiones normales y tangenciales. Para esta fase, además, el análisis debería requerir un número mínimo de datos, obtenidos preferentemente a partir de ensayos sencillos o que resultaran fácilmente accesibles al diseñador.

Se considera que la madera, cuando está sometida a bajos niveles de tensiones, tiene un comportamiento elástico lineal ortótropo descrito mediante la ley de Hooke, que relaciona las tensiones ($\sigma_L, \sigma_R, \sigma_T, \tau_{LR}, \tau_{LT}, \tau_{RT}$) con las deformaciones ($\varepsilon_L, \varepsilon_R, \varepsilon_T, \gamma_{LR}, \gamma_{LT}, \gamma_{RT}$), según las direcciones longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T) a las fibras, representadas en la Figura 2-3 y la Figura 2-4.

$$\begin{aligned} \varepsilon_L &= \frac{\sigma_L}{E_L} - \frac{\nu_{RL} \cdot \sigma_R}{E_R} - \frac{\nu_{TL} \cdot \sigma_T}{E_T} & \gamma_{LR} &= \frac{\tau_{LR}}{G_{LR}} \\ \varepsilon_R &= \frac{\sigma_R}{E_R} - \frac{\nu_{LT} \cdot \sigma_L}{E_L} - \frac{\nu_{TR} \cdot \sigma_T}{E_T} & \gamma_{LT} &= \frac{\tau_{LT}}{G_{LT}} \\ \varepsilon_T &= \frac{\sigma_T}{E_T} - \frac{\nu_{LT} \cdot \sigma_L}{E_L} - \frac{\nu_{RT} \cdot \sigma_R}{E_R} & \gamma_{RT} &= \frac{\tau_{RT}}{G_{RT}} \end{aligned}$$

Ecuación 2-1

Puede expresarse en versión matricial, mediante la Ecuación 2-2.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{RT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{LR} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{RT} \end{pmatrix} \Leftrightarrow [\varepsilon^e] = [C] \cdot [\sigma]$$

Ecuación 2-2

Despejando las tensiones de la anterior expresión se puede llegar a la Ecuación 2-3.

$$\begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{LR} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{RT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_L \cdot (1 - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR}) \cdot \psi & E_L \cdot (\nu_{RL} - \nu_{TL} \cdot \nu_{RT}) \cdot \psi & E_T \cdot (\nu_{LT} - \nu_{LR} \cdot \nu_{TR}) \cdot \psi & 0 & 0 & 0 \\ E_L \cdot (\nu_{RL} - \nu_{TL} \cdot \nu_{RT}) \cdot \psi & E_R \cdot (1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL}) \cdot \psi & E_R \cdot (\nu_{TR} - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL}) \cdot \psi & 0 & 0 & 0 \\ E_T \cdot (\nu_{LT} - \nu_{LR} \cdot \nu_{TR}) \cdot \psi & E_R \cdot (\nu_{TR} - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL}) \cdot \psi & E_T \cdot (1 - \nu_{LR} \cdot \nu_{RL}) \cdot \psi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{LR} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{RT} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{RT} \end{pmatrix} \Leftrightarrow [\sigma] = [D] \cdot [\varepsilon^e]$$

Ecuación 2-3

En la ley de Hooke aparecen los siguientes doce coeficientes que definen el comportamiento ortótropo del material (Argüelles et al., 2003):

- E_L, E_R, E_T módulos de elasticidad longitudinales.
- G_{LR}, G_{LT}, G_{TR} módulos de elasticidad transversales.
- $\nu_{TL}, \nu_{LT}, \nu_{RT}, \nu_{TR}, \nu_{RL}, \nu_{LR}$ coeficientes de Poisson.
- ψ factor de relación definido por la Ecuación 2-6:

$$\psi = \frac{1}{1 - \nu_{LR} \cdot \nu_{RL} - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR} - \nu_{TL} \cdot \nu_{LT} - 2 \cdot \nu_{RL} \cdot \nu_{TR} \cdot \nu_{LT}}$$

Ecuación 2-4

A las seis relaciones que se obtienen de la Ecuación 2-2, hay que sumar las tres siguientes, que relacionan coeficientes de Poisson con módulos de elasticidad según la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Relación entre coeficientes de Poisson y módulos de elasticidad.

$\frac{\nu_{TR}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}$	$\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}$	$\frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_L}$
---	---	---

En los casos en que los módulos de elasticidad y los coeficientes de Poisson no estén suficientemente determinados mediante los correspondientes ensayos, es posible utilizar las relaciones de la Tabla 2-3 y la Tabla 2-4 en las direcciones R y T. De esta manera, el número de constantes independientes queda reducido a cinco.

Tabla 2-3. Aproximación de las constantes elásticas para madera aserrada, según norma [(DB SE M, 2009) Tabla D.2].

$E_{0,g,medio} = E_L$	$E_{90,g,medio} = E_R = E_T$	$G_{g,medio} = G_{LR} = G_{LT}$
-----------------------	------------------------------	---------------------------------

Por lo tanto, un punto de vista práctico lleva a considerar que el comportamiento es el mismo en todas las direcciones del plano perpendicular a las fibras (sólido isotrópico transversal). Se deben cumplir entonces 7 relaciones entre las 12 constantes elásticas, según la Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Relación entre constantes elásticas.

$E_R = E_T$		$G_{LR} = G_{LT}$	
$\nu_{LR} = \nu_{LT}$	$\nu_{RL} = \nu_{TL}$	$\nu_{RT} = \nu_{TR}$	
$\frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_T}$		$G_{RT} = \frac{E_T}{2 \cdot (1 + \nu_{RT})}$	

Los valores de las constantes elásticas son característicos de la especie de procedencia de la madera y se obtienen mediante ensayos realizados para caracterizar el material en cada una de sus direcciones principales. No obstante, algunas referencias (Argüelles et al., 2003) y (Wood Handbook, USDA. Forest Service, 1999) incluyen relaciones aproximadas entre las constantes, que permiten obtenerlas todas a partir de E_L (Tabla 2-5) y valores para coeficientes de Poisson (Tabla 2-6).

Tabla 2-5. Relaciones aproximadas entre los módulos elásticos de madera de coníferas (Argüelles et al., 2003).

Tipo de madera	E_L/E_R	E_R/E_T	E_L/E_T	E_L/G_{TL}	E_L/G_{LR}	G_{LR}/G_{RT}	G_{TL}/G_{RT}
Coníferas	13	1,6	21	17,25	14,7	10,3	8,9
Fronosas	8	1,7	13,5	-	-	3,4	2,6

Tabla 2-6. Valores aproximados de los coeficientes de Poisson (ν) en madera de coníferas (Argüelles et al., 2003).

Tipo de madera	ν_{RT}	ν_{LT}	ν_{LR}	ν_{TR}	ν_{RL}	ν_{TL}
Coníferas	0,51	0,43	0,39	0,31	0,03	0,02
Fronosas	0,67	0,46	0,39	0,38	0,048	0,033

Se pueden encontrar distintos criterios para definir ejes, tensiones y deformaciones según se indica en la Tabla 2-7. A lo largo del trabajo se mantendrá de forma general el criterio con direcciones longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T) a las fibras porque facilita la interpretación sobre como está colocada la madera. Sin embargo, existen criterios como la notación vectorial de Voigt, donde tensiones y deformaciones se definen con σ_i y ϵ_i respectivamente, donde "i" toma valores desde 1 hasta 6, que facilitan enormemente el tratamiento numérico.

Tabla 2-7. Correlación entre criterios para ejes, tensiones y deformaciones.

Ejes	Tensiones		Deformaciones	
L = x = 1	$\sigma_L = \sigma_x = \sigma_{11} = \sigma_1$	$\tau_{LR} = \tau_{xy} = \sigma_{12} = \sigma_4$	$\epsilon_L = \epsilon_x = \epsilon_{11} = \epsilon_1$	$\gamma_{LR} = \gamma_{xy} = \epsilon_{12} = \epsilon_4$
R = y = 2	$\sigma_R = \sigma_y = \sigma_{22} = \sigma_2$	$\tau_{LT} = \tau_{xz} = \sigma_{13} = \sigma_5$	$\epsilon_R = \epsilon_y = \epsilon_{22} = \epsilon_2$	$\gamma_{LT} = \gamma_{xz} = \epsilon_{13} = \epsilon_5$
T = z = 3	$\sigma_T = \sigma_z = \sigma_{33} = \sigma_3$	$\tau_{RT} = \tau_{yz} = \sigma_{23} = \sigma_6$	$\epsilon_T = \epsilon_z = \epsilon_{33} = \epsilon_3$	$\gamma_{RT} = \gamma_{yz} = \epsilon_{23} = \epsilon_6$

Gran parte de los criterios de fallo para materiales anisotrópicos son modificaciones basadas en los criterios definidos para materiales isotrópicos (Cabrero et al., 2009). A continuación se recopilan las principales teorías aplicables a la madera. Para ello se contemplan las sollicitaciones en piezas de sección constante de madera maciza, laminada y productos estructurales derivados de la madera, con la dirección de las fibras sensiblemente paralela a su eje axial. Se supone que las tensiones se orientan solamente según los ejes principales (Figura 2-15).

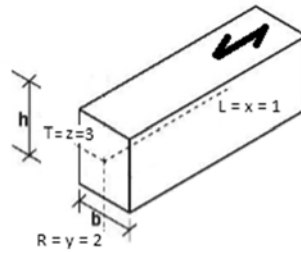


Figura 2-15. Ejes y dirección de la fibra en la pieza.

2.2.3.6.1 Criterios de fallo lineales

Uno de los criterios de rotura más simples se describe con interacción lineal (Aicher et al., 2001) y se expresa según la Ecuación 2-5 para el caso de tensión biaxial plana.

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}} + \frac{\tau_{t,d}}{f_{v,d}} = 1$$

Ecuación 2-5

Siendo:

- $\sigma_{t,0,d}$ tensión de cálculo a tracción paralela a la fibra.
- $f_{t,0,d}$ resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra.
- $\sigma_{t,90,d}$ tensión de cálculo a tracción perpendicular a la fibra.
- $f_{t,90,d}$ resistencia de cálculo a tracción perpendicular a la fibra.
- $\tau_{t,0,d}$ tensión de cálculo a cortante.
- $f_{v,d}$ resistencia de cálculo a cortante (corte paralelo o rodadura). La resistencia a cortante por rodadura podrá considerarse igual al doble de la resistencia a tracción perpendicular a la fibra (DB SE M, 2009), según la Figura 2-16.

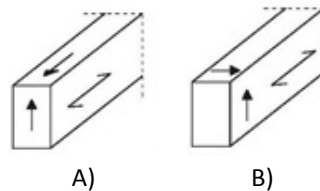


Figura 2-16. Tensiones de cortadura. A) Corte paralelo. B) Rodadura.

2.2.3.6.2 Criterios de fallo cuadráticos

En general, los criterios de rotura son polinomios cuadráticos. Uno de los más sencillos corresponde a una envolvente elipsoidal (Aicher et al., 2001), según la Ecuación 2-6. Representa un caso particular de una cuadrática más general, y es aplicable al caso en el que las resistencias a tracción y compresión tengan el mismo valor. No introduce ninguna interacción entre las tensiones normales $\sigma_{t,0,d}$ y $\sigma_{t,90,d}$.

$$\left(\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{t,d}}{f_{v,d}}\right)^2 = 1$$

Ecuación 2-6

Tsai-Hill

Generalizando en el criterio de la energía de distorsión de Hencky-Von Mises (1928), que asumía un comportamiento isótropo, Tsai-Hill (1950) desarrollaron la teoría materializada en la Ecuación 2-7, que considera que el material ortótropo tiene igual resistencia a tracción y a compresión. Esta teoría incluye la interacción entre tensiones, y por tanto los modos combinados de rotura. Posteriormente, Azzi y Tsai (1965) adaptaron la teoría de Tsai-Hill para materiales compuestos. Estos modelos han sido utilizados en simulaciones numéricas (Zhou & Guan, 2011).

$$\left(\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}}\right)^2 - \frac{\sigma_{t,0,d} \cdot \sigma_{t,90,d}}{f_{t,0,d}^2} + \left(\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{t,d}}{f_{v,d}}\right)^2 = 1$$

Ecuación 2-7

Autores como Azzi y Tsai (1965) suponen las resistencias $f_{t,90,d}$ y $f_{v,d}$ iguales en ejes perpendiculares a la dirección longitudinal, porque se trata como una modelización de materiales compuestos. Esta simplificación es adecuada en el caso de la madera, al identificarse con las direcciones radial y tangencial. También considera que las resistencias a tracción y compresión para cada eje tienen el mismo valor ($|f_{t,0,d}| = |f_{c,0,d}|$ y $|f_{c,90,d}| = |f_{t,90,d}|$). Esta igualdad no se cumple en la madera, que es corregida en procedimientos como el apuntado por Rowlands (1985) al tomar la resistencia correspondiente de tracción o compresión. Con ello, el criterio se divide en cuatro ecuaciones diferentes para cada uno de los cuadrantes del espacio de tensiones. Se incluye la posibilidad de interacción entre los modos de rotura, al contrario del modelo lineal o cuadrático. En esta interacción, la cuantía está fijada a priori por la teoría, y se define según las resistencias uniaxiales.

Norris

La teoría de Norris (1950) considera que la rotura en madera sometida a tensión plana ocurre si se cumple la Ecuación 2-8 o la Ecuación 2-9.

$$\left(\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}}\right)^2 - \frac{\sigma_{t,0,d} \cdot \sigma_{t,90,d}}{f_{t,0,d} \cdot f_{t,90,d}} + \left(\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{t,d}}{f_{v,d}}\right)^2 = 1$$

Ecuación 2-8

$$\left(\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}}\right)^2 = 1 \quad \text{ó} \quad \left(\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}}\right)^2 = 1$$

Ecuación 2-9

La Ecuación 2-8 es similar a la Ecuación 2-7 en la mayoría de los criterios cuadráticos ortotrópicos. Aunque el modelo de Norris se ha empleado ocasionalmente para la madera, Van der Put (2005) indica que por lo general no es válido.

Tsai-Wu

Tsai y Wu Tsai (1971) desarrollaron un criterio de rotura según la Ecuación 2-10

$$f(\sigma) = F_i \cdot \sigma_i + F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j \quad \text{para } i, j = x, y, z$$

Ecuación 2-10

en la que F_i y F_{ij} responden a tensores de resistencia de segundo y cuarto orden. Los términos cuadráticos describen un elipsoide y son similares a los del modelo de Tsai-Hill (1965), expuestos en la Ecuación 2-7. En las condiciones de tensión plana, el criterio se expresa según la Ecuación 2-11.

$$\left(\frac{1}{f_{t,0,d}} - \frac{1}{f_{c,0,d}}\right) \cdot \sigma_{t,0,d} + \left(\frac{1}{f_{t,90,d}} - \frac{1}{f_{c,90,d}}\right) \cdot \sigma_{t,90,d} + \frac{1}{f_{t,0,d} \cdot f_{c,0,d}} \cdot \sigma_{t,0,d}^2 + \frac{1}{f_{t,90,d} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sigma_{t,90,d}^2 - 2 \cdot a_{xy} \cdot \sqrt{\frac{1}{f_{t,0,d} \cdot f_{c,0,d}} \cdot \frac{1}{f_{t,90,d} \cdot f_{c,90,d}}} + \left(\frac{\tau_{t,d}}{f_{v,d}}\right)^2 = 1$$

Ecuación 2-11

La Ecuación 2-11 permite contemplar diferentes valores para las resistencias a tracción ($f_{t,0,d}$, $f_{t,90,d}$) y a compresión ($f_{c,0,d}$, $f_{c,90,d}$). Aunque se presenta un problema con el factor de interacción (a_{xy}), ya que las resistencias uniaxiales no consienten su determinación y es necesario el uso de ensayos experimentales. Por otro lado, debe cumplir la condición de estabilidad ($-1 \leq a_{xy} \leq 1$), para que la envolvente del criterio sea cerrada.

En los modelos anteriores (lineales o cuadráticos), el factor de interacción (a_{xy}) o bien no estaba presente, o su valor se definía a partir de los valores resistentes uniaxiales según Norris (1950) y Tsai-Hill (1965), mientras que en el modelo de Tsai-Wu, reflejado en la Ecuación 2-11, el factor ha de ser determinado, lo cual no resulta sencillo. Tsai propone tomar una aproximación ($a_{xy} = -0.5$), de forma semejante al criterio de Von Mises generalizado. A partir de las ecuaciones de ajuste de segundo grado aplicadas a los resultados experimentales de Eberhardsteiner (2002), se puede evaluar con el valor $a_{xy} = 0,04$, según indican autores como (Cabrerero et al., 2009).

Von Mises

A partir de la ecuación de Von Mises (1928), Tsai (1988) y Kim (1995) sugirieron una modificación utilizando el modelo expresado en la Ecuación 2-12. Otros autores, como Norris (1950), plantearon expresiones similares, con la diferencia del factor en el término de cortante, que está multiplicado por 3.

$$\left(\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}}\right)^2 - \frac{\sigma_{t,0,d} \cdot \sigma_{t,90,d}}{f_{t,0,d} \cdot f_{t,90,d}} + \left(\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{t,d}}{f_{v,d}}\right)^2 = 1$$

Ecuación 2-12

Van der Put

Basándose en la teoría de tensores, Van der Put (2005) propuso un polinomio general, según la Ecuación 2-13.

$$\left(\frac{1}{f_{t,0,d}} - \frac{1}{f_{c,0,d}}\right) \cdot \sigma_{t,0,d} + \left(\frac{1}{f_{t,90,d}} - \frac{1}{f_{c,90,d}}\right) \cdot \sigma_{t,90,d} + \frac{1}{f_{t,0,d} \cdot f_{c,0,d}} \cdot \sigma_{t,0,d}^2 + \frac{1}{f_{t,90,d} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sigma_{t,90,d}^2 + \left(\frac{\tau_{t,d}}{f_{v,d}}\right)^2 = 1$$

Ecuación 2-13

La expresión de la Ecuación 2-13 es parecida a la Ecuación 2-11 del modelo de Tsai-Wu (Tsai, 1992). Ambos modelos están basados en la teoría de tensores, con la diferencia de que este modelo de Van der Put toma el factor de interacción (a_{xy}) como cero.

La normativa vigente (DB SE M, 2009), en su Apartado 6.2 *Solicitaciones combinadas en sección constante*, considera que para tensión inclinada de rotura se aplica el modelo lineal. La fórmula de la resistencia a tensiones inclinadas se expresa en la Ecuación 2-14 y resulta similar al criterio de Hankinson (1921).

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,90,d}}{\frac{f_{t,0,d}}{f_{t,90,d}} \cdot \text{sen}^2(\alpha) + \text{cos}^2(\alpha)}$$

Ecuación 2-14

En definitiva, se nos presentan modelos de rotura muy diversos. La mayoría de ellos se basan en una formulación cuadrática, y su diferencia principal se relaciona con el factor de interacción. El modelo lineal, en general resulta un buen modelo (Cabrerero et al., 2009). La fórmula de Hankinson (1921), correspondiente a un modelo lineal con el

término de cortante omitido, tal y como se adopta en la Ecuación 2-14, resulta el mejor modelo para compresión inclinada. Tradicionalmente, este modelo ha sido aplicado para este tipo de carga. Los modelos cuadráticos proporcionan resultados comparables al incluir el término de tensión cortante en su formulación.

Según los trabajos de comparación (Cabrero et al., 2009), los modelos cuadráticos en los que el factor de interacción es cero (modelo propuesto por Van der Put, 2005), o muy cercano a cero, permiten realizar predicciones más acertadas para madera libre de defectos, por lo que resulta razonable sugerir la omisión del factor de interacción en este caso. Pero en el caso de tracción inclinada, ninguno de los modelos resulta adecuado cuando se omite la tensión cortante. Los errores cometidos son superiores al 38 %. Al tener en cuenta el cortante, el sistema lineal obtiene el mejor resultado, con un error ligeramente superior al 10 %. El resto de los modelos cometen errores superiores al 35 % (con excepción del modelo de Von Mises, cuyo error es del 16 %). Así pues, no son adecuados para este tipo de tensión. Se obtiene distinto rango de exactitud para los casos de compresión y tracción. Por tanto, debe considerarse si es adecuado emplear el mismo criterio en ambos casos. Podría ser apropiado omitir el término de tensión cortante combinado con la tensión de compresión, pero no con la tensión de tracción. En consecuencia, los modelos cuadráticos resultan adecuados para compresión pero no lo son tanto en tracción.

2.3 Clases resistentes y valores característicos de la madera estructural

Desde un punto de vista del comportamiento mecánico, las normas europeas (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) incluyen las propiedades para distintos tipos de maderas de uso estructural, tanto de coníferas y chopo como de frondosas, con diferentes magnitudes relacionadas con la resistencia y rigidez. Debido a la variabilidad de los tipos y calidades de las maderas utilizables, a la diversidad de sus aplicaciones y a la capacidad de producción de la industria maderera en cada región, se originan múltiples combinaciones de especies y calidades, con propiedades mecánicas diferentes, lo que complica el cálculo y la especificación de las estructuras de madera, como indica la norma (UNE-EN 338, 2010). Para facilitar el cálculo, a las diferentes especies se les asigna una clase resistente según las normas de los distintos países (Tabla 2-9). La Tabla 2-8 indica el nombre botánico de la especie asociado a su país de procedencia.

Tabla 2-8. Correlación entre distintas especies [según (DB SE M, 2009) Tabla C.3].

Especie arbórea	Nombre botánico	Procedencia
Abeto	<i>Abies alba. Mill.</i>	Austria Europa: C, N, E y NE Francia Holanda Reino Unido
Chopo	<i>Populus sp.</i>	España
Falso abeto	<i>Picea abies Karst.</i>	Francia Europa: C,N,E y NE
Iroko	<i>Milicia excelsa y regia</i>	África
Jarrah	<i>Eucalyptus marginata sm.</i>	Australia
Pino insignis	<i>Pinus radiata D. Don.</i>	España
Pino laricio	<i>Pinus nigra Arnold</i>	España
Pino Oregón	<i>Pseudotsuga menziesii Fr.</i>	Canadá EEUU Francia
Pino pinaster	<i>Pinus pinaster Ait.</i>	España Francia
Pino silvestre	<i>Pinus sylvestris L.</i>	Austria España Europa: C, N,E y NE Holanda Reino Unido
Teca	<i>Tectona grandis L.</i>	África Asia SE

Tabla 2-9. Asignación de clase resistente para diferentes especies arbóreas y procedencias, según normas de clasificación [según (DB SE M, 2009) Tabla C.1].

Norma	Especie (Procedencia)	Clase resistente									
		C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	D35	D40
UNE 56.544	Pino silvestre (España)	-	-	ME-2	MEG	-	ME1	-	-	-	-
	Pino pinaster (España)	-	-	ME-2	-	ME-1	-	-	-	-	-
	Pino insignis (España)	-	-	ME-2	-	ME-1	-	-	-	-	-
	Pino laricio (España)	-	-	ME-2	MEG	-	-	ME1	-	-	-
NF B 52.001-4	Abeto (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	ST-I	-	-	-
	Falso abeto (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	ST-I	-	-	-
	Pino Oregón (Francia)	-	-	-	ST-III	ST-II	-	-	-	-	-
	Pino pinaster (Francia)	-	-	ST-III	-	ST-II	-	-	-	-	-
DIN 4074	Abeto (Europa: Central, N y E)	-	S7 -	-	-	S10	-	S13	-	-	-
	Falso abeto (Europa: Central, N y E)	-	S7	-	-	S10	-	S13	-	-	-
	Pino silvestre (Europa: Central, N y E)	-	S7	-	-	S10	-	S13	-	-	-
INSTA 142	Abeto (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	-
	Falso abeto (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	-
	Pino silvestre (Europa: N y NE)	T0	-	T1	-	T2	-	T3	-	-	-
BS 4978	Abeto (Reino Unido)	-	GS	-	-	SS	-	-	-	-	-
	Pino silvestre (Reino Unido).	-	GS	-	-	SS	-	-	-	-	-
BS 5756	Iroko (África)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	HS
	Jarrah (Australia)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	HS
	Teca (África y Asia SE)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	HS

La designación del sistema de clases resistentes utiliza las letras “C” para especies de coníferas y chopo, y “D” para frondosas, seguida en cada caso del valor característico de la correspondiente resistencia a flexión (en N/mm²), muestra los valores característicos, según la Tabla 2-10 y la Tabla 2-11. Reagrupa calidades y especies que tengan niveles de resistencia similares, haciéndolas intercambiables o equivalentes. Esto presenta una serie de ventajas:

- Permite incorporar nuevos tipos de madera al sistema con especies y calidades complementarias en cualquier momento, sin que ello afecte a las especificaciones de las existentes.
- Es suficiente, de cara al cálculo, tomar los valores característicos resistentes de una clase en concreto y luego especificar dicha clase recurriendo a la especie en particular que esté disponible.

- Permite al conjunto de suministradores y almacenistas ofrecer productos que satisfagan mejor las especificaciones de lo que sería posible si se remite a especies o calidades de modo concreto.

Tabla 2-10. Madera aserrada. Especies de coníferas y chopo. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente, [según (DB SE M, 2009) Tabla E.1]. Nota: Semejante a (UNE-EN 338, 2010) (con ligeras modificaciones frente a la primera cita y la presente tabla).

Propiedades		Clase resistente											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistencia característica, en N/mm ²													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	22	22	23	25	26	27	29
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Cortante	$f_{v,k}$	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4	4	4	4	4	4
Rigidez, en kN/mm ²													
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Módulo de elasticidad paralelo 5º-percentil	$E_{0,k}$	4,7	5,4	6	6,4	6,7	7,4	7,7	8	8,7	9,4	10	10,7
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,23	0,27	0,3	0,32	0,33	0,37	0,38	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53
Módulo transversal medio	G_{medio}	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1
Densidad, en kg/m ³													
Densidad característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidad media	ρ_{medio}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabla 2-11. Especies frondosas. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente [según (DB SE M, 2009) Tabla E.2]. Nota: Semejante a (UNE-EN 338, 2010) (con ligeras modificaciones frente a la primera cita y la presente tabla).

Propiedades		Clase resistente							
		D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Resistencia característica), en N/mm ²									
Flexión	$f_{m,k}$	18	24	30	35	40	50	60	70
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	18	21	23	25	26	29	32	34
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	7,5	7,8	8	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
Cortante	$f_{v,k}$	3,4	4	4	4	4	4	4,5	5
Rigidez, en kN/mm ²									
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	10	11	12	12	13	14	17	20
Módulo de elasticidad paralelo 5º-percentil	$E_{0,k}$	8,4	9,2	10,1	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,67	0,73	0,8	0,8	0,86	0,93	1,13	1,33
Módulo transversal medio	G_{medio}	0,63	0,69	0,75	75	0,81	0,88	1,06	1,25
Densidad, en kg/m ³									
Densidad característica	ρ_k	500	520	530	540	550	620	700	900
Densidad media	ρ_{medio}	610	630	640	650	660	750	840	1080

Esta tabla amplía las clases D18 y D24 frente a la norma (UNE-EN 338, 2010), que no las contempla.

Las clases resistentes para madera laminada encolada establecen también un sistema de clases resistentes en laminado horizontal, constituido como mínimo por cuatro láminas. Se definen varias clases resistentes y se dan sus resistencias características, valores de rigidez y densidades según la notación GL (Glued Laminated), a la que se añade un número característico de la resistencia a flexión (en N/mm²) y otra letra en minúscula “h” si el laminado es homogéneo y “c” si es combinado con láminas externas de una clase resistente superior. Esta norma se limita por el momento a la madera laminada encolada de coníferas (Tabla 2-12 y Tabla 2-13).

Tabla 2-12. Madera laminada encolada homogénea. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente [según (DB SE M, 2009) Tabla E.3] y (UNE-EN 1194, 1999).

Propiedades		Clase resistente			
		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
Resistencia característica, en N/mm ²					
Flexión	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
Tracción perpendicular	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31
Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3	3,3	3,6
Cortante	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Rigidez, en kN/mm ²					
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,medio}$	11,6	12,6	13,7	14,7
Módulo de elasticidad paralelo 5º-percentil	$E_{0,g,k}$	9,4	10,2	11,1	11,9
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,g,medio}$	0,39	0,42	0,46	0,49
Módulo transversal medio	$G_{g,medio}$	0,72	0,78	0,85	0,91
Densidad, en kg/m ³					
Densidad característica	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

Tabla 2-13. Madera laminada encolada combinada. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente [según (DB SE M, 2009) Tabla E.4] y (UNE-EN 1194, 1999).

Propiedades		Clase resistente			
		GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Resistencia característica, en N/mm ²					
Flexión	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	14	16,5	19,5	22,5
Tracción perpendicular	$f_{t,90,g,k}$	0,35	0,4	0,45	0,5
Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	21	24	26,5	29
Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,4	2,7	3	3,3
Cortante	$f_{v,g,k}$	2,2	2,7	3,2	3,8
Rigidez, en kN/mm ²					
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,medio}$	11,6	12,6	13,7	14,7
Módulo de elasticidad paralelo 5º-percentil	$E_{0,g,k}$	9,4	10,2	11,1	11,9
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,g,medio}$	0,32	0,39	0,42	0,46
Módulo transversal medio	$G_{g,medio}$	0,59	0,72	0,78	0,85
Densidad, en kg/m ³					
Densidad característica	$\rho_{g,k}$	350	380	410	430

Las resistencias indicadas son para piezas de altura (h) de 600 mm o más, y un espesor (b) de 150 mm o mayor. Si fueran menores, deben corregirse con el factor de tamaño los resultados de los ensayos introduciendo factores de corrección según la Ecuación 2-15 extraída de la norma (UNE-EN 1194, 1999).

$$k_{\text{tamaño}} = \left(\frac{b}{150}\right)^{0,05} \cdot \left(\frac{h}{600}\right)^{0,1}$$

Ecuación 2-15

Una vez definidas las características básicas, se pueden definir las distintas tensiones admisibles a partir de las características de la unión. La resistencia al aplastamiento queda definida por la Ecuación 2-16.

$$f_{h,k} = \frac{F_{\text{max}}}{t \cdot d}$$

Ecuación 2-16

Siendo:

- d diámetro del elemento mecánico de unión.
- t espesor de la probeta.
- $f_{h,k}$ resistencia característica al aplastamiento en uniones con elementos mecánicos de fijación.

2.4 Variables que afectan a las propiedades mecánicas

2.4.1 Calidad de la madera

La calidad es el principal factor que se ha de tener en cuenta. Ésta se mide en función del número y tipo de defectos que presenta el material, y a partir del cual se la clasifica teniendo en cuenta las normas desarrolladas al efecto. Un exponente de dichas normas es la “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural” (UNE-56544, 2011). En esta norma se establecen dos calidades para piezas con grosor menor o igual a 70 mm, denominadas ME-1 y ME-2 (las siglas ME significan Madera Estructural), y para las las piezas con espesor mayor que 70 mm, la norma establece una única calidad denominada MEG (la sigla G significa Gruesa escuadría). Teniendo presente la clasificación visual, los principales tipos de defectos que aparecen en la madera son los que se indican en el apartado siguiente.

2.4.2 Singularidades ligadas a la anatomía de la madera

Nudos. De ellos se distinguen dos tipos:

- Nudos vivos. Donde la continuidad de crecimiento entre el tronco y la rama viva origina un nudo firme o nudo vivo. Este nudo no se suelta durante el secado y uso. No presenta rasgos de deterioro ni de pudrición.
- Nudos muertos. Cuando muere una rama, se produce una discontinuidad entre este tejido y el que sigue creciendo alrededor. Los nudos muertos se desprenden con facilidad cuando la madera es aserrada.

Los que tengan diámetro inferior o igual a 10 mm pueden despreciarse, excepto los pasantes; también se desprecian los nudos superficiales de la cara interna más cercana a la médula.

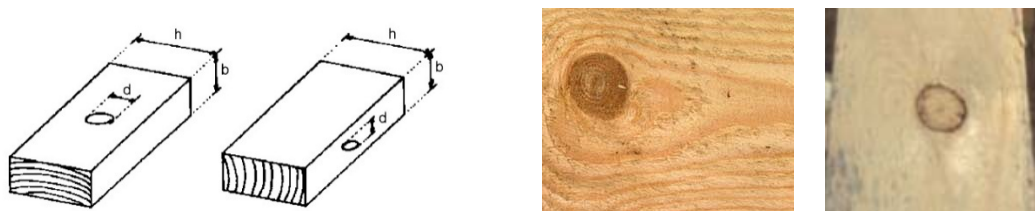


Figura 2-17. Nudo vivo y nudo muerto.

Fendas. Considera la separación de las fibras (raja o hendidura) en dirección longitudinal. Si son de secado, sólo se consideran si su longitud es mayor que un cuarto de la longitud de la pieza y un 1 m.

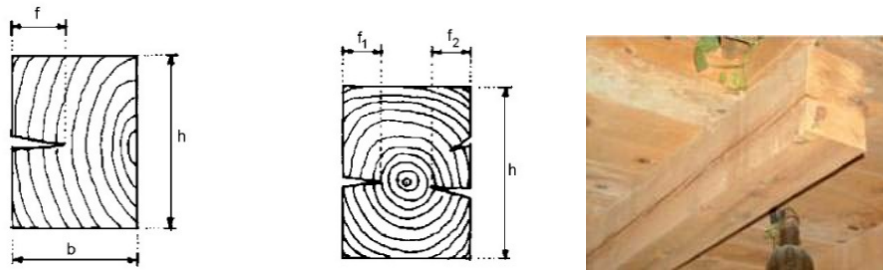


Figura 2-18. Fendas.

Desviación de la fibra. Trata la media respecto del eje longitudinal de la pieza. Esta desviación se mide sobre 1 m de longitud en la zona más desfavorable, ignorando la debida a proximidades de nudos.

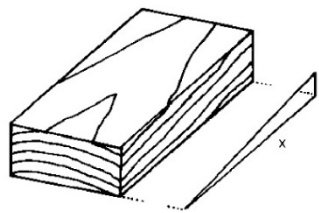


Figura 2-19. Desviación de la fibra.

Bolsas de resina. Son huecos llenos que se suelen localizar en el cámbium, sobre todo en algunas coníferas, abarcando la línea de un anillo. Se miden según su longitud (en mm) en la dirección paralela al eje de la pieza, y se admiten si su longitud es menor o igual que 1,5 veces la altura de la viga (h).



Figura 2-20. Bolsa de resina.

Acebolladuras. Se definen como la separación, total o parcial, entre dos anillos de crecimiento contiguos. Fácilmente reconocibles en la sección transversal, en general no se permiten.



Figura 2-21. Acebolladuras.

Madera de reacción y juvenil. Supone anillos de crecimiento anormalmente anchos. Es un problema que afecta a algunas especies de coníferas en los primeros anillos de crecimiento. Se caracteriza por presentar una estructura anatómica diferente a la de la madera "adulta". Tiene como consecuencia valores elevados de la contracción longitudinal, lo que deriva en curvaturas de cara y de canto. Se limita la posibilidad de estos defectos indirectamente, al analizar la presencia de médula y la anchura máxima de anillos de crecimiento.

Ancho máximo de anillos de crecimiento. En función de la calidad y el tipo de madera se permiten unas dimensiones de ancho u otras. Por ejemplo, para madera ME1 (ancho menor 70 mm) de pino silvestre, la anchura de anillo debe ser menor o igual a 4 mm.



Figura 2-22. Ancho de anillos de crecimiento.

2.4.2.1 Singularidades ligadas al aserrado de las piezas

Existen singularidades ligadas al aserrado de las piezas de madera que pueden afectar a la calidad resultante y deben evitar durante este proceso.

Gemas. Es la superficie redondeada original de un tronco, con o sin corteza, que se manifiesta sobre las aristas de la pieza de madera aserrada (Figura 2-23).

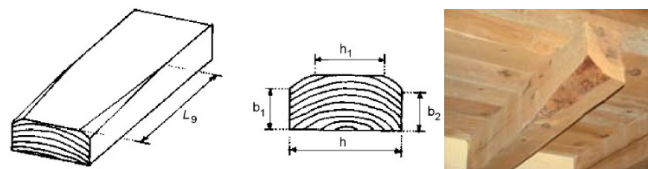


Figura 2-23. Defectos de la madera. Gemas.

Médula. Se trata de la zona situada en el interior del primer anillo de crecimiento, constituida fundamentalmente por tejido blando, motivo por el cual esta zona central puede modificar las propiedades resistentes de las piezas obtenidas y debe ser evitada.

2.4.2.2 Deformaciones de las piezas

Las deformaciones en las piezas de madera afectan a su calidad y a la composición en conjunto por lo que deben identificarse y establecer los valores límite a partir de los cuales la pieza debe ser rechazada.

Curvatura de cara y canto. Se medirán las cotas x e y mostradas en la Figura 2-24, con una deformación máxima en un tramo de 2 m de longitud y , si la longitud de la pieza es inferior a 2 m, entre los extremos de la misma.



Figura 2-24. Curvaturas de cara y canto.

Abarquillado. Es la deformación máxima sobre la anchura de la sección, como se indica en la Figura 2-25. El resultado se expresará en milímetros por cada 25 mm de anchura o como fracción de la anchura total de la cara.



Figura 2-25. Abarquillado.

Alabeo. Se evalúa como la deformación máxima de la superficie considerada sobre una longitud representativa de 2 m (Figura 2-26).

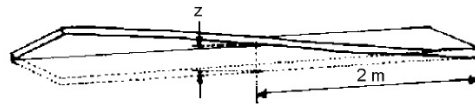


Figura 2-26. Alabeo.

La eliminación de la influencia de los defectos es un campo de avance para la aparición de nuevos productos en aplicaciones estructurales a base de madera, como son la madera laminada y la microlaminada. En estos productos, el efecto que pudieran tener los defectos queda reducido al espesor de la lámina en que aparezcan éstos, de manera que disminuyen sus consecuencias.

2.4.3 Alteraciones de tipo biológico

Las alteraciones de tipo biológico se pueden clasificar en tres grandes grupos.

Por hongos y bacterias, predominantemente relacionados con pudriciones (Figura 2-27):

- **Parda o cúbica:** Causada por hongos del tipo basidiomicetos que agreden sobre todo a la celulosa y, en etapas avanzadas fragilizan la madera, dándole un aspecto parecido al quemado. A nivel estructural es la más delicada, dado que el hongo se desplaza lejos de la zona visible.
- **Blanca:** Producida por hongos ascomicetos y "hongos imperfectos" que atacan predominantemente a la lignina y dan una textura suave a la madera, lo que provoca el desprendimiento de fibras individuales. Es un tipo de prutrefacción que también está relacionada con la bacteria *Erwinia carotovora*, que parasita especies vegetales de familias muy distintas.
- **Azul:** Provocada por hongos cromógenos, afecta a la madera madura y recién cortada, la cual queda debilitada ya que se alimenta de la albura. Puede ser introducida por insectos que fabrican galerías.
- **Roja:** Originada en hongos bacidiomicetos, que se caracteriza por el tono rojo que adquieren, especialmente las coníferas. El corazón en los árboles típicamente viejos se deseca, los anillos se desintegran y se descompone el corazón del árbol, quedando hueco.
- **Negra:** Suele darse en la madera procedente de las especies resinosas y es causada por ciertas bacterias que pudren la madera en forma de surco, en las bifurcaciones de los troncos.



Figura 2-27. Aspectos de distintos tipos de putrefacción.

Las esporas de los hongos requieren que la superficie de la madera tenga altos contenidos en humedad, con el fin de que germinen (Leicester, 2001). Además, los hongos necesitan que la humedad de la madera sea superior al punto de saturación de la fibra para establecer una esfera micelial viable. Por ello es de vital importancia preservar la madera de la exposición a la humedad y el agua, evitando así la pudrición parda o blanca de la madera. Se ha observado que, según la especie, las condiciones de crecimiento de los hongos suponen que, para temperaturas inferiores a 53 °C el hongo permanece en estado latente, mientras que a temperaturas por encima de los 53 °C el hongo muere en pocas horas.

Las tasas de crecimiento de los hongos son extremadamente lentas cuando el contenido de humedad de la madera está por debajo del punto de saturación de las fibras, siendo el límite más bajo de contenido de humedad al que se ha observado el crecimiento de hongos un 19 %, y el límite superior supone un contenido de humedad correspondiente a la condición de que el 80 % de las cavidades celulares de la madera estén llenas de agua. Otros parámetros que pueden afectar a la velocidad de desintegración son: las condiciones de pH, la presencia de nitrógeno y la ausencia de oxígeno.

Por plantas parásitas, como por ejemplo el muérdago (Figura 2-28), que crece sobre las ramas de diversos árboles, principalmente especies de hoja caduca y algunas variedades de pinos.



Figura 2-28. Muérdago parasitario.

Por insectos xilófagos. Entre los más relevantes: termitas (isópteros), escarabajos y carcomas (coleópteros), avispas, abejas y hormigas (himenópteros) tienden a provocar túneles y a menudo polvo o serrín (Figura 2-29).



Figura 2-29. Daños en la madera por efecto de xilófagos.

2.4.4 Alteraciones de tipo físico y químico

Luz ultravioleta. Derivada de la exposición al sol, que degrada la lignina cerca de la superficie de la madera. Típicamente hace oscurecer las maderas. Estos daños penetran solamente un poco debajo de la superficie. La madera es algo menos resistente, pero la baja profundidad del daño hace que influya poco sobre la resistencia, a menos que se retire el trozo de madera donde está el daño, reduciendo eventualmente las dimensiones de la pieza.

Corrosión por los subproductos metálicos. Frecuentemente integrados en la madera como consecuencia de complementos estructurales, los metales pueden dar lugar a degradaciones en algunas situaciones, particularmente en ambientes marinos, donde las celdas galvánicas de los metales y el agua salada que se forma aceleran la corrosión. La degradación comienza cuando la humedad en la madera reacciona con el hierro en un mecanismo de unión, deteriorando la pared celular de la madera. Dicho mecanismo se convierte en una pila electrolítica con un extremo ácido (ánodo) y otro alcalino (cátodo). La acidez del ánodo causa la hidrólisis de la celulosa y reduce seriamente la resistencia de la madera en la zona afectada. La madera atacada es a menudo oscura y se presenta suave al tacto. Por otro lado, el deterioro por corrosión suele estar ligado con la humedad y la aparición de hongos que, aunque no prosperan en la zona cercana (por la toxicidad de los iones del metal), puede continuar a una cierta distancia del mecanismo de unión. Este efecto aconseja el uso de clavijas galvanizadas, protegidas de la corrosión, o de materiales no metálicos.

Degradación química. En casos aislados, la presencia de ácidos o bases fuertes pueden causar daño sustancial a la madera. Las bases fuertes atacan la hemicelulosa y la lignina, dejando la madera de un color blanco descolorido. Suponen pérdidas de peso y resistencia.

2.4.5 Contenido de humedad

En la madera comercial apenas tiene efecto, pero en la libre de defectos, los ensayos demuestran una dependencia entre esta variable y las propiedades mecánicas. En general, en este segundo caso, y siempre que estemos por debajo del punto de equilibrio o saturación, un decremento de un 1 % en el contenido de humedad supone un incremento del orden del 5 % en la mayoría de sus propiedades mecánicas. Aunque se marcan correcciones más concretas en la determinación de valores característicos de las propiedades mecánicas; por ejemplo, para la resistencia a compresión paralela a la fibra, la corrección es del 3 % por cada variación del 1 % del contenido de humedad (UNE-EN 384, 2004).

2.4.6 Durabilidad de la madera y duración de la carga

En general, la madera no pierde capacidad resistiva con el tiempo, salvo por la acción del ataque de agentes bióticos o el aumento de fendas ante su exposición a la intemperie.

Se ha demostrado mediante ensayos que la resistencia de la madera ante un esfuerzo de larga duración es aproximadamente un 60 % del que se obtendría ante ese mismo esfuerzo en corta duración (5 minutos). En realidad, esta diferencia entre resistencia de larga y corta duración puede ser mayor en la madera comercial, y aún mayor cuanto menor sea la calidad de la madera (debido a la influencia de los defectos). En los años 50 se reflejó la relación entre resistencia y tiempo de duración de la carga, según la “Curva de Madison” (véase Figura 2-30). Para el caso de madera estructural y duración menor a 1 año, resultaba ser conservadora, mientras que para cargas de mayor duración, estaba en contra de la seguridad (Íñiguez, 2007).

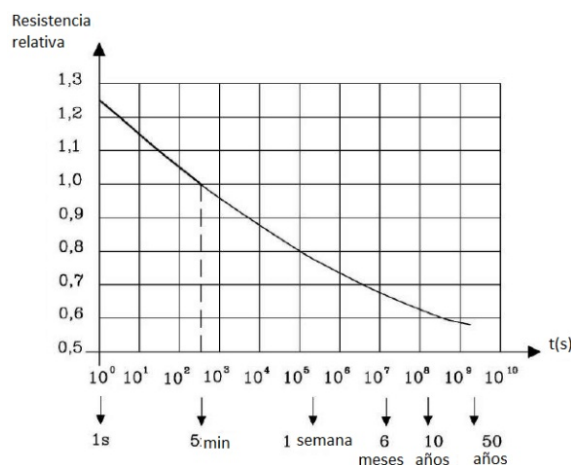


Figura 2-30. Influencia de la duración de la carga. Curva de Madison.

A la hora de plantear los coeficientes de minoración de carga de la madera, las diversas normas han tenido en cuenta esta circunstancia. La reducción es por tanto significativa, pero a la vez los coeficientes de seguridad sobre cargas variables tipo sismo o viento serán menores, porque al material le queda suficiente resistencia ante esfuerzos de cargas no permanentes.

2.4.7 Fatiga

La madera presenta un comportamiento ante cargas cíclicas mucho mejor que el acero o el hormigón. Sus fibras están entrelazadas y no forman cristalizaciones rígidas como ocurre con las aleaciones metálicas o las resinas sintéticas.

2.4.8 Distribución de carga

Gracias a la distribución transversal de la carga, en ciertos elementos estructurales formados por varias piezas iguales, separadas a una misma distancia y unidas transversalmente por una estructura secundaria, es posible aumentar su capacidad por un factor, denominado factor de inestabilidad (k_c), y al que le atribuye un valor de 1,1 (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). Ejemplos de estos elementos son las viguetas de forjado, las correas de cubiertas planas unidas por un entrevigado, o las cerchas unidas por tableros o correas.

2.4.9 Tamaño de la pieza

Cuanto mayor sea el volumen global de la pieza, menor es su tensión de rotura. La razón se justifica en la teoría del eslabón débil, por la cual la resistencia de la pieza está en función de la resistencia de su fibra más débil. Cuanto mayor sea el número de fibras, es más factible que existan algunas de ellas de baja resistencia, si se compara con la media del conjunto. Bajo esta hipótesis, en las diferentes normativas se aplican unas ecuaciones para determinar cómo varía la resistencia de una viga en función de su tamaño.

2.4.10 Temperatura

El efecto de esta variable es también despreciable, siempre que sus valores se encuentren en unas magnitudes normales dentro de las que se dan habitualmente en el ambiente (entre 0 y 50 °C).

2.4.11 Resistencia al fuego

Se debe tener presente la capacidad para mantener durante un periodo de tiempo determinado la resistencia frente al fuego. Así queda reflejado en normativa (DB SI, 2010), que indica las características de comportamiento:

- La capacidad portante de un elemento estructural (R) puede oscilar de R30 en viviendas hasta R120 en edificios de uso comercial o docente. El número que sigue a la letra “R” indica el tiempo en minutos durante el cual se mantiene estable el elemento.
- La integridad (E).
- El aislamiento térmico y función separadora (I).

Las clases de reacción al fuego para los materiales de construcción, con excepción de los suelos, son: A1, A2, B, C, D, E y F, de mejor a peor comportamiento contra el fuego. Estas clases representan un índice de la inflamabilidad del material y su contribución al fuego. En algunos casos, van acompañadas de otros dos parámetros con información sobre la producción de humo (de mayor a menor velocidad de propagación y producción total: s1, s2 y s3) o la caída de partículas o gotas inflamadas: d0, d1 y d2. En particular, para la madera se describe de forma detallada en lo referente a profundidad, tiempo y velocidad de carbonización en el anejo SI-E “Resistencia al fuego de las estructuras de madera” (DB SI, 2010). El tratamiento de protección de la madera reduce la combustibilidad de la misma, permitiendo obtener reacciones al fuego de clase B y C, dependiendo del tipo de especie y de la forma de tratamiento (en profundidad o superficial).

2.5 Elementos de unión

Los elementos de unión pueden constituir puntos débiles que es necesario estudiar al detalle, dado que el agotamiento de una estructura se puede presentar por la falta de resistencia de una cualquiera de estas uniones. Las uniones entre piezas de madera pueden clasificarse atendiendo a diversos criterios, como se puede ver en la Figura 2-31, que se describen a continuación.

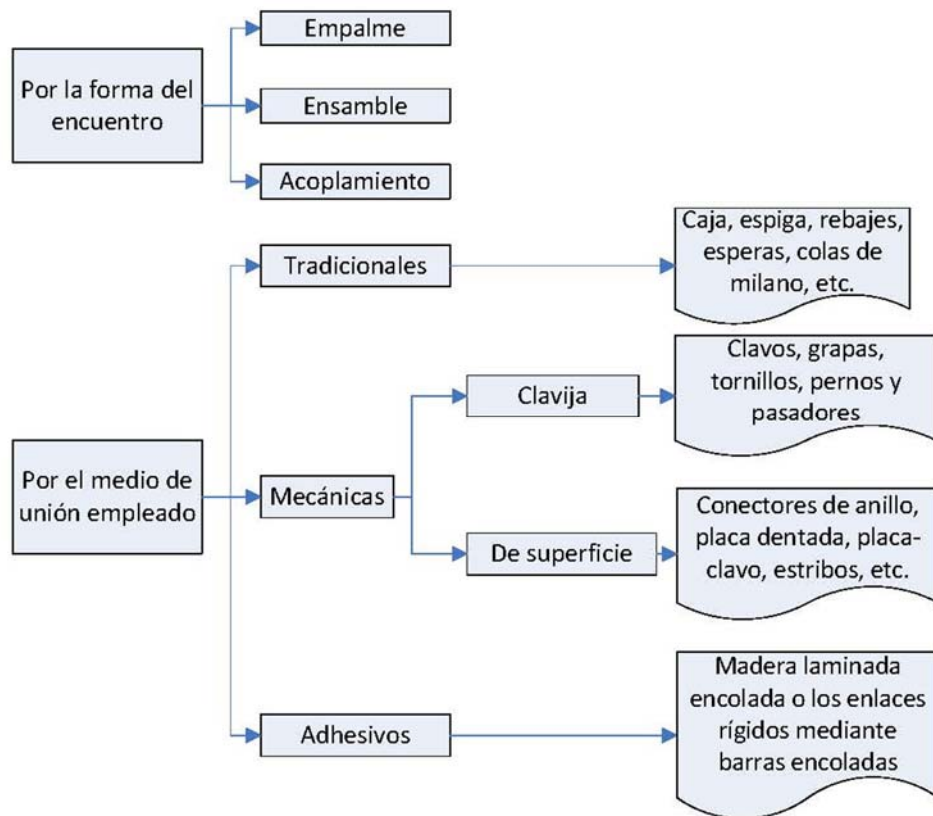


Figura 2-31. Esquema de distintos tipos de uniones.

2.5.1 Por la forma del encuentro

Se denominan empalmes cuando las piezas se enlazan por sus testas, ensambles cuando las piezas se cortan formando un determinado ángulo, y acoplamientos cuando las piezas se superponen por sus caras, según se muestra en la Figura 2-32.

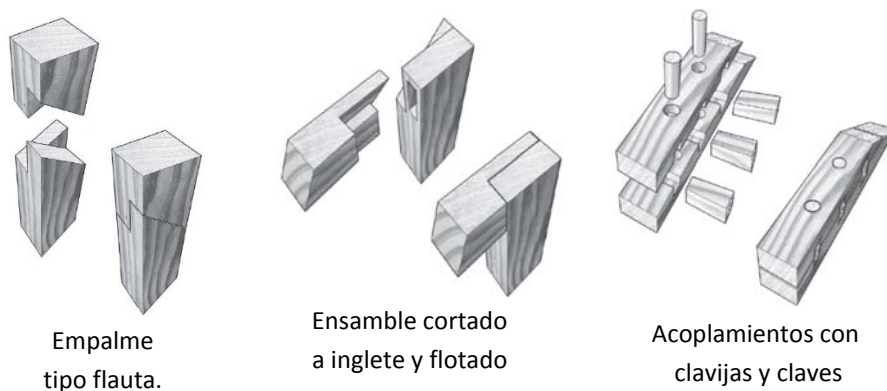
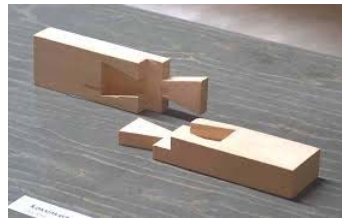


Figura 2-32. Empalmes, ensambles y acoplamientos.

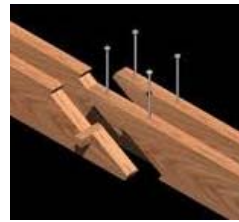
2.5.2 Por el medio de unión empleado

2.5.2.1 Uniones tradicionales

Son aquellas que se unen mediante un trabajo de carpintería como, por ejemplo, caja y espiga, rebajes, esperas, colas de milano, etc.



Doble cola de milano



Rayo de júpiter

Figura 2-33. Algunas uniones tradicionales.

2.5.2.2 Uniones mecánicas

Utilizan herrajes para la transmisión de esfuerzos, tales como clavos, pernos, tirafondos o conectores. Dentro de las uniones mecánicas, se diferencian dos tipos de medios de unión en función del modo de transmisión de los esfuerzos:

- Clavija. Se corresponde con los clavos, grapas, tornillos, pernos y pasadores en los que el esfuerzo se transmite de una pieza a otra mediante flexión y cortante en la clavija, junto con tensiones de aplastamiento en la madera.
- De superficie. Está constituida por los conectores de anillo, placa dentada, placa-clavo, etc. Se transmite el esfuerzo a través de una mayor superficie.

2.5.2.3 Uniones encoladas

Son aquellas que utilizan adhesivos para la transmisión de los esfuerzos; algunos ejemplos son las uniones entre las láminas de la madera laminada encolada o los enlaces rígidos mediante barras encoladas.

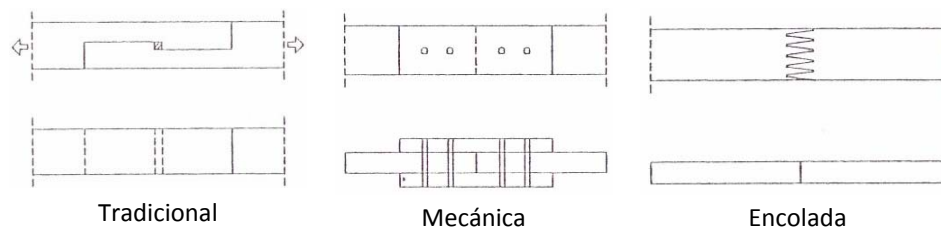


Figura 2-34. Uniones tradicionales, mecánicas y encoladas.

Debido a la ortotropía, la resistencia ante los distintos esfuerzos varía en función de la dirección en que éstos actúen sobre la pieza en relación a la dirección longitudinal de la fibra. En aquellas configuraciones donde aparecen esfuerzos localizados, el comportamiento del elemento estructural puede quedar seriamente comprometido. Por ello, resulta de especial interés conocer el comportamiento mecánico y las diversas variables que definen el diseño de la unión, tales como tensiones máximas, dimensiones de la unión, forma de colocación de la placa o tipo de madera. En ello pondrán el foco los siguientes apartados.

2.6 Uniones mecánicas con elementos tipo clavija

Los elementos de unión mecánicos de tipo clavija transmiten los esfuerzos con piezas transversales que atraviesan la madera. Habitualmente se hace uso de herrajes metálicos que exponen la zona de unión a tensiones de aplastamiento localizadas. Las clavijas están sometidas principalmente a esfuerzos de flexión y cortante. Hay que llamar la atención sobre algunas configuraciones en las que el fallo viene dado por la plastificación de distintas zonas de contacto, donde se dan rótulas plásticas con momentos flectores de la clavija y aplastamiento en la madera.

2.6.1 Descripción de los elementos de unión

Con el término “clavija” se abarca de forma genérica a clavos, grapas, pernos, tirafondos y pasadores. El vástago de estos elementos se somete a esfuerzos de flexión y cortante, generando tensiones de aplastamiento y plastificación

en las piezas de madera que traba. A continuación se describen algunos de los elementos tipo clavija y sus características:

Clavos: Es un medio de unión muy común. Se comercializan en muchos tamaños y formas (Figura 2-35), con un fuste liso o con resaltos, en forma de cuña o helicoidal y sección circular o cuadrada. Tienen diámetros que varían de los 2,75 a los 8 mm y una longitud de 40 a 200 mm. Están fabricados normalmente en acero y, en ocasiones, con acabados de protección galvanizada, que evitan fenómenos de oxidación.

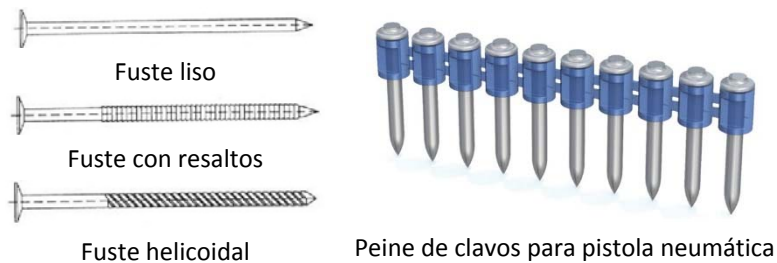


Figura 2-35. Tipos de clavos.

Tirafondos: También llamados tornillos de madera, tienen un fuste con una zona roscada en la punta (cuerda) y un tramo liso llamado caña (Figura 2-36). Con diámetros que varían entre 6 y 20 mm y longitudes de 25 a 300 mm.



Figura 2-36. Tirafondos y distintos tipos de cabeza.

Los tornillos para madera pueden tener punta autoperforante, como se ve en la Figura 2-37. Son diseños específicos, que no necesitan pre-taladros al disponer de una punta para un acoplamiento preciso, con retroceso autoperforante, como representa la Figura 2-37 A. En ocasiones, disponen de una fresa intermedia para reducir la fricción en la transición de la zona roscada al fuste liso, según muestra la Figura 2-37 B. La cabeza suele ser de geometría profunda para mejorar el agarre, expuesta en la Figura 2-37 C. Existen modelos en los que la caña lisa se sustituye por rosca de distinto paso, lo que facilita el apriete de diferentes piezas de madera y potencia la fricción entre ellas.

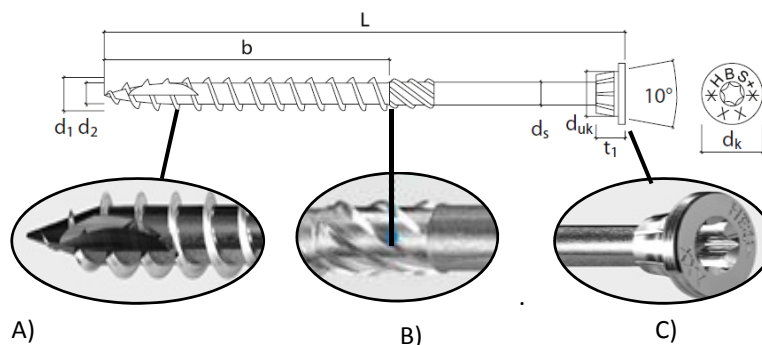


Figura 2-37. Sistemas autoperforantes.

Pernos: Se fabrican generalmente en acero dulce, habitualmente tienen una cabeza hexagonal en un extremo y se componen con arandela y tuerca en el otro. Con diámetros que varían de 12 a 30 mm, se admite un diámetro de hasta 1 mm mayor que el agujero donde se coloque el perno (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). Las arandelas bajo la cabeza del perno y bajo la tuerca deben tener un lado (si son cuadradas) o un diámetro mínimo igual a $3 \cdot d$ y un espesor mínimo de $0,3 \cdot d$ (d es el diámetro del perno). La arandela ha de tener pleno contacto con la superficie de la pieza. Otra restricción que se debe considerar es la tensión de compresión bajo la arandela, que no deberá superar $3 \cdot f_{c,90,k}$ (Argüelles et al., 2003).

Los pernos y tirafondos deberían ajustarse de forma que las piezas de madera que unen encajen perfectamente, y se han de reajustar, si fuera necesario, cuando la madera haya alcanzado el contenido en humedad de equilibrio, para asegurarse que se mantiene la capacidad de carga y rigidez de la estructura.

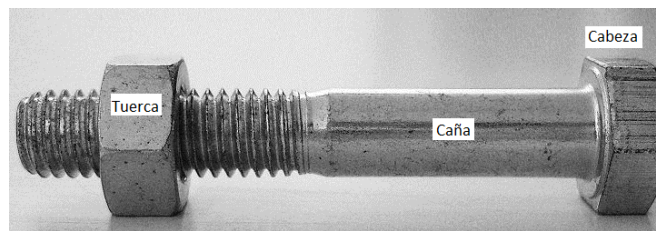


Figura 2-38. Pernos.

Pasadores: Barras de acero de sección circular con diámetros que cubren el rango de 16 a 25 mm y con extremos de bordes biselados. En general, el diámetro de agujero donde se alojan es ligeramente inferior (de 0,8 a 1 mm). Deben colocarse suficientemente separados de los bordes para evitar el fendado. Existen variantes de pasadores con puntas auto perforantes, según se muestra en la Figura 2-39.

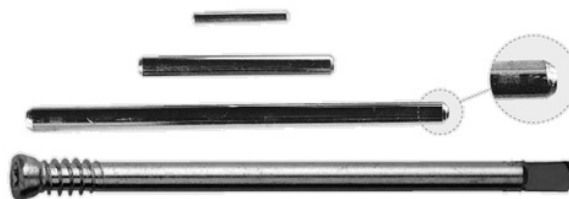


Figura 2-39. Pasadores.

Grapas: Como elementos de unión son muy adecuadas para la fijación de tableros a piezas de madera. Se insertan con máquinas específicas, llamadas grapadoras. Pueden tener distintos anchos y su longitud de patas suele variar desde 3,17 a 63,5 mm. Están fabricadas en diversos materiales como acero, aluminio, bronce, aleaciones de cobre y níquel.

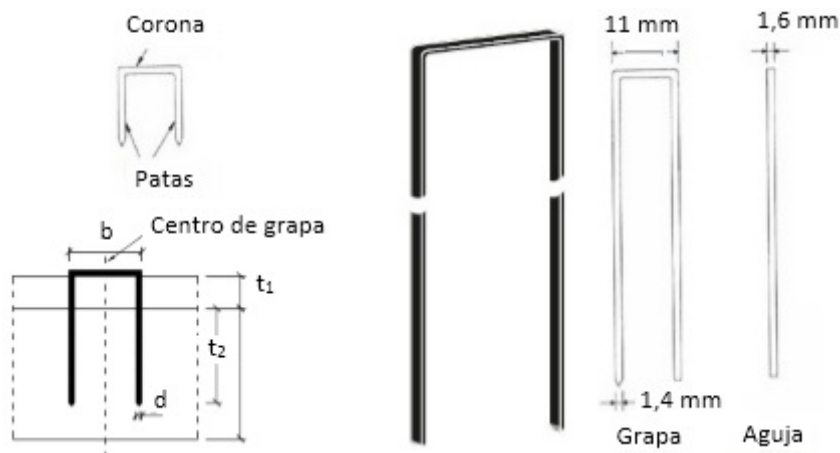


Figura 2-40. Grapas.

2.6.2 Antecedentes y estado de la investigación

2.6.2.1 Antecedentes en la investigación de uniones tipo clavija

La teoría general de cálculo de uniones con clavijas ha existido desde la década de 1940, con base en Europa y un enfoque fundado en los conceptos de la resistencia de los materiales. Dicha teoría establece la capacidad de carga final de la unión en diferentes configuraciones según el tipo de deformación de la clavija y la madera, considerando la plastificación tanto en la madera como en la clavija. Se llamó teoría del rendimiento (Aune et al., 1986) y fue aplicada por primera vez a los sistemas de fijación de madera en 1941. Ocho años más tarde, publicó una versión abreviada de su documento original en inglés (Johansen, 1949).

Johansen propuso un modelo en el que la resistencia de la unión se debía principalmente a dos componentes:

1. El "efecto de clavija" del perno, que depende de la resistencia de la propia clavija por flexión y la resistencia de la madera durante el aplastamiento.
2. El "efecto tensional", que depende de la resistencia de la clavija a la tensión y de la presencia de fricción entre las superficies de apoyo.

Johansen estudió la unión considerando distintas hipótesis de distribuciones tensionales según el tipo de deformación de la clavija, como puede observarse en la Figura 2-41 extraída de su publicación, en las que supone que:

- No hay tensión axial en el elemento de fijación y, por lo tanto, ninguna contribución por fricción a la capacidad de soporte por carga lateral.
- Las relaciones tensión-deformación de la clavija en la flexión y de la madera en la incrustación son de comportamiento plástico.

Con base en estos supuestos, obtuvo la capacidad de carga de las uniones en cortadura simple y doble con una sola clavija como elemento de unión. Las expresiones son bastante simples y cada una se relaciona con un modo particular de fallo.

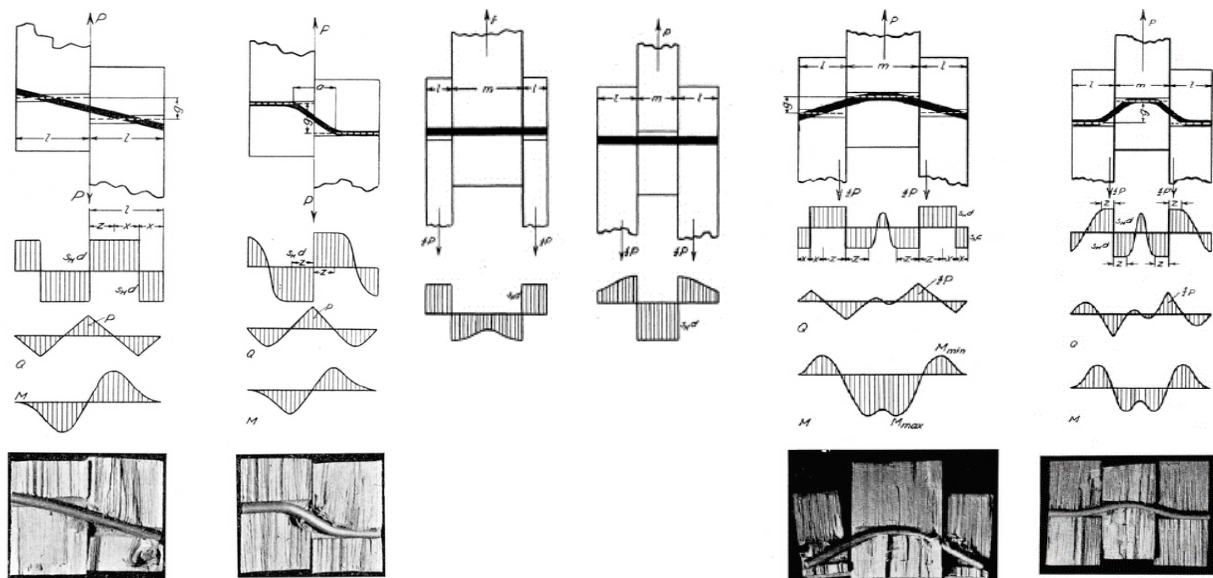


Figura 2-41. Distribución tensional en uniones con clavija según la teoría del rendimiento (Johansen, 1949).

En la Figura 2-41 se pueden ver los posibles modos de fallo, donde la distribución tensional de aplastamiento era tratada como una función lineal de pendiente nula en las zonas de aplastamiento de la madera, y con una distribución curva si aparecían zonas de rótula plástica en la clavija (Figura 2-42).

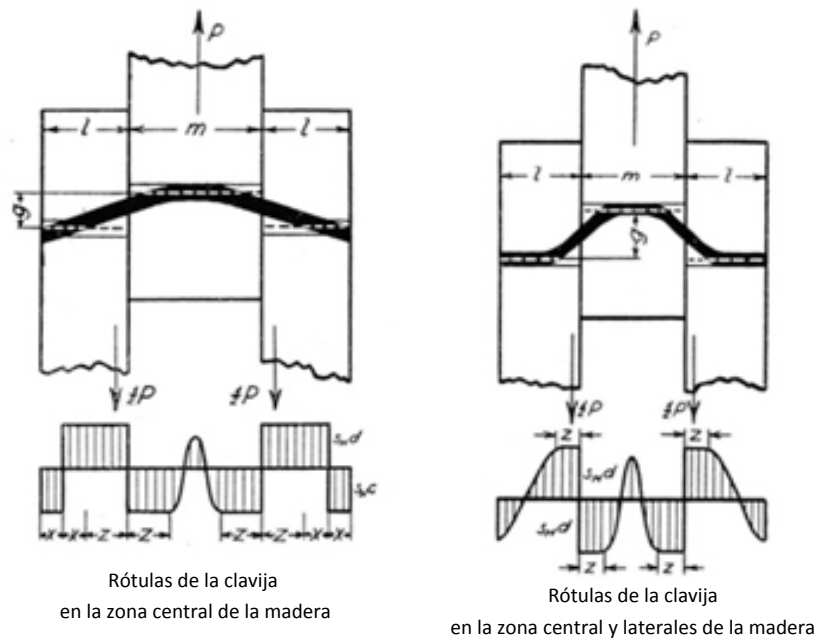


Figura 2-42. Detalle de distribución tensional en uniones con clavija (Johansen, 1949).

Algunas de sus investigaciones sobre uniones clavadas estaban sin terminar, y durante años los resultados permanecieron inéditos. Con el tiempo, se amplió su trabajo haciendo referencia a estudios de uniones atornilladas (Larsen & Jensen, 2000). Esta teoría ha proporcionado una base racional para establecer un modelo, y los criterios de diseño para uniones clavadas en varios países europeos. La validez del método para la obtención de cargas de fallo ha sido revisada por otras investigaciones experimentales (Aune et al., 1986). También se hicieron pruebas en las juntas clavadas que fueron algunas de las primeras investigaciones realizadas en el Laboratorio de Productos Forestales de los Estados Unidos (Wood Handbook, USDA. Forest Service, 1999).

Este modelo simplificado asume:

- Un comportamiento similar en el conjunto de los modos básicos de fallo de la unión.
- Que tanto la clavija sometida a flexión como la madera en la zona de aplastamiento por deformación tienen un comportamiento rígido plástico ideal.
- La curva de momento de flexión frente a la rotación se aproxima al comportamiento de un clavo de acero.
- La relación carga frente a deslizamiento de la unión con aplastamiento de la madera supone que no hay limitación en la deformación de la articulación.
- Que el conjunto no falla debido a espacio insuficiente o distancias extremas entre clavija y periferia de la escuadría de madera.
- Ignora la fricción en intercaras de madera y entre clavija y agujero de madera, ya que es difícil estimarla con precisión y, en muchas articulaciones, no existe.

La publicación *Lateral Load-Bearing Capacity of Nailed Joints Based on the Yield Theory* (Aune et al., 1986) describe la evolución de estas investigaciones:

- En 1950, K. Möller aplicó la teoría básica del rendimiento a uniones clavadas, en cortante simple y doble. Su investigación *Testing methods for joints with mechanical fasteners in load-bearing timber structures. Final recommendations* incluyó las articulaciones de dos miembros simétricos y asimétricos, y las articulaciones de tres miembros simétricos. También consideró el efecto de tener elementos de unión con las diferentes fuerzas de empotramiento. Aunque los principios se habían introducido por Johansen 10 años antes, la teoría del rendimiento para uniones tipo clavija ha sido conocida también como "teoría de Möller" por sus trabajos con clavos.

- En 1957, A. Meyer, en el trabajo *Die Tragfähigkeit von Nagelverbindungen bei Statischer Belastun*, analizó el efecto de la fricción.
- En 1969, H. J. Larsen y Reestrup investigaron las uniones del perno de fijación publicado en *Tests on screws in wood*. Ellos encontraron que las condiciones de una unión de tornillo o fijación en extremos cargada lateralmente difieren, ligeramente, de las de una unión roscada a lo largo de toda la clavija, debido a los diferentes valores de incrustación a lo largo de la clavija. Por otra parte, la fricción puede ocurrir en el vástago y en diferentes hilos de rosca, de modo que había que considerar los valores del momento de fluencia. Así aparecieron fórmulas para la capacidad de carga verificadas por ensayos.
- En 1973, H. J. Larsen, en *The yield load of bolted and nailed joints*, ofreció la base racional que contribuyó al uso de esta teoría del rendimiento en la normativa de países escandinavos.
- En 1974, B. Norén resumió las diferentes fórmulas desarrolladas para tipos de conectores de madera en su escrito *Formler för hallfasthet hos mekaniska träförband*.
- En 1979, J. Ehlbeck hizo un estudio exhaustivo, y un resumen de las investigaciones de los anteriores 30 años referentes al diseño de la unión clavada en la madera y en productos a base de madera, en la publicación *Nailed joints in wood structures*. Afirmó que la investigación debe estar dirigida a "conclusiones uniformes", en lugar de realizar investigaciones aisladas dentro de las fronteras nacionales. Por ello, las normas deben estar basadas en acuerdos internacionales y facilitar criterios homogéneos y evolutivos a medida que se plantean nuevas técnicas y combinaciones de materiales.
- En 1983, T.E. McLain y S. Thangjitham estudiaron, en *Bolted wood-joint yield model*, la teoría del rendimiento, que se aplica a las uniones atornilladas habituales en la práctica constructiva de América del Norte.

En América del Norte, el uso de la teoría conocida como *European Yield Model* (Rodd & Leijten, 2003) ha supuesto un reconocimiento internacional del método que promueve el uso de un procedimiento de análisis uniforme para las articulaciones que contienen clavos (y elementos afines como pernos o tornillos). También resulta una base racional para predecir la carga de plastificación en uniones con clavos que se encuentran habitualmente en construcciones.

Con la nueva normativa europea (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y sus transposiciones a distintos países, como el Código Técnico en la Edificación (CTE) en España y en particular el Documento Básico de Seguridad Estructural en Madera (DB SE M, 2009), las investigaciones resumidas anteriormente han sido consolidadas también a nivel continental y nacional.

Los sellos de calidad, antes voluntarios, han desembocado en el marcado CE, que se convirtió en obligatorio desde septiembre de 2008 en el ámbito de la unión europea. El sistema de certificación de los productos derivado de la Directiva de Productos para la Construcción desde 1998 (derogada el 1 de julio de 2013) y su relevo, el Reglamento de Productos de Construcción de la Unión Europea Nº 305/2011, suponen una consolidación en los antecedentes de investigación sobre la madera y sus calidades estructurales.

Normas internacionales, como la ISO 6891 sobre uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos (1983), y sus versiones traducidas, como la (UNE-EN 26891, 1992), son empleadas y reconocidas por laboratorios como el de Estructuras de Madera, del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), cuyas instalaciones y técnicos se han visitado para el desarrollo de los ensayos integrados en esta tesis. Allí se han desarrollado diversos proyectos de investigación, que han conducido a la caracterización de madera estructural, y se expiden certificaciones relacionadas con madera estructural comercializada.

Asimismo, los ensayos no destructivos han reforzado los parámetros de investigación, con técnicas de ultrasonidos y vibraciones (que definen el módulo de elasticidad dinámico) o el resistógrafo, arranque de tornillo y penetrómetro (que determina la densidad) (Íñiguez, 2007).

En consecuencia, se está intentando situar la madera estructural en igualdad de condiciones normativas que otros materiales. Esto eleva las perspectivas de su demanda en el mercado, haciendo necesaria y urgente la actualización del sector y la implantación de una serie de garantías en elementos complementarios de unión (como pueden ser las fijaciones en los extremos de la clavija o los adhesivos). Estas garantías deben ser cubiertas, obligatoriamente, por los diferentes agentes que intervienen en el proceso de la edificación.

2.6.2.2 Actividad investigadora sobre la madera estructural en España

Son numerosos los centros que están realizando trabajos de investigación con madera estructural. La publicación *Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España* (Herrero, 2007) hace una recopilación amplia de información de personas e instituciones que trabajan al respecto. Sin pretender ser exhaustiva, se reseñan algunas de estas instituciones:

- La E.T.S. de Arquitectura de Madrid, donde se han realizado análisis del comportamiento de conectores para forjados colaborantes con madera y hormigón.
- La E.U.I.T. Forestal de Madrid ha estudiado parámetros sobre los daños producidos por insectos xilófagos.
- En la E.T.S.I. de Montes de Madrid, dentro del área de Tecnología de la Madera y en colaboración con AITIM, se han centrado en el refuerzo de estructuras de madera con adhesivos epoxi.
- El INIA, donde se han datado estructuras históricas de madera.
- La Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera (AITIM) se ha centrado en el desarrollo de certificaciones en el proceso de fabricación y Sellos de Calidad.
- El Centro de Investigación Tecnológica, Cidemco-Tecnalia, trabaja desde el País Vasco en la definición de distintivos de calidad para la madera estructural con determinadas regiones de procedencia.

La colaboración entre los distintos centros es fluida; así por ejemplo, la E.T.S.I. de Montes, junto con el INIA y la AITIM, realizan trabajos en el campo de la peritación de estructuras existentes utilizando técnicas no destructivas. En el marco de la Asociación Española de Certificación y Normalización (AENOR), el comité AEN/CTN 56 de Madera y Corcho (de cuya secretaría es titular AITIM) trabaja estrechamente con los comités de ámbito internacional y europeo, entre ellos:

- ISO/TC 165 Estructuras de madera.
- ISO/TC 218 Madera.
- CEN/TC 124 Estructuras de madera.

Más concretamente, para la investigación de uniones estructurales en madera, se trabaja con métodos de diseño numérico, en particular los de elementos finitos. Un exponente son los trabajos realizados en:

- La E.P.S. de Lugo, analizando con métodos de elementos finitos el comportamiento mecánico de uniones.
- La E.T.S. de Arquitectura de La Coruña, desarrollando estudios avanzados que emplean sistemas planos y espaciales (mediante barras que modelizan los elementos de madera) y diversos sistemas de unión, que están derivando en patentes y modelos de utilidad.

La difusión de conocimiento también ha evolucionado mediante revistas científicas y de divulgación, como el Boletín de Información Técnica de AITIM, editado desde 1967, con una tirada bimestral de 5.000 ejemplares. Según la documentación relacionada (Herrero, 2007), es de destacar las revistas indexadas incluidas en el Citation Index (2015):

- *Biosystem Engineering*.
- *Holz als Roh-und Werkstoff*.
- *Materiales de Construcción*.

- *Wood Science and Technology.*
- *Spanish Journal of Agricultural Research.*
- *Hozlforschung.*
- *Forest Product Journal.*
- *Journal of ASAE.*
- *Journal of wood science*
- *Wood science and technology*

Otra fuente de divulgación e intercambio de conocimiento son los congresos nacionales e internacionales relacionados con la madera estructural:

- Congreso Forestal de Cuba y III Simposio Internacional de Técnicas Agroforestales. Habana, Cuba, 2004.
- Congreso Forestal Español. Granada, 2001. Zaragoza, 2005.
- Congreso Forestal Hispano Luso. Irati, Pamplona, España, 1997.
- Congreso Iberoamericano de Eucalyptus globulus. Vigo, España, 2006.
- Congreso Iberoamericano de Investigación y Desarrollo de Productos Forestales. Concepción, Chile, 2000.
- Congreso internacional de rehabilitación del patrimonio arquitectónico y edificación. Tenerife, España, 1992. La Habana, Cuba, 1998. San Bernardino, Paraguay, 2002. Lanzarote, España, 2004. Buenos Aires, Argentina, 2006.
- Congreso Mundial sobre Protección Integral de Ciudades frente al fuego y otros riesgos. Toledo, España, 1997.
- Congreso Nacional de Agroingeniería. Córdoba, España, 2003. León, España, 2005.
- Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Cádiz, España, 2005.
- Congreso Nacional de la Madera. Madrid, España, 1999.
- Congreso Nacional de Profesores de Materiales de Construcción de Escuelas que imparten Arquitectura Técnica. Valencia, España, 2004.
- Congreso Nacional de protección de la madera. Pamplona, España, 2002. San Sebastián, España, 2006.
- Congreso Nacional END, Asociación española de ensayos no destructivos. Cartagena, España, 2003.
- Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia. Lisboa, Portugal, 2004.
- COST Action E5. Timber frame building systems. 1995-2000.
- COST Action E24. Reliability analysis of timber structures. 2000-2005.
- COST Action E29. Innovative timber and composite elements. Components for building. 2002-2007.
- COST Action E40: Innovative utilization and products of large dimensioned timber including the whole forest-wood-chain. 2004-2008.
- COST Action E53: Quality control for wood and wood products. 2005-2010.
- COST Action IE0601 Wood Science for Conservation of Cultural Heritage (WoodCultHer). 2007 y siguientes.
- European Conference on NDT. Barcelona, España 2002.
- European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Helsinki, Finlandia, 2006.
- Congreso Ibérico a Madeira na construção. Guimarães, Portugal, 2004.
- IASS 40th Anniversary Congress. Madrid, España, 1999.
- International Conference on Archeological Prospection.
- International Structural Analysis of Historical Constructions Possibilities of Numerical and Experimental Techniques. Nueva Delhi, India, 2006.
- International Conference on Space Structures. Guildford, Reino Unido, 1993. Guildford, Reino Unido, 2002.
- Jornadas sobre la madera estructural. El pino laricio. Segura de la Sierra, Jaén, España, 2006.
- Second International Maras 96. Mobile and Rapidly Assembled Structures. Wessex Institute of Technology. Wessex Institute of Technology and School of Architecture, Sevilla. 1996.

- Seminario Internacional sobre construcciones históricas. Guimarães, Portugal, 2001.
- Simposio del Pino piñonero. Valladolid, España, 2000.
- Simposio Iberoamericano de Eucalyptus globulus. Pontevedra, España. 2006.
- WCTE World Conference on Timber Engineering. Lahti, Finlandia, 2004. Portland, USA, 2006.
- La madera en la rehabilitación y restauración de edificios. Madrid, España, 1985.
- Jornadas Nacionales de la Madera en la Construcción, INIA-ANCOP. Madrid, España, 1986. Madrid, España, 1998.
- Jornadas Técnicas sobre la Madera en la Construcción, Junta de Andalucía. Granada, España, 1988.
- Jornadas Técnicas de la Madera, Xunta de Galicia. Pontevedra, España, 1989.
- Jornadas sobre Diagnóstico, Patología y reparación de elementos de madera. Barcelona, España, 1992.
- International Summer Meeting, American Society of Agricultural Engineers. Charlotte, North Carolina, USA. 1992.
- Jornadas Forestales de Cuenca. Cuenca, España, 1992.
- International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Hannover, Alemania, 2005.
- Symposium Brücken aus Holz. Munich, Alemania, 2007.

En la Figura 2-43 se puede observar una tendencia creciente de la producción científica que se inicia a mediados de los años 90, en los que el número de artículos por año se mantiene prácticamente constante. Desde el año 2003, aproximadamente, hay un descenso en el número de artículos publicados y un espectacular aumento de la presencia en congresos relacionados con madera estructural.

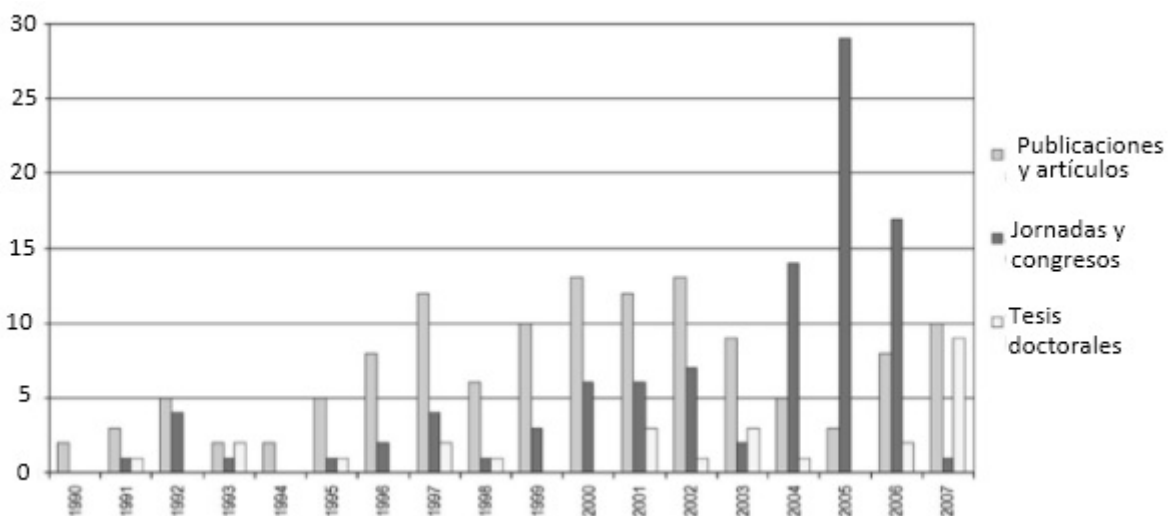


Figura 2-43. Evolución de la producción científica sobre madera estructural en España desde 1990 (Herrero, 2007).

Según el INIA, en 2003 se puso en marcha un largo proceso para consolidar el uso estructural de la madera a través de distintos aspectos y metodologías desarrollados en normativa. Por ejemplo:

- Realizar una clasificación visual, de resistencia y, en general, de propiedades a través de normas, como por ejemplo: *Madera estructural. Clases resistentes* (UNE-EN 338, 2010) o *Madera estructural. Asignación de calidades visuales y especies* (UNE-EN 1912, 2012).
- Desarrollar ensayos, como pueden ser: *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades físicas y mecánicas* (UNE-EN 384, 2004), (UNE-EN 408, 2004), *Estructuras de madera. Métodos de ensayo* (UNE-EN 409, 1998) o *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de propiedades físicas y mecánicas adicionales* (UNE-EN 1193, 2010).

- Identificar productos compatibles, por ejemplo: *Adhesivos para madera de uso estructural. Adhesivos de caseína. Clasificación y requisitos de aptitud a la función* (UNE-EN 12436, 2002) o *Conectores para madera. Especificaciones de los conectores para madera* (UNE-EN 912, 2011).
- Definir desviaciones dimensionales, por ejemplo: *Madera estructural. Coníferas y chopo. Dimensiones y tolerancias* (UNE-EN 336, 2003).

Como ampliación, se puede ver a continuación un descriptor más amplio de esas normas en la Tabla 2-14.

Tabla 2-14. Relación de normas.

Norma-Nº-Parte	Título
Normativa europea sobre los estados límite	
UNE-EN 336	Madera estructural. Coníferas y chopo. Dimensiones y tolerancias.
UNE-EN 338	Madera estructural. Clases resistentes.
UNE-EN 384	Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades físicas y mecánicas.
UNE-EN 386	Madera estructural. Dimensiones y tolerancias.
UNE-EN 409	Estructuras de madera. Métodos de ensayo.
UNE-EN 518	Madera estructural. Clasificación. Requisitos de las normas de clasificación visual resistente.
UNE-EN 519	Madera estructural. Clasificación. Requisitos para la madera clasificada mecánicamente y para las máquinas de clasificación.
UNE-EN 844	Madera aserrada y madera en rollo. Terminología.
UNE-EN 1193	Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de propiedades físicas y mecánicas adicionales.
UNE-EN 1194	Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y determinación de los valores característicos.
UNE 56-544	Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural: madera de coníferas.
UNE-EN 56-545	Marcado de la madera clasificada.
UNE-EN 1912	Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies.
Determinación de las características físicas y mecánicas de la madera	
UNE 56.529	Determinación de las características físicas y mecánicas de madera. Contenido de humedad.
UNE 56.531	Peso específico.
UNE 56.532	Higroscopicidad.
UNE 56.533	Contracción lineal y volumétrica.
UNE 56.534	Dureza.
UNE 56.535	Compresión axial.
UNE 56.536	Flexión dinámica.
UNE 56.537	Flexión estática.
UNE 56.538	Tracción perpendicular a las fibras.
UNE 56.539	Resistencia a la hienda.
UNE 56.541	Estabilidad dimensional de la madera tratada.
UNE 56.542	Compresión perpendicular a las fibras.
UNE 56.543	Esfuerzo cortante.
Determinación de propiedades	
prEN 13.307-1	Deformaciones / Espesor de láminas.
UNE EN 13.183-1	Contenido de Humedad.
UNE EN 942	Calidad madera.
UNE EN 408	Uniones dentadas.
AITIM	Laminado Procedimiento.
UNE EN 1382	Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Resistencia al arranque de los elementos de fijación de la madera.
Productos estructurales de la madera. Madera aserrada estructural	
UNE EN 408	Resistencia a flexión y módulo de elasticidad.
Madera laminada encolada	
UNE EN 391	Delaminación en línea de cola.
UNE EN 392	Esfuerzo cortante en línea de cola.
UNE EN 408	Resistencia característica de las uniones dentadas.
UNE-EN 26891	Estructuras de madera. Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. Principios generales para la determinación de las características de resistencia y deslizamiento.
Productos compatibles con la madera	
UNE-EN 12436	Adhesivos para madera de uso estructural. Adhesivos de caseína. Clasificación y requisitos de aptitud a la función y erratum.
UNE-EN 912	Conectores para madera. Especificaciones de los conectores para madera.

2.7 Uniones tipo clavija para sistemas madera-madera y madera-acero en cortadura simple y doble

2.7.1 Estados límite últimos (ELU)

Una estructura se sitúa fuera de servicio cuando supera los estados límite, bien por un defecto de resistencia, lo que afectaría a la seguridad de la estructura, o por un problema de deformación, lo cual afectaría a la funcionalidad de la estructura.

Con la aparición del Eurocódigo 5 (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), el anterior método de cálculo, que trataba las tensiones admisibles, es sustituido por el método de los “Estados Límite”, también recogido en el Código Técnico de la Edificación sobre Estructuras de Madera (DB SE M, 2009).

Si anteriormente se fijaban los valores de las tensiones admisibles a partir de las tensiones básicas de cada especie, afectadas por varios coeficientes modificadores, ahora se definen los Estados Límite Últimos que introducen, para el cálculo de las tensiones, unos valores numéricos únicos de servicio o característicos y unos coeficientes parciales de seguridad. Para ello se debe tener en cuenta que, “Para el caso de piezas de sección constante, el paso de las solicitaciones de cálculo a tensiones de cálculo se podrá hacer según las fórmulas clásicas de Resistencia de Materiales, salvo en las zonas en las que exista un cambio brusco de sección o, en general, un cambio brusco del estado tensional”, como indica la norma (DB SE M, 2009). Algunos de los ELU suponen:

- Agotamiento por sollicitación normal, ya sea derivada de esfuerzos de flexión, tracción, compresión.
- Agotamiento por sollicitación tangente, por ejemplo determinada de cortadura o torsión.
- Inestabilidad elástica de equilibrio, por ejemplo cuando se producen efectos de pandeo.

En el caso de las uniones tipo clavija, se identifican fenómenos de plastificación vinculados con la capacidad de carga en la unión; esto es, el valor de una fuerza que la unión no debe superar, ya que con ella se fija el valor de una magnitud física tal que, de ser rebasada, haría que la estructura dejara de ser apta para su uso, ya sea por ruina estructural total o parcial.

2.7.2 Estados límite de servicio (ELS)

La reglamentación (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009) también define los estados límite de servicio, que suponen una pérdida significativa de funcionalidad o deterioro de la estructura, pero no un riesgo inminente a corto plazo. Tienden a identificar situaciones reparables, molestas pero que no son graves para los usuarios, empleando márgenes de seguridad más moderados que en el ELU. Algunos de los ELS suponen:

- La deformación excesiva, ya sea por deformación o desplazamiento.
- La vibración excesiva.
- La durabilidad, derivada por ejemplo de la oxidación, pudrición o degradaciones por agentes biológicos.
- La fisuración excesiva, por ejemplo con la aparición de fendas.

En el caso de desplazamientos de uniones tipo, en el Apartado 7.2 “Deslizamiento de las uniones” según (DB SE M, 2009), se indica que:

“El módulo de deslizamiento K_{ser} , cociente entre la fuerza aplicada en servicio y el deslizamiento local de la unión, con la hipótesis de régimen lineal y elástico, y para los estados límite de servicio, puede determinarse mediante ensayos según la norma (UNE-EN 26891, 1992) (método de determinación de $k_s = K_{ser}$) ...”

El valor del módulo de deslizamiento (K_{ser}) también se puede determinar a partir de ecuaciones analíticas que ligan este coeficiente con la densidad media (ρ_m) de las piezas que intervienen en la unión y con el diámetro de la clavija (d) (o si son conectores, d_c), y lo penaliza (multiplicándolo por dos) si supone uniones entre madera y acero o madera

y hormigón. En el caso de modelos de ensayos marcados por la norma (UNE-EN 26891, 1992), ésta limita el deslizamiento de la unión a 15 mm en todos los casos.

2.7.3 Capacidad de carga en el elemento tipo clavija

El cálculo de las uniones de tipo clavija se basa en la determinación de los valores característicos a partir de las propiedades del material (tanto madera, como medios de unión) y de la geometría de la unión. Fundamentado en las teorías del rendimiento (Johansen, 1949) y asumido por las normas (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009) y por distintos autores (Argüelles 2013), permite obtener la carga última de la unión considerando el fallo por la tensión de aplastamiento en la madera o por la formación de rótulas plásticas en el medio de unión ante sollicitaciones de flexión.

Mediante las ecuaciones de Johansen, se deduce la capacidad de carga de estos elementos de fijación partiendo de las siguientes simplificaciones:

- El aplastamiento se produce en una laja de madera, recogiendo todo el esfuerzo de un sistema plano de espesor igual al diámetro de clavija.
- Las zonas de aplastamiento se distribuyen según la Figura 2-47 (en el caso de un solo plano de cortadura).
- Se desprecian fuerzas de rozamiento, tanto entre la clavija con el agujero, como en las intercaras de contacto de la unión.
- La curva de carga-desplazamiento es la indicada en la Figura 2-44. Consiste en suponer que el medio de unión y la madera tienen un comportamiento rígido-plástico.

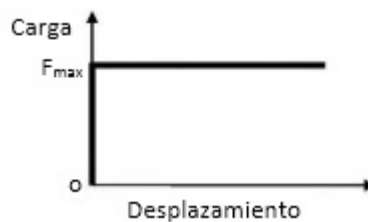


Figura 2-44. Simplificación de la curva carga-desplazamiento de aplastamiento.

Se hace uso de la siguiente notación:

- t espesor de la placa de acero, en mm.
- t_1 y t_2 espesores de las piezas de madera o las penetraciones de la clavija. En el caso de cortadura doble, t_1 es para las piezas laterales, en mm.
- $f_{h1,k}$ resistencia característica al aplastamiento en la pieza de espesor t_1 , en mm.
- $f_{h2,k}$ resistencia característica al aplastamiento en la pieza de espesor t_2 , en mm.
- d diámetro de la clavija (se asume inicialmente igual que el del agujero), en mm.
- $M_{y,Rk}$ valor característico del momento plástico de la clavija, en N·mm.
- $F_{v,Rk}$ valor de cálculo de la capacidad de carga por plano de cortante, en N.
- β relación de aplastamiento de las dos piezas de unión, de valor:

$$\beta = \frac{f_{h2,d}}{f_{h1,d}}$$

Ecuación 2-17

- $f_{h1(2),d}$ resistencia de cálculo al aplastamiento en la pieza de espesor t_1 , (t_2), en N/mm² de valor:

$$f_{h1(2),d} = k_{mod} \frac{f_{h1(2),k}}{\gamma_m}$$

Ecuación 2-18

- k_{mod} factor de modificación, teniendo en cuenta la clase de duración de la combinación de la carga y la clase de servicio.
- γ_M coeficiente parcial de seguridad para una propiedad del material.

Las variables geométricas descritas anteriormente se reflejan también en la Figura 2-45 y la Figura 2-46.

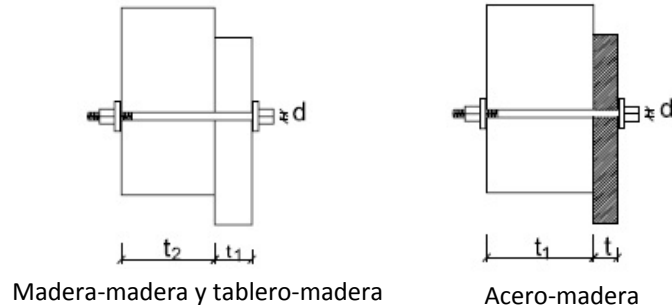


Figura 2-45. Composiciones y montajes habituales en uniones tipo clavija en cortadura simple.

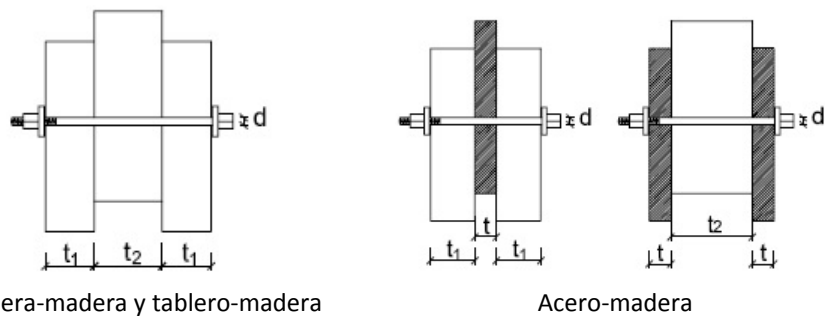
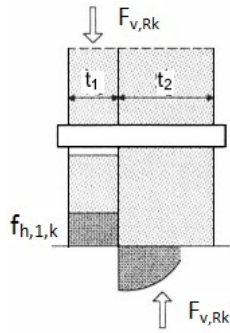


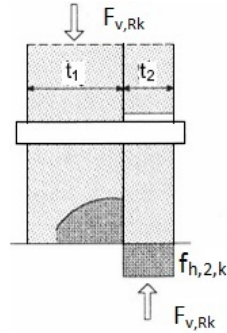
Figura 2-46. Composiciones y montajes habituales en uniones tipo clavija en cortadura doble.

2.7.3.1 Uniones madera-madera en cortadura simple

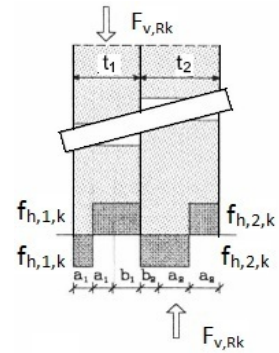
Los primeros modos de fallo, representados en la Figura 2-47 [a), b) y c)], corresponden a un mismo modo de rotura para el caso de un sólo plano de cortadura. La clavija se comporta como un elemento rígido y el agotamiento se alcanza por aplastamiento en la madera ante la rigidez de la clavija. Los últimos modos de fallo [d), e) y f)] representan el caso de una clavija más esbelta, y el fallo se alcanza por una combinación de aplastamiento en la madera y la formación de rótulas plásticas en la clavija de forma combinada.



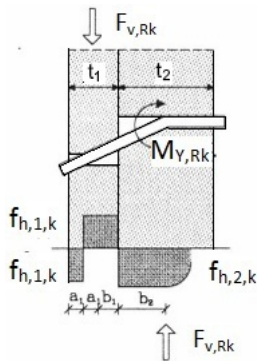
Modo a) Aplastamiento en pieza de espesor t_1 .



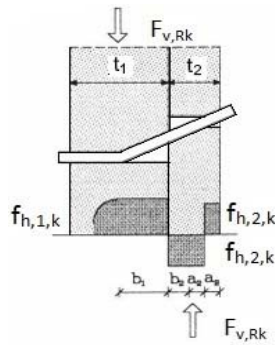
Modo b) Aplastamiento en pieza de espesor t_2 .



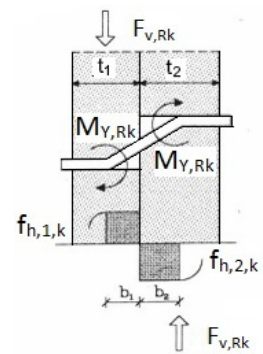
Modo c) Aplastamiento en piezas de espesor t_1 y t_2 .



Modo d) Rótula plástica de clavija en zona de pieza de espesor t_2 .



Modo e) Rótula plástica de clavija en zona de pieza de espesor t_1 .

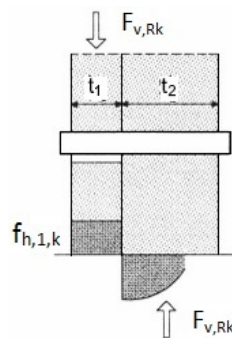


Modo f) Doble rótula plástica en clavija.

Figura 2-47. Modos de fallo en cortadura simple.

El proceso de cálculo de la capacidad de carga de la unión $F_{v,Rk}$ resulta sencillo, a partir de aplicación de las ecuaciones de equilibrio para cada modo de fallo:

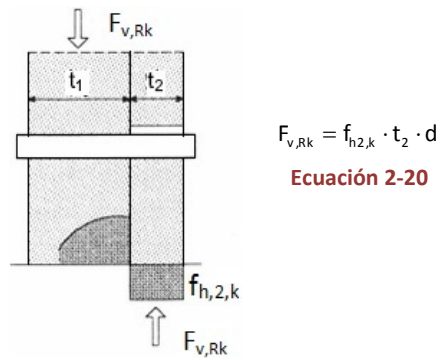
Modo a) Aplastamiento de la pieza de espesor t_1 .



$$F_{v,Rk} = f_{h1,k} \cdot t_1 \cdot d$$

Ecuación 2-19

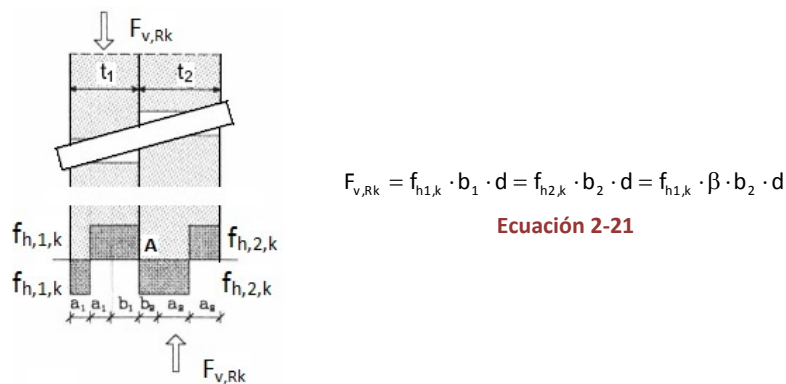
Modo b) Aplastamiento de la pieza de espesor t_2 .



$$F_{v,Rk} = f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d$$

Ecuación 2-20

Modo c) Admitiendo la ley de distribución de tensiones representada en la Figura 2-47, las dimensiones a_1 , b_1 , a_2 y b_2 se determinan aplicando las ecuaciones de equilibrio.



$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot b_1 \cdot d = f_{h,2,k} \cdot b_2 \cdot d = f_{h,1,k} \cdot \beta \cdot b_2 \cdot d$$

Ecuación 2-21

Desarrollando analíticamente las ecuaciones de equilibrio de momentos (M_{Ati}) respecto al punto A, considerando las tensiones de aplastamiento que se producen en la madera y sustituyendo la relación de la Ecuación 2-22.

$$b_1 = \beta \cdot b_2$$

Ecuación 2-22

$$M_{At1} = f_{h,1,k} \cdot d \cdot \left(b_1 \cdot \frac{b_1}{2} + a_1 \cdot \left(\frac{a_1}{2} + b_1 \right) - a_1 \cdot \left(\frac{a_1}{2} + a_1 + b_1 \right) \right) = M_{At2}$$

$$f_{h,1,k} \cdot d \cdot \left(\frac{b_1^2}{2} + \frac{a_1^2}{2} + b_1 \cdot a_1 - \frac{a_1^2}{2} - a_1^2 - b_1 \cdot a_1 \right) = M_{At2}$$

$$f_{h,1,k} \cdot d \cdot \left(\frac{b_1^2}{2} - a_1^2 \right) = f_{h,2,k} \cdot d \cdot \left(a_2^2 - \frac{b_2^2}{2} \right) = \beta \cdot f_{h,1,k} \cdot d \cdot \left(a_2^2 - \frac{b_2^2}{2} \right)$$

Ecuación 2-23

Resulta la Ecuación 2-24.

$$\left(\frac{b_1^2}{2} - a_1^2 \right) = \beta \cdot \left(a_2^2 - \frac{b_2^2}{2} \right)$$

Ecuación 2-24

Con lo que se puede hacer el siguiente desarrollo:

$$\left(\frac{b_1^2}{2} - a_1^2 \right) = \beta \cdot \left(a_2^2 - \frac{b_2^2}{2 \cdot \beta^2} \right) = \beta \cdot a_2^2 - \frac{b_1^2}{2 \cdot \beta} \Rightarrow \frac{b_1^2}{2} + \frac{b_1^2}{2 \cdot \beta} = a_1^2 + \beta \cdot a_2^2$$

$$\left(\frac{\beta \cdot b_1^2 + b_1^2}{2 \cdot \beta}\right) = \beta \cdot a_2^2 + a_1^2 \Rightarrow \frac{b_1^2 \cdot (\beta + 1)}{2 \cdot \beta} = \beta \cdot a_2^2 + a_1^2$$

Ecuación 2-25

De la Ecuación 2-22, al sustituir $b_2 = b_1/\beta$, se llega a:

$$\frac{b_1^2}{2} \cdot \frac{\beta + 1}{\beta} = \beta \cdot a_2^2 + a_1^2$$

Ecuación 2-26

Por consideraciones geométricas y sustituyendo $b_2 = b_1/\beta$

$$a_1 = \frac{t_1 - b_1}{2}; a_2 = \frac{t_2 - b_2}{2} = \frac{\beta \cdot t_2 - b_1}{2 \cdot \beta}$$

Ecuación 2-27

Que se lleva a la Ecuación 2-26, donde se establece:

$$\begin{aligned} \frac{b_1^2}{2} \left(\frac{\beta + 1}{\beta}\right) &= \beta \cdot a_2^2 + a_1^2 \Rightarrow \frac{b_1^2 \cdot (\beta + 1)}{2 \cdot \beta} = \beta \cdot \left(\frac{\beta \cdot t_2 - b_1}{2 \cdot \beta}\right)^2 + \left(\frac{t_1 - b_1}{2}\right)^2 \\ \frac{b_1^2 \cdot (\beta + 1)}{2 \cdot \beta} &= \beta \cdot \frac{\beta^2 \cdot t_2^2 + b_1^2 - 2 \cdot \beta \cdot t_2 \cdot b_1}{4 \cdot \beta^2} + \frac{\beta \cdot (t_1^2 + b_1^2 - 2 \cdot t_1 \cdot b_1)}{4 \cdot \beta} \\ \frac{b_1^2 \cdot (\beta + 1)}{\beta} &= \frac{\beta^2 \cdot t_2^2 + b_1^2 - 2 \cdot \beta \cdot t_2 \cdot b_1 + \beta \cdot t_1^2 + \beta \cdot b_1^2 - 2 \cdot \beta \cdot t_1 \cdot b_1}{2 \cdot \beta} \\ b_1^2 \cdot (\beta + 1) &= \frac{b_1^2 + \beta \cdot b_1^2 - 2 \cdot \beta \cdot b_1 \cdot (t_2 + t_1) + \beta \cdot (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2)}{2} = \frac{b_1^2(\beta + 1)}{2} - \beta \cdot b_1(t_2 + t_1) + \frac{\beta \cdot (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2)}{2} \\ 0 &= \frac{b_1^2 \cdot (\beta + 1)}{2} + \frac{2 \cdot \beta \cdot b_1(t_2 + t_1)}{2} - \frac{\beta \cdot (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2)}{2} \end{aligned}$$

Dividiendo entre β :

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{b_1^2(\beta + 1)}{\beta} + 2 \cdot b_1(t_2 + t_1) - (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2) \\ b_1^2 \left(\frac{1 + \beta}{\beta}\right) &+ 2 \cdot b_1(t_1 + t_2) - (t_1^2 + \beta \cdot t_2^2) = 0 \end{aligned}$$

Ecuación 2-28

De la que se obtiene:

$$b_1 = \frac{t_1}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \right]} + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \right] - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right)$$

Ecuación 2-29

Sustituyendo b_1 en la Ecuación 2-21, se deduce finalmente:

$$F_{v,Rk} = \frac{f_{h1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \right]} + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \right] - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right)$$

Ecuación 2-30

Modo d) Se procede como en el modo c), igualando además el momento de las tensiones de aplastamiento en la sección de la clavija que dista b_2 de la línea de corte. En esta sección se alcanza el momento máximo ($M_{y,Rk}$) anulándose el cortante:

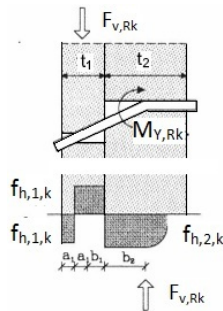
$$F_{v,Rk} = f_{h1,k} \cdot b_1 \cdot d = f_{h2,k} \cdot d \cdot b_2 = f_{h1,k} \cdot \beta \cdot d \cdot b_2$$

Ecuación 2-31

Aplicando las ecuaciones de equilibrio de fuerzas en la dirección de la carga y teniendo en cuenta la Ecuación 2-17 que relacionaba las tensiones de aplastamiento se puede llegar a:

$$b_1 = \beta \cdot b_2$$

Ecuación 2-32



$$M_{y,Rk} = -f_{h2,k} \cdot d \cdot b_2 \cdot \frac{b_2}{2} + f_{h1,k} \cdot d \cdot (b_1 + a_1) \cdot \left(b_2 + \frac{b_1 + a_1}{2} \right) - f_{h1,k} \cdot d \cdot a_1 \cdot \left(b_2 + b_1 + a_1 + \frac{a_1}{2} \right)$$

$$M_{y,Rk} = -f_{h2,k} \cdot d \cdot \frac{b_2^2}{2} + f_{h1,k} \cdot d \cdot (b_1 + a_1) \cdot \left(b_2 + \frac{b_1 + a_1}{2} \right) - f_{h1,k} \cdot d \cdot a_1 \cdot \left(b_1 + b_2 + \frac{3 \cdot a_1}{2} \right)$$

Ecuación 2-33

Teniendo en cuenta que :

$$f_{h2,k} = f_{h1,k} \cdot \beta ; 2 \cdot a_1 = t_1 - b_1 \Rightarrow a_1 = \left(\frac{t_1 - b_1}{2} \right)$$

Ecuación 2-34

Se sustituye la Ecuación 2-32 y la Ecuación 2-34 en la Ecuación 2-33 para llegar al desarrollo siguiente:

$$\begin{aligned} M_{y,Rk} &= -f_{h1,k} \cdot \beta \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{2 \cdot \beta^2} + f_{h1,k} \cdot d \cdot (b_1 + \frac{t_1 - b_1}{2}) \cdot \left(\frac{b_1}{\beta} + \frac{2 \cdot b_1 + t_1 - b_1}{4} \right) - f_{h1,k} \cdot d \cdot \frac{t_1 - b_1}{2} \cdot \left(b_1 + \frac{b_1}{\beta} + \frac{3 \cdot (t_1 - b_1)}{4} \right) \\ \frac{M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d} &= -\frac{2 \cdot b_1^2}{4 \cdot \beta} + \left(\frac{t_1 + b_1}{2} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot b_1 + \beta \cdot b_1 + \beta \cdot t_1}{4 \cdot \beta} \right) - \frac{t_1 - b_1}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot \beta \cdot b_1 + 4 \cdot b_1 + 3 \cdot \beta \cdot t_1 - 3 \cdot \beta \cdot b_1}{4 \cdot \beta} \right) \\ \frac{M_{y,Rk} \cdot 4 \cdot \beta}{f_{h1,k} \cdot d} &= -2 \cdot b_1^2 + \frac{1}{2} \cdot \left[(4 \cdot b_1^2 + \beta \cdot b_1^2 + \beta \cdot b_1 \cdot t_1 + 4 \cdot \beta \cdot t_1 + \beta \cdot b_1 \cdot t_1 + \beta \cdot t_1^2) - (\beta \cdot b_1 \cdot t_1 + 4 \cdot b_1 \cdot t_1 + 3 \cdot \beta \cdot t_1^2 - \beta \cdot b_1^2 - 4 \cdot b_1^2 - 3 \cdot \beta \cdot b_1 \cdot t_1) \right] \\ \frac{M_{y,Rk} \cdot 4 \cdot \beta}{f_{h1,k} \cdot d} &= -2 \cdot b_1^2 + \frac{1}{2} \cdot [b_1^2 \cdot (8 + 2 \cdot \beta) + b_1 \cdot (4 \cdot \beta \cdot t_1) - 2 \cdot t_1^2 \cdot \beta] \\ \frac{M_{y,Rk} \cdot 4 \cdot \beta}{f_{h1,k} \cdot d} &= b_1^2 \cdot (-2 + 4 + \beta) + b_1 \cdot (2 \cdot \beta \cdot t_1) - t_1^2 \cdot \beta_1 \\ \frac{M_{y,Rk} \cdot 4 \cdot \beta}{f_{h1,k} \cdot d} &= b_1^2 \cdot (2 + \beta) + b_1 \cdot (2 \cdot \beta \cdot t_1) - t_1^2 \cdot \beta_1 \\ b_1^2 + t_1 \cdot \frac{2 \cdot \beta}{2 + \beta} \cdot b_1 - \frac{\beta \cdot t_1^2}{2 + \beta} - \frac{M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d} \cdot \frac{4 \cdot \beta}{2 + \beta} &= 0 \end{aligned}$$

Ecuación 2-35

De la que se obtiene:

$$b_1 = \frac{t_1}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$$

Ecuación 2-36

Que se sustituye en la Ecuación 2-32:

$$F_{v,Rk} = \frac{f_{h1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$$

Ecuación 2-37

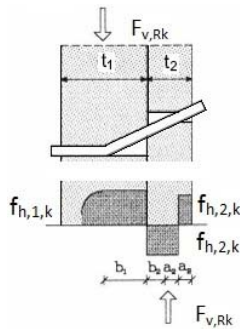
$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4,5 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$$

Ecuación 2-38. Fallo en modo d) por rótula plástica en la zona de espesor t_2 , según (DB SE M, 2009).

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4,5 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] - \left(\frac{F_{ax,Rk}}{4} \right)$$

Ecuación 2-39. Fallo en modo d) por rótula plástica en la zona de espesor t_2 , según (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).

Modo e) Como en los casos anteriores:



$$M_{y,Rk} = -f_{h1,k} \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{2} + f_{h2,k} \cdot d \cdot b_2 \cdot \left(b_1 + \frac{b_2}{2} \right) + f_{h2,k} \cdot d \cdot a_2 \cdot \left(b_1 + t_2 - \frac{a_2}{2} - a_2 \right) - f_{h2,k} \cdot d \cdot a_2 \cdot \left(b_1 + t_2 - \frac{a_2}{2} \right)$$

Se sustituye $f_{h1,k} = f_{h2,k} \cdot \beta$ y se saca factor común a $f_{h1,k} \cdot d$, según el desarrollo de la Ecuación 2-40.

$$M_{y,Rk} = f_{h1,k} \cdot d \cdot \left(\frac{-b_1^2}{2} + \beta \cdot b_2 \cdot \left(b_1 + \frac{b_2}{2} \right) + \beta \cdot a_2 \cdot \left(b_1 + t_2 - \frac{3 \cdot a_2}{2} \right) - \beta \cdot a_2 \cdot \left(b_1 + t_2 - \frac{a_2}{2} \right) \right)$$

Ecuación 2-40

Agrupando:

$$M_{y,Rk} = f_{h1,k} \cdot d \cdot \left[\frac{-b_1^2}{2} + \beta \cdot b_2 \cdot \left(b_1 + \frac{b_2}{2} \right) + \beta \cdot a_2 \cdot \left(b_1 + t_2 - \frac{3 \cdot a_2}{2} \right) - b_1 - t_2 + \frac{a_2}{2} \right]$$

Sustituyendo:

$$b_1 = \beta \cdot b_2; 2 \cdot a_2 = t_2 - b_2 \Rightarrow a_2 = \frac{t_2 - b_2}{2}$$

Ecuación 2-41

$$\frac{M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d} = \frac{-\beta^2 \cdot b_2^2}{2} + \beta \cdot b_2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \beta \cdot b_2 + b_2}{2} \right) + \beta \cdot \frac{(t_2 - b_2)}{2} \cdot \left(b_1 + t_2 - \frac{3 \cdot a_2}{2} - b_1 - t_2 + \frac{a_2}{2} \right)$$

Operando y sacando factor común:

$$\frac{M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d} = \frac{-\beta^2 \cdot b_2^2}{2} + \left(\frac{2 \cdot \beta^2 \cdot b_2^2 + \beta \cdot b_2^2}{2} \right) + \beta \cdot \frac{(t_2 - b_2)}{2} \cdot \left(\frac{-2 \cdot (t_2 - b_2)}{2} \right)$$

$$\frac{M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d} = \frac{b_2^2 \cdot (\beta^2 + \beta)}{2} + \beta \cdot \frac{(t_2 - b_2)}{2} \cdot \left(\frac{-t_2 + b_2}{2} \right)$$

$$\frac{M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d} = \frac{\beta \cdot b_2^2 \cdot (\beta + 1)}{2} + \beta \cdot \left(\frac{-t_2^2 + t_2 \cdot b_2 + t_2 \cdot b_2 - b_2^2}{4} \right)$$

Pasando β a la derecha y agrupando:

$$\frac{M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot \beta} = \frac{b_2^2 \cdot (\beta + 1)}{2} + \left(\frac{-t_2^2 + 2 \cdot t_2 \cdot b_2 - b_2^2}{4} \right)$$

Sumando las fracciones:

$$\frac{M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot \beta} = \frac{b_2^2 \cdot (2 \cdot \beta + 2)}{4} + \left(\frac{-t_2^2 + 2 \cdot t_2 \cdot b_2 - b_2^2}{4} \right)$$

$$\frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot \beta} = b_2^2 \cdot (2 \cdot \beta + 1) + 2 \cdot t_2 \cdot b_2 - t_2^2$$

Pasando $(2 \cdot \beta + 1)$ al denominador:

$$\frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot \beta \cdot (2 \cdot \beta + 1)} = b_2^2 + \frac{2 \cdot t_2 \cdot b_2}{2 \cdot \beta + 1} - \frac{t_2^2}{2 \cdot \beta + 1}$$

Se llega a la siguiente ecuación:

$$b_2^2 + \frac{\beta}{2} \cdot \frac{4 \cdot t_2 \cdot b_2}{\beta \cdot (2 \cdot \beta + 1)} - \left(\frac{\beta \cdot t_2^2}{4} - \frac{M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d} \right) \cdot \frac{4}{\beta \cdot (2 \cdot \beta + 1)} = 0$$

Ecuación 2-42

Con lo cual:

$$b_2 = -\frac{t_2}{2 \cdot \beta + 1} + \sqrt{\frac{t_2^2}{(2 \cdot \beta + 1)^2} + \frac{t_2^2}{2 \cdot \beta + 1} + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot \beta \cdot (2 \cdot \beta + 1)}}$$

Ecuación 2-43

$$F_{v,Rk} = \frac{f_{h1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$$

Ecuación 2-44

Al cual se le introduce un coeficiente de seguridad según (DB SE M, 2009).

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4,5 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$$

Ecuación 2-45. Fallo en modo e) por rótula plástica en la zona de espesor t_1 , según (DB SE M, 2009).

Según (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), se incrementa en un sumando por efecto sogá:

$$F_{v,Rk} = 1,05 \cdot \frac{f_{h1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4,5 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \left(\frac{F_{ax,Rk}}{4} \right)$$

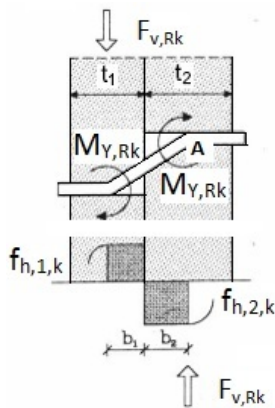
Ecuación 2-46. Fallo en modo e) por rótula plástica en la zona de espesor t_1 , según (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).

Modo f) En este caso, la carga viene dada por:

$$-M_{y,Rk} - M_{y,Rk} + f_{h1,k} \cdot d \cdot b_1 \cdot \left(b_2 + \frac{b_1}{2} \right) - f_{h2,k} \cdot d \cdot b_1 \cdot \frac{b_2}{2} = 0$$

Ecuación 2-47

Tomando equilibrio de momentos desde A:



$$-M_{y,Rk} - M_{y,Rk} + f_{h1,k} \cdot d \cdot b_1 \cdot \left(b_2 + \frac{b_1}{2} \right) - f_{h2,k} \cdot d \cdot b_1 \cdot \frac{b_2}{2} = 0$$

Ecuación 2-48

Pasando los momentos al otro lado de la igualdad y sustituyendo:

$$2 \cdot M_{y,Rk} = f_{h1,k} \cdot d \cdot b_1 \cdot \left(b_2 + \frac{b_1}{2} \right) - f_{h1,k} \cdot d \cdot \beta \cdot \frac{b_2^2}{2}$$

$$M_{y,Rk} + M_{y,Rk} = f_{h1,k} \cdot d \cdot b_1 \cdot \left(b_2 + \frac{b_1}{2} \right) - \beta \cdot f_{h1,k} \cdot d \cdot \frac{b_2^2}{2}$$

Ecuación 2-49

Pasando la tensión a la izquierda:

$$\frac{2 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d} = b_1 \cdot \left(b_2 + \frac{b_1}{2} \right) - \beta \cdot \frac{b_2^2}{2}$$

Ecuación 2-50

Teniendo en cuenta la relación: $b_2 = \frac{b_1}{\beta}$ Ecuación 2-11 y operando:

$$\frac{2 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d} = b_1 \cdot \left(\frac{b_1}{\beta} + \frac{b_1}{2} \right) - \beta \cdot \frac{b_1^2}{\beta^2 \cdot 2} = b_1^2 \cdot \left(\frac{2 + \beta}{2 \cdot \beta} - \frac{1}{2 \cdot \beta} \right) = b_1^2 \cdot \left(\frac{1 + \beta}{2 \cdot \beta} \right)$$

$$b_1^2 = \frac{2 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d} \cdot \frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}$$

Ecuación 2-51

Haciendo la raíz cuadrada:

$$b_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}}$$

Ecuación 2-52

$$F_{v,Rk} = f_{h1,k} \cdot d \cdot b_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h1,k} \cdot d}$$

Ecuación 2-53

Al cual se le introduce un coeficiente de seguridad según (DB SE M, 2009).

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h1,k} \cdot d}$$

Ecuación 2-54. Fallo en modo f) por doble rótula plástica, según (DB SE M, 2009).

Según (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), se introduce un sumando por efecto sogá:

$$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h1,k} \cdot d} + \left(\frac{F_{ax,Rk}}{4} \right)$$

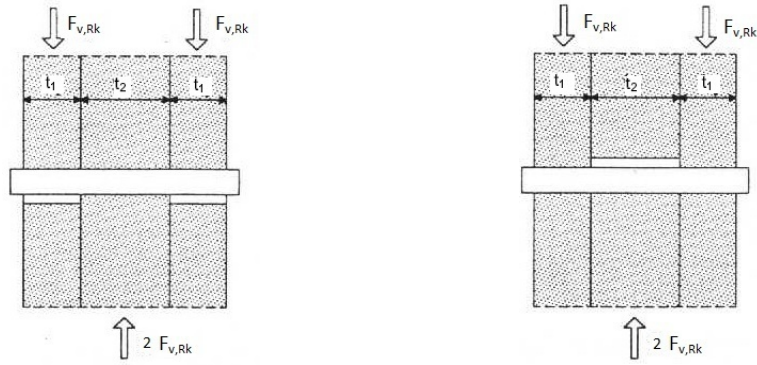
Ecuación 2-55. Fallo en modo f) por doble rótula plástica, según (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).

Para los tres últimos casos, modos de fallo d), e) y f), la fuerza axial generada en el fuste inclinado tiene una componente en la dirección de la carga aplicada, con lo que se mejora la capacidad de carga.

La norma (DB SE M, 2009) aumenta un 5 % la capacidad de carga ($F_{v,Rk}$) en el modo de fallo e) (a través del coeficiente 1,05), y en un 15 % la capacidad de carga para el modo de fallo f). Determinados autores (Argüelles et al., 2003) relacionan también estos coeficientes con la mejora en la capacidad de carga por efecto sogá. En el caso del Eurocódigo 5 (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), el último sumando $\left(\frac{F_{ax,Rk}}{4} \right)$, añadido a la Ecuación 2-55 supone un incremento del 25 % debido a la componente de fuerza axial o capacidad de carga a la extracción del elemento de fijación ($F_{ax,Rk}$), como contribución por efecto sogá en la capacidad de carga de la unión ($F_{v,Rk}$). Dada la importancia de este componente para el trabajo objeto de estudio, será desarrollado con detalle en el Apartado 2.7.6 y en capítulos posteriores.

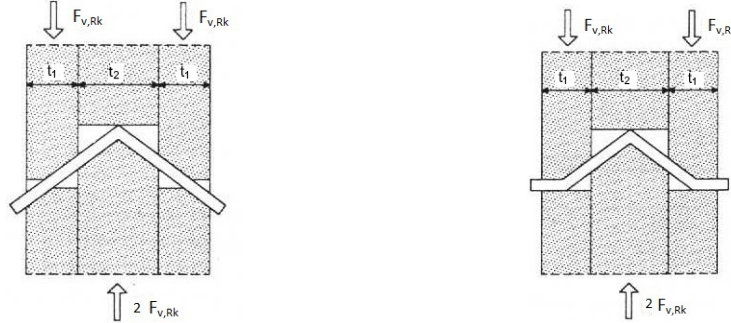
2.7.3.2 Uniones madera-madera en cortadura doble

En el caso de cordadura doble, el número posible de fallos se reduce a los cuatro representados en la Figura 2-48 debido a la simetría de la unión.



Modo 1) Aplastamiento en piezas de madera laterales.

Modo 2) Aplastamiento en pieza de madera central.



Modo 3) Rótula central en clavija.

Modo 4) Rótulas en clavija central y laterales.

Figura 2-48. Modos de fallo en cortadura doble.

Modo 1) Aplastamiento de las piezas de espesor t_1 laterales.

$$F_{v,Rk1} = f_{h1,k} \cdot t_1 \cdot d$$

Ecuación 2-56

Modo 2) Aplastamiento de las piezas de espesor t_2 central.

$$F_{v,Rk2} = 0,5 \cdot f_{h2,k} \cdot t_2 \cdot d$$

Ecuación 2-57

Modo 3) Aplastamiento local en las piezas de madera, con fallo por flexión en el centro de la clavija.

$$F_{v,Rk3} = 1,05 \cdot \frac{f_{h1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$$

Ecuación 2-58

Modo 4) Aplastamiento local en las piezas de madera, con fallo por flexión en el centro y extremos de la clavija.

$$F_{v,Rk4} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h1,k} \cdot d}$$

Ecuación 2-59

Hay que reseñar que la capacidad de carga ($F_{v,Rk}$) es por plano de cortante y por elemento de fijación. Por lo tanto, la capacidad de carga total de la unión es $2 \cdot F_{v,Rk}$.

2.7.3.3 Uniones madera-acero

Para el desarrollo de las ecuaciones de Johansen en uniones madera-acero se distinguen dos tipos de placas de acero: de espesor grueso si $t > 0,5 \cdot d$, o delgado si $t \leq 0,5 \cdot d$. Así mismo, se diferencian dos casos según que la clavija

esté o no empotrada en la placa, pues en el caso de placas de espesor grueso éstas impiden la deformación de la clavija, tratándose de modo similar al empotramiento.

Se muestran distintos modos de fallo en cortadura simple (Figura 2-49) y en cortadura doble (Figura 2-50).

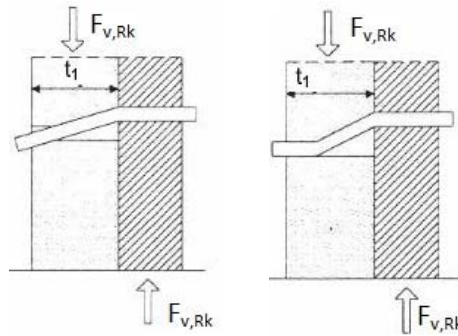


Figura 2-49. Modos de fallo en cortadura simple con chapa de madera.

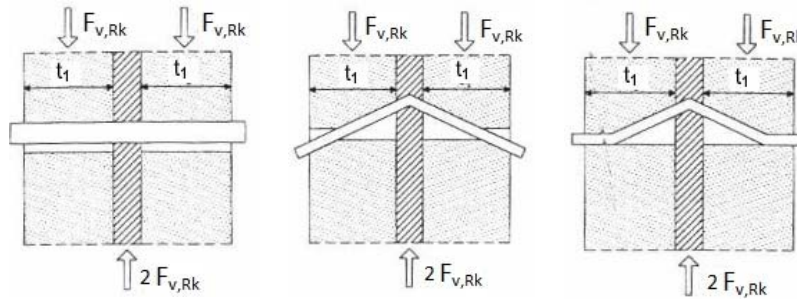


Figura 2-50. Modos de fallo en cortadura doble con madera y chapa central.

Los modos de fallo en cortadura doble en placas de acero laterales y delgadas se muestran en la Figura 2-51, y los modos de fallo en cortadura doble con placas de acero laterales gruesas, en la Figura 2-52. La diferencia entre las dos tipologías viene dada por la capacidad de la placa de recoger o no momento.

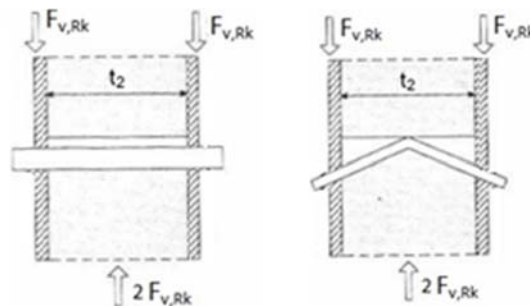


Figura 2-51. Modos de fallo con madera y chapas delgadas laterales.

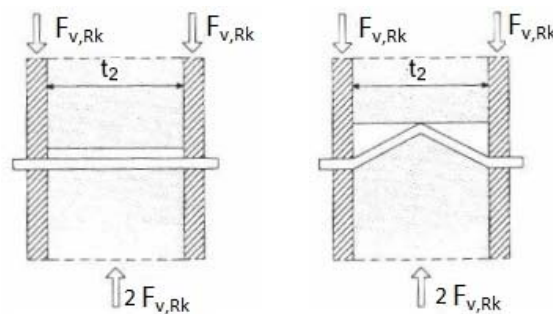


Figura 2-52. Modos de fallo con madera y chapas gruesas laterales.

2.7.4 Resistencia al aplastamiento en la madera por el elemento de unión

El valor de la resistencia al aplastamiento de la madera queda condicionado al elemento de unión con el parámetro $f_{h,k}$. Su valor se indica en la Tabla 2-15 (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).

Tabla 2-15. Resistencia al aplastamiento de la madera para distintos tipos de clavijas (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).

Clavos	En madera sin pretaladro	$f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \text{ N/mm}^2$ <p style="text-align: center;">Ecuación 2-60</p>
	En madera con pretaladro	$f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \text{ N/mm}^2$ <p style="text-align: center;">Ecuación 2-61</p>
	En tablero contrachapado	$f_{h,k} = 0,11 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \text{ N/mm}^2$ <p style="text-align: center;">Ecuación 2-62</p>
	En tablero de fibras duro	$f_{h,k} = 30 \cdot t^{0,6} \cdot d^{-0,3} \text{ N/mm}^2$ <p style="text-align: center;">Ecuación 2-63</p>
	En tableros de partículas y de virutas orientadas (OSB)	$f_{h,k} = 65 \cdot t^{0,1} \cdot d^{-0,7} \text{ N/mm}^2$ <p style="text-align: center;">Ecuación 2-64</p>
Pernos	En madera, con diámetro no superior a 30 mm	$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$ <p style="text-align: center;">Ecuación 2-65</p> <p>Siendo:</p> <p>$f_{h,0,k}$ resistencia de aplastamiento en dirección paralela a la fibra:</p> $f_{h,0,k} = 0,82 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k$ <p style="text-align: center;">Ecuación 2-66</p> <p>k_{90} factor dependiente de la clase de madera:</p> $k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \quad \text{para coníferas.}$ <p style="text-align: center;">Ecuación 2-67</p> $k_{90} = 0,90 + 0,015 \cdot d \quad \text{para frondosas.}$ <p style="text-align: center;">Ecuación 2-68</p>
	En tablero contrachapado	$f_{h,k} = 0,11 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k$ <p style="text-align: center;">Ecuación 2-69</p>
	En tableros de partículas y de virutas orientadas (OSB)	$f_{h,k} = 50 \cdot t^{0,2} \cdot d^{-0,6} \text{ N/mm}^2$ <p style="text-align: center;">Ecuación 2-70</p>
Pasadores		Se aplican las mismas expresiones que en pernos.
Tirafondos		Si el diámetro de los tirafondos es menor de 8 mm, se aplican las mismas expresiones que para clavos. Si es mayor o igual, las definidas para pernos.
ρ_k densidad, en Kg/m ³		d diámetro, en mm
		t espesor, en mm

A partir de la resistencia al aplastamiento de cálculo se obtiene la de cálculo mediante la Ecuación 2-71.

$$f_{h,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{h,k}}{\gamma_m}$$

Ecuación 2-71

Siendo:

- $f_{h,d}$ resistencia de cálculo al aplastamiento en uniones con elementos de fijación, en N/mm².
- $f_{h,k}$ resistencia característica al aplastamiento en uniones con elementos de fijación, en N/mm².
- γ_m coeficiente parcial de seguridad. A determinar según la Tabla 2-16, aunque hay autores que fijan este valor en $\gamma_m = 1,3$ independientemente del tipo de madera (Argüelles et al., 2003).
- k_{mod} factor de modificación, que tiene fijados sus valores según la Tabla 2-17, teniendo en cuenta la duración y combinación de la carga y la clase de servicio (DB SE M, 2009).

Tabla 2-16. Coeficientes parciales de seguridad del material γ_m [según (DB SE M, 2009) Tabla 2.3].

Situaciones persistentes y transitorias:	γ_m
Madera maciza	1,30
Madera laminada encolada	1,25
Madera microlaminada, tablero contrachapado, tablero de virutas orientadas	1,20
Tablero de partículas y tableros de fibras (duros, medios, densidad media, blandos)	1,30
Uniones	1,30
Placas clavo	1,25
Situaciones extraordinarias	1,0

Tabla 2-17. Valores del factor de modificación k_{mod} [según (DB SE M, 2009) Tabla 2.4].

Material	Norma	Clase de servicio	Clase de duración de la carga				
			Permanente	Larga	Media	Corta	Instantánea
Madera maciza Madera laminada encolada Madera microlaminada	UNE-EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	UNE-EN 14080	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	UNE-EN 14374 UNE-EN 14279	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Tablero contrachapado	UNE-EN 636						
	Tipo EN 636-1,2 y 3	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	Tipo EN 636-2 y 3	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	Tipo EN 636-3	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Tablero de virutas orientadas (OSB) *	UNE-EN 300						
	OSB/2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	OSB/3, OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	OSB/3, OSB/4	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Tablero de partículas	UNE-EN 312						
	Tipo P4, Tipo P5	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	Tipo P5	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
	Tipo P6, Tipo P7	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	Tipo P7	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Tablero de fibras duro	UNE-EN 622-2						
	HB.LA, HB.HLA 1 o 2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	HB.HLA 1 o 2	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Tablero de fibras semi-duro	UNE-EN 622-3						
	MBH.LA 1 o 2,	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	MBH.HLS1 o 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	MBH.HLS1 o 2	2	-	-	-	0,45	0,80
Tablero de fibras MDF	UNE-EN 622-5						
	MDF.LA, MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	MDF.HLS	2	-	-	-	0,45	0,80

*OSB = Oriented Strand Board. El acrónimo es usado con frecuencia en lengua inglesa y se ha acuñado como un nombre usual para el material en otros idiomas, como de hecho sucede en español.

La Ecuación 2-71 expuesta anteriormente para determinar la resistencia de cálculo al aplastamiento, es una particularización de la Ecuación 2-72, que permite calcular de forma general, el valor de cálculo de una propiedad del material a partir del valor característico.

$$X_d = k_{\text{mod}} \left(\frac{X_k}{\gamma_m} \right)$$

Ecuación 2-72

Siendo:

- X_k valor característico de una propiedad del material.
- X_d valor de cálculo de una propiedad del material.
- γ_m coeficiente parcial de seguridad.
- k_{mod} factor de modificación. Tiene en cuenta el contenido de humedad y la duración de la carga en los valores resistentes.

2.7.5 Resistencia a la flexión en la clavija. Momento plástico

Es necesario determinar el momento flector que produce la plastificación completa del elemento pasante. Se trata de forma semejante al caso de los clavos, cuyo momento se define en la norma (UNE-EN 409, 1998), sometiendo el clavo a un momento flector hasta producir una deformación de 45°. Se definen la geometría y esfuerzos, según la Figura 2-53.

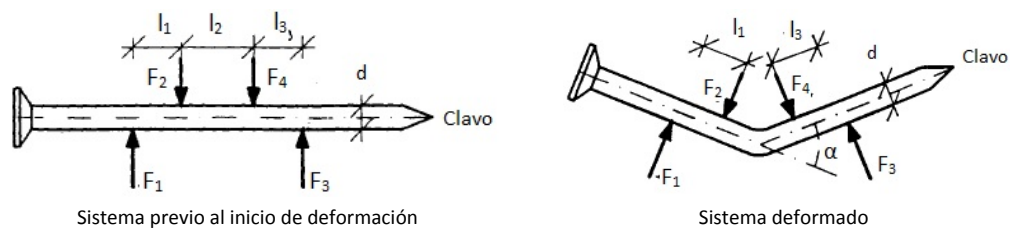


Figura 2-53. Situación de las cargas aplicadas en ensayos de clavos.

Este ensayo puede ser extendido a pernos (Branco, 2009), según se muestra en la Figura 2-54.



Figura 2-54. Ensayos de flexión sobre pernos.

A partir de un valor representativo del momento de flexión sobre el clavo o el perno, se determina el momento plástico ($M_{y,k}$), teniendo en cuenta que el momento plástico de diseño empleado en el cálculo se obtendrá de la Ecuación 2-73.

$$M_{y,d} = \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_a}$$

Ecuación 2-73

Siendo:

- γ_a coeficiente parcial de seguridad para el acero. Se tomará $\gamma_a = 1,1$ según (Argüelles et al., 2003).
- $M_{y,Rk}$ momento plástico característico de un elemento mecánico de fijación, en N·mm. Según el tipo de la unión se define por la Tabla 2-18 obtenida a partir de ensayos.

Tabla 2-18. Momento plástico para distintos tipos de uniones.

Elemento de unión		DB SE M, 2009	Arguelles, 2003
Clavos	En clavos de sección circular	$M_{y,Rk} = \frac{f_{u,k}}{600} \cdot 180 \cdot d^{2,6}$	$M_{y,Rk} = 180 \cdot d^{2,6}$ Con resistencia a tracción de 600 N/mm ²
	En clavos de sección cuadrada	$M_{y,Rk} = \frac{f_{u,k}}{600} \cdot 270 \cdot d^{2,6}$	$M_{y,Rk} = 270 \cdot d^{2,6}$
Pernos y pasadores	En madera, con diámetro no superior a 30 mm	$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$	$M_{y,Rk} = 0,8 \cdot f_{u,k} \cdot \frac{d^3}{6}$
Grapas		$M_{y,Rk} = 240 \cdot d^{2,6}$ Con resistencia a tracción de 800 N/mm ²	
Tirafondos	Si el diámetro del tirafondo es menor de 8 mm, se aplican las mismas expresiones que a clavos, y si es mayor o igual, las definidas para pernos. Se tomará como sección un diámetro eficaz $d_{ef} = 0,9 \cdot d$, siendo "d" el diámetro de caña. Si la longitud de la caña no es inferior a 4·d, puede utilizarse directamente el diámetro de caña.		

Otras notaciones referidas son:

- d diámetro, en mm.
- $f_{u,k}$ resistencia a tracción de la clavija, en N/mm².
- $f_{h1,k}$ resistencia característica de aplastamiento en la pieza de espesor t_1 , en N/mm².
- $f_{h2,k}$ resistencia característica de aplastamiento en la pieza de espesor t_2 , en N/mm².

2.7.6 Efecto sogá

2.7.6.1 Carga de arranque en el medio de fijación

El efecto sogá, o de cable, es un esfuerzo significativo en los clavos de fuste liso, que actúa sobre la cabeza de los mismos, con carga axial que se describe en la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). En definitiva, se trata de un sistema de acciones que aumentan la resistencia por transmisión de esfuerzos en dirección axial a la clavija, en una unión atornillada porque las cargas que soporta la unión pueden distribuirse hacia los extremos atornillados. Por ejemplo, cuando se produce gran deslizamiento, los extremos del perno tienden a deslizar hacia el interior, mientras que las tuercas y arandelas resisten este movimiento y, por lo tanto, quedan sometidas a la acción contrapuesta.

En la Ecuación 2-39 y la Ecuación 2-46 se vio que, en determinadas normas se consideraba un valor de fuerza axial ($F_{ax,Rk}$), contribuyendo a la resistencia de la clavija determinada por $F_{v,Rk}$. Para ello, se fija un porcentaje sobre el máximo valor entre los siguientes:

- Clavos de sección circular: 15 % máximo.
- Clavos de sección cuadrada y ranurados: 25 % máximo.
- Otros tipos de clavos: 50 % máximo.
- Tirafondos: 100 % máximo.
- Pernos: 25 % máximo.
- Pasadores y elementos en los que se desconoce el efecto sogá: 0 %.

El efecto sogá depende del tipo y dimensiones de la clavija, de la densidad de la madera y de la profundidad de penetración de la clavija en la madera. Según la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), el efecto sogá para los clavos distintos a los de fuste liso, tal y como se describen en la norma europea (UNE EN 14592, 2012), responde a la Ecuación 2-74 y, en el caso de los clavos de fuste liso, a la Ecuación 2-75.

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 \end{cases}$$

Ecuación 2-74. Efecto sogá en clavos distintos a los de fuste liso.

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{ax,k} \cdot d \cdot t_h + f_{head,k} \cdot d_h^2 \end{cases}$$

Ecuación 2-75. Efecto sogá en clavos de fuste liso.

Siendo:

- $f_{ax,k}$ valor característico de la resistencia al arranque en la pieza de punta.
- $f_{head,k}$ valor característico de la resistencia al punzonamiento de la cabeza del clavo.
- d diámetro del clavo de acuerdo.
- t_{pen} longitud de penetración en la pieza de punta o la longitud de la parte corrugada en la pieza de punta.
- t_h espesor de la pieza de cabeza.
- d_h diámetro de la cabeza del clavo.
- $F_{ax,Rk}$ capacidad de carga a la extracción del elemento de fijación.

Para una penetración en la pieza de punta igual a $12 \cdot d$:

$$f_{ax,k} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

Ecuación 2-76

$$f_{head,k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

Ecuación 2-77

Siendo:

- ρ_k valor característico de la densidad de la madera, en kg/m^3 .

Si la penetración en la pieza de punta es menor que $12 \cdot d$, los valores anteriores deberán reducirse por el factor definido en la Ecuación 2-78.

$$\frac{t_{pen}}{4 \cdot d} - 2$$

Ecuación 2-78

2.7.6.2 Pretensado en la clavija

Una forma de mejorar el efecto sogá es disponer fijaciones en los extremos exteriores de la clavija. Para ello es habitual la colocación de tuercas y arandelas que, además de mejorar la rigidez inicial, aumentan la capacidad de carga en la unión a medida que se produce el deslizamiento en la misma (Awaludin et al., 2008). El modelo de dimensionado indicado en la norma (DB SE M, 2009) estima una contribución en la capacidad de carga de la unión por efecto sogá ($F_{ax,Rk}$), pero realmente esta contribución depende de la situación del ángulo de rótula (Blass et al., 2000), y de la resistencia que presente el sistema de fijación. Si se pretende conseguir el efecto sogá con tuerca y arandela, el diseño debe contemplar una variable inicial de esfuerzo axial relacionada con el pretensado que se aplique. En este sentido, hay autores (Ritter et al., 1995) que han aplicado un pretensado para mejorar el rendimiento estructural de uniones integradas en puentes de madera. En cualquier caso, la aplicación de

pretensados también mejora la capacidad de carga en el estado inicial (independientemente del ángulo de clavija), al incrementar la fuerza de contacto en las intercaras de madera y, en consecuencia, las fuerzas de fricción, como muestra el segundo sumando de la Ecuación 2-79.

$$F_{v,Rk} = f_{h,\alpha,k} \cdot b \cdot d + \mu \cdot F_{axil-Clav}$$

Ecuación 2-79

El pretensado de la clavija también mejora los ciclos de histéresis (Awaludin et al., 2007), y no supone efectos negativos sobre la ductilidad del conjunto, lo que es un factor importante a tener en cuenta en estados de sismo para la estructura. Un amplio grupo japonés de investigadores ya citados (Awaludin et al., 2008) y (Awaludin et al., 2007) se han fijado en estos aspectos.

2.7.7 Efecto hienda

Cuando en una unión la fuerza actúa con un ángulo α con respecto a la dirección de la fibra, deberá tenerse en cuenta el efecto de hienda debido a las tensiones provocadas por la componente de la fuerza de tracción perpendicular a la fibra ($F \cdot \sin \alpha$). La Figura 2-55 muestra un ejemplo de la aparición de efectos de hienda, que deben considerarse como un factor de fallo según la normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).



Figura 2-55. Efecto hienda.

En este caso, a no ser que se realice un cálculo más detallado, debe cumplirse la condición:

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd}$$

Siendo:

$$F_{v,Ed} = \max \begin{cases} F_{v,Ed1} \\ F_{v,Ed2} \end{cases}$$

Ecuación 2-80

- $F_{v,ed1}, F_{v,ed2}$ cargas de cálculo de los esfuerzos cortantes a cada lado de la unión.
- $F_{90,Rd}$ valor de cálculo frente a la hienda, que se define a partir de su valor característico $F_{90,Rk}$. En coníferas, viene definido según la Ecuación 2-81.

$$F_{90,Rk} = 14 \cdot b \cdot w \cdot \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}}$$

Ecuación 2-81

Siendo:

- w factor de modificación, de valor 1, en mm, salvo en placas dentadas, donde toma un valor de

$$w = \left(\frac{w_{pl}}{100} \right)^{0,35} \geq 1, \text{ siendo el ancho de la placa dentada } (w_{pl}) \text{ en dirección paralela a la fibra.}$$

- $F_{90,Rk}$ valor característico de la capacidad de carga frente a la hienda, en N.
- h_e distancia desde el borde cargado de la pieza central al eje del elemento mecánico más alejado, en mm.
- b espesor de la pieza central, en mm.
- h altura de la pieza central, en mm.

Por otro lado, se debe tener presente que, en las zonas de unión sometidas a cizallamiento, compresión o tracción perpendicular a la fibra, la calidad de la madera deberá corresponder al menos con la clase resistente C22, según indica la norma (UNE-EN 338, 2010).

2.7.8 Número eficaz de elementos de fijación

Una forma de lograr una distribución tensional que evite fallos locales es distribuir el esfuerzo en distintos elementos de fijación. El número eficaz de elementos de fijación en uniones con pernos alineados en dirección de la fibra, y sometidos a una componente de fuerza paralela a la fibra, se determina teniendo en cuenta la capacidad de carga, que deberá calcularse tomando como número eficaz de pernos el menor valor de las expresiones siguientes:

$$n_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} n \\ n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d}} \end{array} \right.$$

Ecuación 2-82

Siendo:

- n_{ef} número eficaz de pernos alineados con la carga y la fibra.
- n número de pernos alineados.
- a_1 separación en la dirección de la fibra, en mm.
- d diámetro del perno, en mm.

En caso de carga perpendicular a la fibra, el número eficaz de pernos se tomará considerando $n_{ef} = n$. Para cargas con direcciones comprendidas entre 0° y 90° , se interpola linealmente entre los valores determinados anteriormente.

2.7.9 Separaciones y distancias entre clavijas y conjuntos de ellas

En las separaciones y distancias mínimas se deben considerar posibles fallos por hienda, por lo que hay que respetar una serie de indicaciones relacionadas con la separación entre pernos cuando requieren pretaladro, según la Tabla 2-19. En el caso de clavos, cuando el diámetro es menor o igual a 8 mm, se suele prescindir de pretaladro, pero también hay que respetar separaciones mínimas, según la Tabla 2-20.

Estas separaciones mínimas limitan la interacción de tensiones de aplastamiento provocadas por las distintas clavijas, y la superposición de componentes de la fuerza de tracción perpendicular a la fibra entre dos o más clavijas.

Tabla 2-19. Uniones con pernos. Separaciones y distancias mínimas [según (DB SE M, 2009) Tabla 8.4].

Separaciones y distancias	Ángulo	Separación o distancia mínima
a_1 (paralela a la fibra)	$0^\circ < \alpha < 360^\circ$	$(4 + \cos \alpha) \cdot d$
a_1 (perpendicular a la fibra)	$0^\circ < \alpha < 360^\circ$	$4 \cdot d$
$a_{3,t}$ (testa cargada)	$-90^\circ < \alpha < 90^\circ$	máx (7·d:80 mm)
$a_{3,c}$ (testa no cargada)	$90^\circ < \alpha < 150^\circ$	$(1+6 \cdot \sin \alpha) \cdot d$
	$150^\circ < \alpha < 210^\circ$	4d
	$210^\circ < \alpha < 270^\circ$	$(1+6 \cdot \sin \alpha) \cdot d$
$a_{4,t}$ (borde cargado)	$0^\circ < \alpha < 180^\circ$	máx ((2+2·sen α)·d,3·d)
$a_{4,c}$ (borde no cargado)	$180^\circ < \alpha < 360^\circ$	3·d

Tabla 2-20. Separaciones en uniones con clavos [según norma (DB SE M, 2009) Tabla 8.2].

Separaciones y distancias	Ángulo	Distancia mínima		
		Sin pretaladro		Con pretaladro
		$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 \text{ kg/m}^3 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$	
a_1 (paralela a la fibra)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$d < 5 \text{ mm}; (5+5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$ $d \geq 5 \text{ mm}; (5+7 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(7+8 \cos \alpha) \cdot d$	$(4 + \cos \alpha) \cdot d$
a_2 (perpendicular a la fibra)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	5·d	7·d	$(3 + \sin \alpha) \cdot d$
a_{3t} : (testa cargada)	$90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(10+5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(15+5 \cos \alpha) \cdot d$	$(7+5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$
a_{3c} : (testa no cargada)	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	10·d	15·d	7·d
a_{4t} (borde cargado)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$d < 5 \text{ mm}; (5+2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d \geq 5 \text{ mm}; (5+5 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$d < 5 \text{ mm}; (7+2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d > 5 \text{ mm}; (7+5 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$d < 5 \text{ mm}; (3+2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d > 5 \text{ mm}; (3+4 \cdot \sin \alpha) \cdot d$
$a_{4,c}$ (borde no cargado)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	5·d	7·d	3·d

Donde los valores de distancias (a) se reflejan en la Figura 2-56.

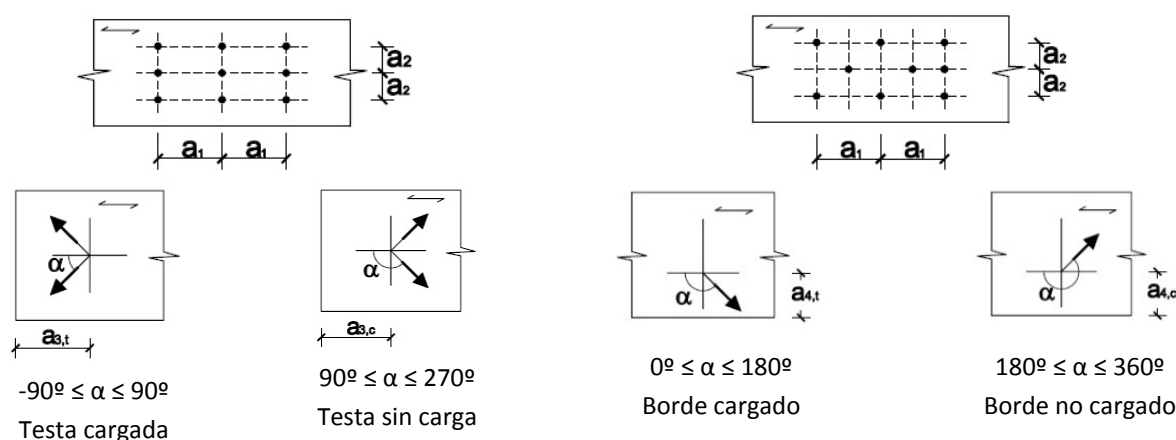


Figura 2-56. Separaciones, distancias y ángulo α .

2.7.10 Resistencia al fuego de uniones mecánicas

Las uniones no protegidas con piezas laterales de madera, conectadas mediante clavos, tirafondos, pernos o pasadores, se consideran estables al fuego durante 15 minutos (R-15), según se muestra en la Tabla 2-21. Los pasadores, si están adecuadamente sobredimensionados, pueden llegar a presentar resistencias durante 30 minutos. Es posible mejorar los tiempos de estabilidad, hasta llegar a R-30 y R-60, incrementando la protección de la unión.

Tabla 2-21. Resistencia al fuego de uniones no protegidas con piezas laterales de madera [según (DB SI, 2010) Tabla E.5].

	Resistencia al fuego	Condiciones
Clavos lisos	R-15	$d > 2,8 \text{ mm}^{(1)}$
Tirafondos	R-15	$d > 3,5 \text{ mm}^{(1)}$
Pernos	R-15	$t_1 > 45 \text{ mm}^{(2)}$
Pasadores	R-20	$t_1 > 45 \text{ mm}^{(2)}$
Conectores	R-15	$t_1 > 45 \text{ mm}^{(2)}$

⁽¹⁾ d es el diámetro de la clavija.
⁽²⁾ t₁ es el espesor de la pieza lateral.

Debe tenerse en cuenta todo lo referente a resistencia al fuego de la estructura de madera visto en el Apartado 2.4.11 y, de forma más detallada, la profundidad, tiempo y velocidad de carbonización que se describen en el Anejo SI E “Resistencia al fuego de las estructuras de madera” perteneciente a la normativa (DB SI, 2010).

En él se indica el tratamiento de uniones para distintos elementos de unión como clavos, pernos, pasadores y conectores de anillo y de placa de acuerdo con la norma (UNE-EN 912, 2011), así como para barras encoladas. En uniones realizadas con pasadores, clavos o tirafondos (en los que la cabeza no sobresalga de la superficie de la pieza), pueden presentar resistencias al fuego superiores, hasta R-60. Si se recubren los elementos de fijación, como se puede apreciar en la Figura 2-57, se consideran uniones protegidas, llegando también a una resistencia R-60.

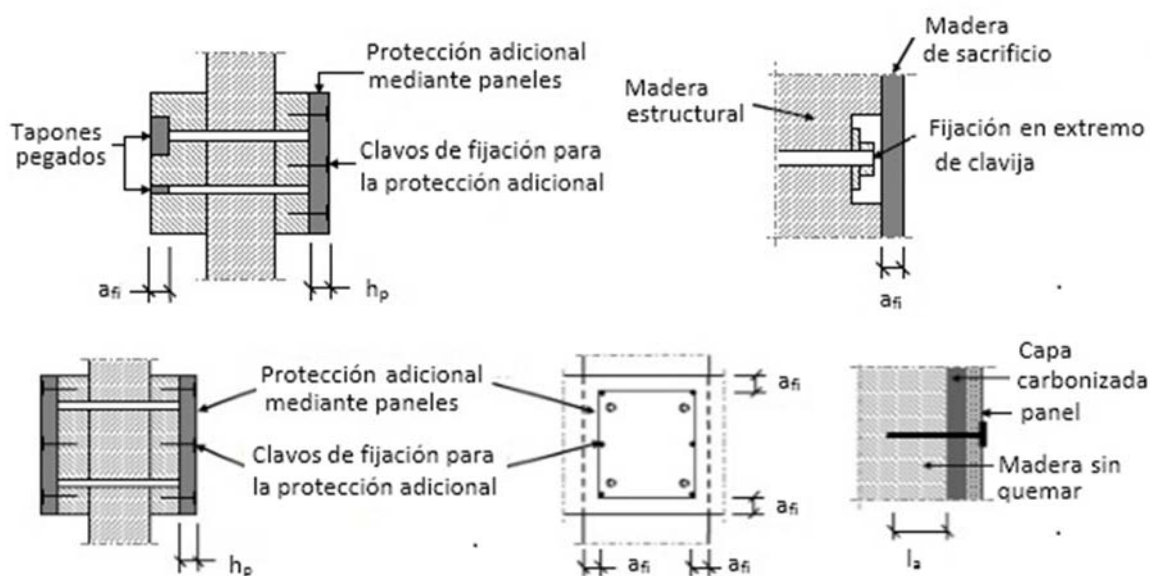


Figura 2-57. Composiciones de protección frente a fuego en uniones con clavijas.

La evolución del fuego en uniones de madera con clavija ha sido estudiada por distintos autores (Erchinger, 2010) (Palma, 2013). Los trabajos de simulación numérica muestran que las zonas de carbonización son más relevantes en la periferia de la madera, pero la introducción de clavijas y elementos metálicos incrementa la temperatura en el núcleo de la madera y, con ello, la velocidad de carbonización (Figura 2-58). Para los ensayos de resistencia a fuego en uniones de madera las consecuencias son análogas. En los primeros minutos, la carbonización se presenta en la periferia de la madera (Figura 2-59), pero un número más elevado de clavijas y elementos metálicos facilita la acción del fuego, debilitando la unión frente al resto de la estructura. En consecuencia, es aconsejable el empleo de un número de clavijas lo más reducido posible, además de la protección de los elementos metálicos.

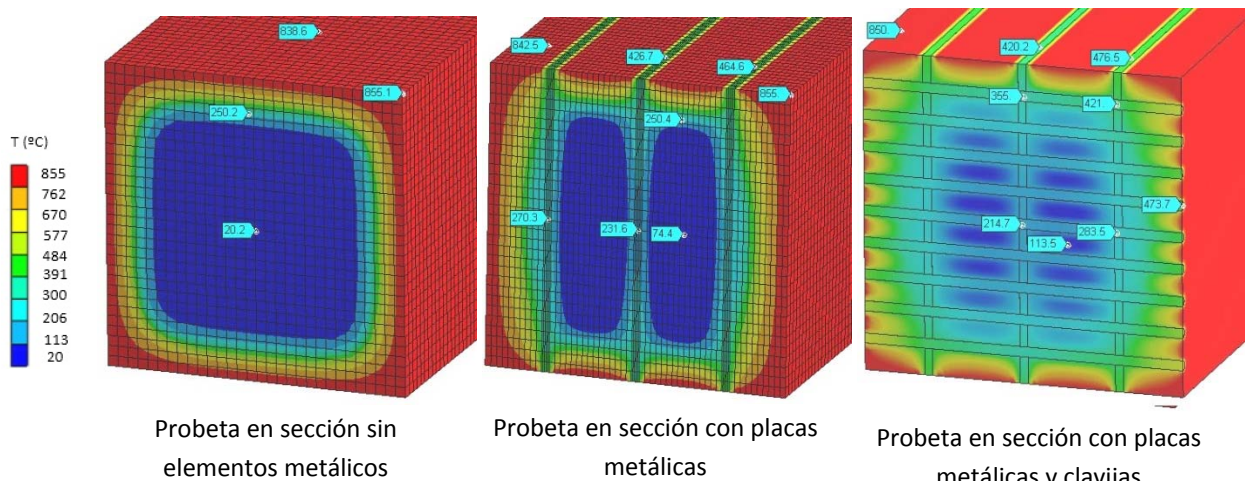


Figura 2-58. Simulación numérica de resistencia a fuego en unión con clavija (Erchinger, 2010).



Figura 2-59. Ensayo de resistencia al fuego en unión con clavija (Palma, 2013).

No se deben efectuar comprobaciones de deformación de las estructuras, bajo situación de incendio, si no forman parte de un elemento que protege de las llamas o separador de sectores de incendio. En este caso, la comprobación se hace para una hipótesis combinada de servicio (ELS), que simule las intensidades de las cargas en la situación de incendio, y que se hará coincidir con las de la comprobación última a fuego (ELU). Sin embargo, en consideración al documento de seguridad en caso de incendio (DB SI, 2010) para $R \leq 60$ minutos, las uniones sí deben ser comprobadas en situación de incendio, ya que suponen el punto débil en las estructuras. Para mejorar este comportamiento hasta R-30 o R-60 se requiere incrementar:

- los espesores de las piezas laterales.
- las distancias a testa y borde de los medios de unión, y la longitud y/o anchura de los laterales.

Para el aumento de las distancias a la testa y a los bordes se emplea la Ecuación 2-83.

$$a_{fi} = \beta_n \cdot k_{flux} \cdot (t_{req} - t_{fi,d})$$

Ecuación 2-83

Siendo:

- a_{fi} distancias a la testa y a los bordes de la madera, en mm.
- β_n velocidad de carbonización eficaz, en mm/min.
- k_{flux} coeficientes de flujo de calor a través del elemento. Típicamente toma un valor de 1,5.
- t_{req} tiempo requerido de resistencia al fuego, en minutos.
- $t_{fi,d}$ tiempo requerido de resistencia al fuego para la unión no protegida, en minutos. Descrito en la Tabla 2-21.

La ignifugación es otra técnica para mejorar la resistencia al fuego. Influye sobre el inicio de la combustión y la retarda. Con la ignifugación baja el índice de inflamabilidad y combustibilidad (M) y, en consecuencia aumenta la resistencia y estabilidad al fuego (R). En las técnicas de ignifugación se aplican tratamientos químicos o protecciones que actúan como “pantalla”. En general, estos tratamientos actúan con distintas estrategias:

- Aumentado la humedad en la madera. Dado que el calor latente de cambio de fase suele ser alto, resulta interesante que la superficie exterior de la madera pueda fijar cierta cantidad de agua, lo que evita la elevación de la temperatura y retarda la descomposición de la madera. Para conseguir esto, se impregna la madera con materiales que reducen la tensión superficial del agua, como los silicatos alcalinos.
- Aumentando la envoltura de carbón vegetal. Se aplican fosfatos que consiguen disminuir los gases combustibles y la incandescencia del carbón.
- Desprendimiento de gases no combustibles propios de los materiales de protección y de la propia madera. Con esta técnica se retrasa la propagación del fuego, pero presenta el inconveniente de que, en algún caso, estos gases pueden ser tóxicos.
- Inhibición química. Implica combinaciones químicas durante el proceso de reacción en cadena de la combustión, dando lugar a elementos más inertes y menos reactivos. Como en el caso anterior, originan gases tóxicos que se deben atenuar con otros aditivos. Esta técnica de ignifugación supone tratar la madera con halógenos como: flúor, cloro, boro, yodo.
- Separación del comburente. Esencialmente, implica formar barreras frente al aire al fundirse material ignifugante a temperaturas menores a la combustión de la madera. En este proceso se rellenan los poros de la madera, taponando la entrada de aire. Entre los materiales más comunes para esta técnica está la aplicación de bórax o la formación de espumas estables, del tipo urea, caseína y los fosfatos amónicos. Son los llamados productos intumescentes.

Cuando se opta por la aplicación de productos químicos, se complementan con otros que aportan efectos de tipo fungicida e insecticida. En su formato comercial se pueden citar el cloruro de cinc, sulfato amónico y ácido bórico (que forman parte del “Pyresote”), el sulfato amónico y ácido bórico (componentes principales del “Minalith”) y el cloruro de cinc cromado.

En general, se opta por el redimensionado de la madera bajo la situación de incendio. En las uniones de tipo clavija, resulta aconsejable que los herrajes queden embutidos en el interior de la madera, y mejor aún si se pueden ocultar, para no captar calor exterior y conducirlo hasta el corazón de la escuadría de madera, donde provocarían un sobrecalentamiento interno. Con el fin de ocultar la unión, se pueden utilizar tapones y parches colocados sobre la clavija; para mejorar la resistencia al fuego, éstos tendrán un espesor determinado por la distancia (a_{fi}), descrita en la Ecuación 2-83.

2.7.11 Deformación de la unión

Las piezas de madera solicitadas por cargas estáticas aplicadas de forma permanente están sometidas a una deformación que se incrementa con el tiempo. Primeramente se produce una deformación elástica inicial (u_0), que se determina mediante procedimientos de resistencia de materiales. Si esta carga permanece, la deformación aumenta con el tiempo, llegando a valores de u_1 para el tiempo t_1 y u_2 para el tiempo t_2 , tendiendo a ser menor el incremento de deformación a medida que aumenta el tiempo, hasta llegar a estabilizarse con una deformación u_a , según se observa en la Figura 2-60.

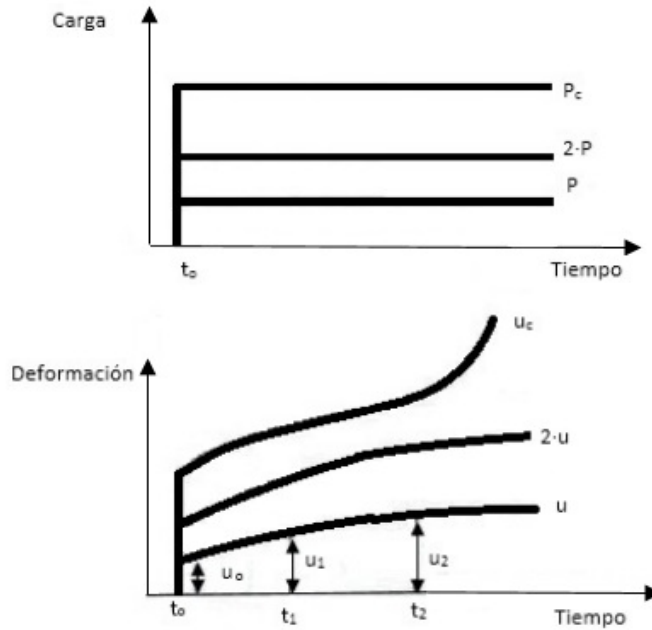


Figura 2-60. Evolución de la deformación frente al tiempo (Argüelles et al., 2003).

Si se duplica la carga, la deformación inicial también se duplica. Las deformaciones diferidas crecen en la misma proporción (u_c), teniendo en cuenta que en periodos intermedios las pendientes de la curva deformación-tiempo tienden a suavizarse. Pero si la carga inicial (P_c) es capaz de agotar la pieza, aunque en el periodo inicial el incremento de deformaciones es análogo, a partir de un determinado tiempo, la pendiente de la curva se incrementa hasta que aparece la rotura. En función del tipo y proceso de carga, de la temperatura, la humedad y el nivel de tensión alcanzado se pueden distinguir tres etapas:

- Primaria: donde la región du/dt es decreciente.
- Secundaria: donde la región du/dt es sensiblemente constante.
- Terciaria: donde la región du/dt es creciente hasta el fallo.

Ante una aplicación de carga como la indicada en la Figura 2-61, se puede determinar la deformación para un tiempo t_1 según la Ecuación 2-84.

$$u_1 = u_0 + u_{de} + u_v$$

Ecuación 2-84

Siendo:

- u_1 deformación total en el tiempo t_1 .
- u_0 deformación elástica instantánea.
- u_{de} deformación elástica diferida, recuperable al finalizar el proceso de descarga.
- u_v deformación viscosa no recuperable en el tiempo o remanente.

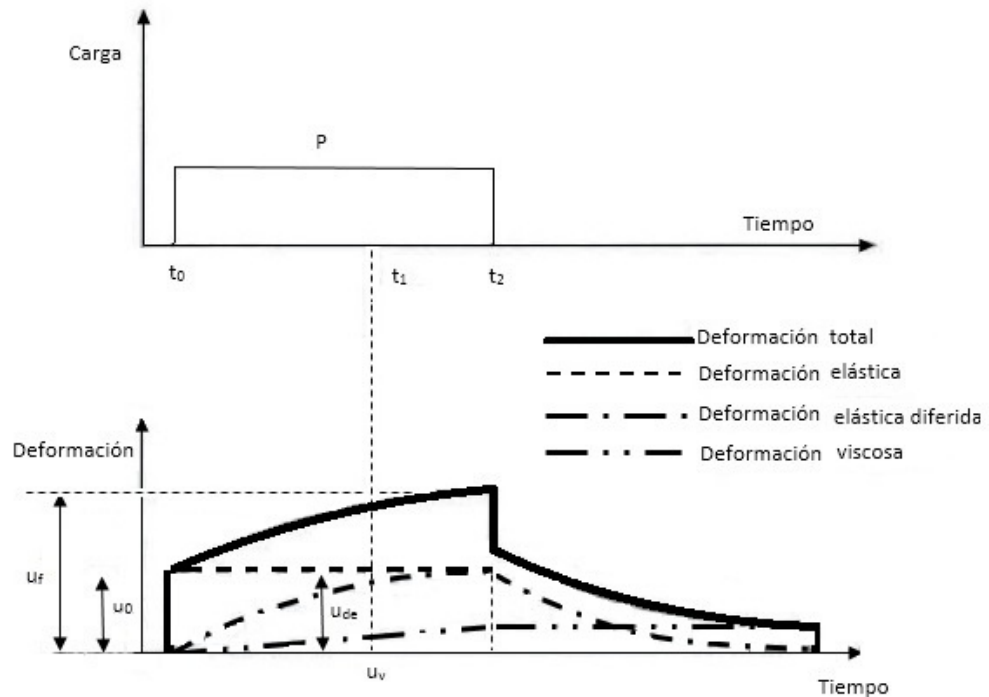


Figura 2-61. Superposición de deformaciones frente al tiempo (Argüelles et al., 2003).

La deformación total se calcula a partir de la deformación inicial, corregida por un coeficiente dependiente de la clase de servicio, y de la duración de la carga, según la Ecuación 2-85.

$$u_t = u_i \cdot (1 + k_{def})$$

Ecuación 2-85

Siendo:

- u_t deformación total.
- u_i deformación inicial.
- k_{def} factor de deformación según la Tabla 2-22.

Tabla 2-22. Valores del factor de deformación (k_{def}) para madera [según (DB SE M, 2009) Tabla 7.1]

Material	Clase de servicio		
	1	2	3
Madera maciza	0,60	0,80	2,00
Madera laminada encolada	0,60	0,80	2,00
Madera microlaminada (LVL)	0,60	0,80	2,00

En el caso de utilizar medios de unión tipo clavija, se pueden producir deslizamientos en la unión que ocasionan deformaciones significativas en la zona de la clavija. Como se indicó en el Apartado 2.7.2, se puede definir un coeficiente, el módulo de deslizamiento instantáneo para estados límite de servicio (K_{ser}), descrito por la norma (DB SE M, 2009) en su Tabla 7.1, que se relaciona con un coeficiente (k_s), en el caso de ser determinado por ensayo (UNE-EN 26891, 1992). Con los estados límite de servicio en la hipótesis de régimen lineal y elástico, el módulo de deslizamiento se puede determinar de forma analítica, según la Tabla 2-23 o mediante ensayo.

Tabla 2-23. Valores del módulo de deslizamiento (K_{ser}) para elementos de fijación de tipo clavija, en N/mm [según (DB SE M, 2009) Tabla 7.2].

Tipo de elemento de fijación	Madera-madera Tablero-madera
Pasadores Pernos sin holgura (*) Tirafondos Clavos con pretaladro	$\rho_m^{1.5} \cdot \frac{d}{23}$
Clavos sin pretaladro	$\rho_m^{1.5} \cdot \frac{d^{0.8}}{30}$
Grapas	$\rho_m^{1.5} \cdot \frac{d^{0.8}}{80}$
Conectores de placa (tipo A) y de anillo (tipo B), según norma (UNE-EN 912, 2011)	$\rho_m \cdot \frac{d_c}{2}$
Conectores dentados: Conectores de una cara (tipos C1 a C9 y C11), según norma (UNE-EN 912, 2011) Conectores de doble cara (tipo C10), según norma (UNE-EN 912, 2011)	$\rho_m \cdot \frac{d_c}{4}$ $\rho_m \cdot \frac{d_c}{2}$
(*) La holgura debe añadirse independientemente a la deformación. Si las densidades medias de las dos piezas unidas derivadas de la madera son diferentes ($\rho_{m,1}$, $\rho_{m,2}$), se tomará como valor de $\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1} \cdot \rho_{m,2}}$ Para uniones entre madera y acero o madera y hormigón, K_{ser} se multiplicará por 2.	

Siendo:

- K_{ser} módulo de deslizamiento para estados límite de servicio, en N/mm.
- ρ_m densidad media de la madera, en kg/m³.
- d diámetro de clavija, en mm.
- d_m diámetro del conector, en mm.

Se puede trabajar con el módulo de deslizamiento instantáneo para estados límite últimos en el plano cortante (Argüelles et al., 2003). Este valor responde a la Ecuación 2-86.

$$K_u = \frac{2 \cdot K_{ser}}{3}$$

Ecuación 2-86

El módulo de deslizamiento (K_{ser}) representa la pendiente en una relación lineal de carga frente al deslizamiento de la unión. El deslizamiento de la unión (u) se puede calcular, en una primera aproximación, a partir de una relación lineal, según Ecuación 2-87.

$$u = \frac{F_{v,Rk}}{K_{ser}}$$

Ecuación 2-87

Para determinar el deslizamiento final (u_{final}), se debe añadir la holgura ($u_{holgura}$) debida al ajuste entre agujero y clavija. También hay que corregir el deslizamiento debido al comportamiento reológico asociado a los factores de deformación ($k_{def,1}$ y $k_{def,2}$), descritos en la Ecuación 2-88. Combinando holguras y efecto reológico, el deslizamiento quedaría definido por la Ecuación 2-88.

$$u_{\text{final}} = u_{\text{holgura}} + u \cdot \sqrt{(1 + k_{\text{def},1}) \cdot (1 + k_{\text{def},2})}$$

Ecuación 2-88

2.7.12 Coeficientes modificadores

Recopilando los distintos coeficientes que afectan al cálculo dimensional de la madera, podemos identificar una serie de ellos orientados a modificar los valores de resistencia:

- k_{mod} coeficiente modificador ambiental y de la duración de la carga.
- k_{def} coeficiente modificador de las deformaciones por fluencia.
- K_{ser} coeficiente modificador para deslizamientos de los medios de unión, en función de la carga por plano de corte, entre madera y otro material (ya sea madera, acero u hormigón).

Hay otros coeficientes que también afectan al dimensionado del sistema estructural de madera:

- K_h coeficiente modificador del tamaño o factor de altura. Existe una relación entre el tamaño de la pieza y la resistencia de la madera, dado que cuanto mayor sea su volumen, menor es la tensión de rotura. En piezas de sección rectangular se relaciona con la altura. Este coeficiente se puede combinar con dos factores, el de volumen (K_{vol}) y el de longitud (K_L).
- K_{vol} factor de volumen. Para madera laminada encolada multiplica la resistencia característica en tracción perpendicular a la fibra ($f_{t,90,g,k}$), porque se considera que la relación de volúmenes expuestos a tensión afecta a esta resistencia.
- K_L factor de longitud. En el caso de madera microlaminada, multiplica la resistencia característica a tracción paralela ($f_{t,0,k}$) si la longitud supera los 3 m.
- K_{sys} coeficiente modificador de la carga compartida. Se aplica cuando un conjunto de elementos estructurales similares, dispuestos a intervalos regulares, está conectado y expuesto a flexión.

2.7.13 Medios de fijación actuando en conjunto

La rigidez de cada medio de unión es diferente (Figura 2-62), siendo previsible que existan sistemas que aporten más rigidez, como por ejemplo los encolados. Cuando se conjugan distintos sistemas de fijación en la misma unión, no todos ellos comienzan a actuar, necesariamente, de forma simultánea, con lo cual resulta complicado hacer una superposición directa de las resistencias que aportan cada uno de ellos (Argüelles et al., 2003).

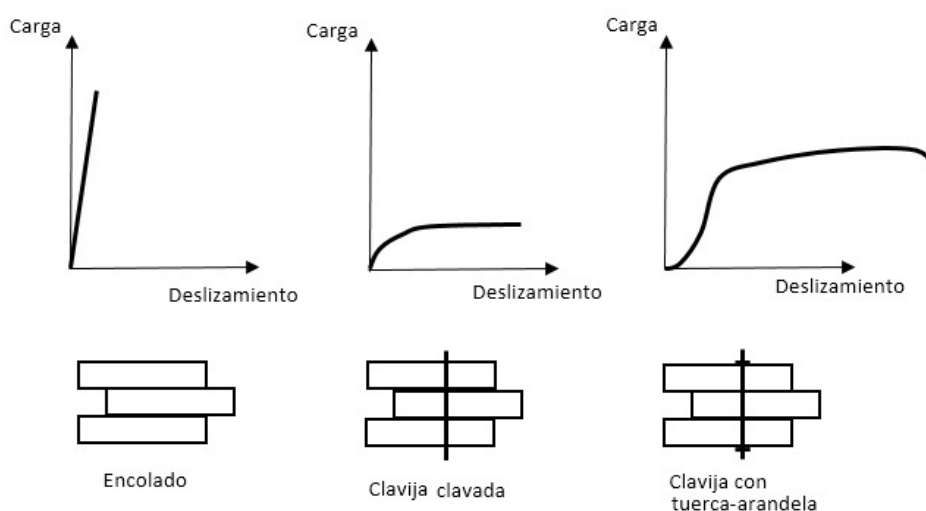


Figura 2-62. Evolución del deslizamiento debido a la carga para distintos sistemas de unión (Argüelles et al., 2003).

Cuando la unión está formada por distintos tipos de clavijas, con la Ecuación 2-89 se puede calcular la capacidad de carga (Argüelles et al., 2003) y, teniendo en cuenta el concepto de rigidez, con la Ecuación 2-90 se puede calcular el deslizamiento de la unión.

$$F_{v,Rk,n} = \sum_{i=1}^n F_{v,Rk,i} = n_a \cdot F_{v,Rk,a} + n_b \cdot F_{v,Rk,b}$$

Ecuación 2-89

$$u = \frac{F_{v,Rk,a}}{K_{ins,a}} + \frac{F_{v,Rk,b}}{K_{ins,b}}$$

Ecuación 2-90

Siendo:

- n_a y n_b número de pasadores de los tipos a y b , respectivamente.
- $F_{v,Rk,a}$ y $F_{v,Rk,b}$ capacidad de carga para pasadores de los tipos a y b , respectivamente.
- $K_{v,Rk,a}$ y $K_{v,Rk,b}$ módulo de deslizamiento instantáneo para pasadores de los tipos a y b , respectivamente.
- $F_{v,Rk,n}$ capacidad de carga en la unión completa.
- u deslizamiento de la unión.

Sin embargo, las agrupaciones de distintos tipos de elementos de unión que no sean clavijas requieren un estudio más detallado. Se debe tener en cuenta que, si estos sistemas se conjugan en una misma unión, no todos ellos tienen por qué trabajar de forma solidaria y simultánea, y es de esperar que el sistema clavija tenga un comportamiento elástico y una mayor deformación, debiendo procederse a un dimensionado del conjunto del lado de la seguridad.

3 Modelos de referencia

3.1 Introducción

En este capítulo se analizan los factores que mejoran el diseño en la unión, valorando aspectos como los materiales, una disposición optimizada de las piezas que componen el nudo y los elementos que se pueden superponer con la clavija para mejorar la resistencia de la unión. El fin último de este estudio es seleccionar y describir las mejores opciones de mejora y en definitiva mostrar las bases que dan lugar a un diseño adecuado facilitando la elección de las variables de estos elementos para el desarrollo de cálculos, ensayos y resultados.

Se caracterizan las propiedades de la madera y la clavija que van a componer la unión objeto de estudio. Se describen las bases necesarias para la elección de la madera estructural tomando como referencia las exigencias del mercado CE en lo que afecta a los productos de construcción. Se recopilan los certificados de conformidad de la madera estructural seleccionada para dar garantía de la clase resistente que se emplea y sus propiedades dimensionales y mecánicas. Se establecen los materiales para la clavija. Dada la importancia de la clavija como elemento de unión se describen distintos tipos de acero y geometrías exponiendo sus características mecánicas y físicas. Para ratificar las propiedades de las clavijas empleadas se realizan controles que también son descritos en este capítulo.

Posteriormente se realiza una valoración de otros componentes de refuerzo.

- Se hace una clasificación de adhesivos orientada a la selección de los más correctos. Una vez seleccionados los adhesivos se refleja la disposición que pueden presentar al emplearse junto con las clavijas; se exponen las ecuaciones reconocidas que rigen su comportamiento mecánico y el proceso para su inyección entre la clavija y la madera.
- De forma análoga, se hace una clasificación de los conectores, las ecuaciones documentadas para su comportamiento mecánico y sus propiedades mecánicas. Finalmente se describe un tipo concreto de conector (de placa dentada) que será estudiado en el conjunto de la unión.
- A continuación se recopilan distintos tipos de kits de expansión; las limitaciones que presentan y cómo pueden integrarse en la unión de madera con clavija. Se describe la técnica empleada para lograr expansiones controladas en la clavija, una vez alojada en el agujero de la madera.

Los elementos de refuerzo seleccionados (adhesivos, conectores y kits de expansión) serán integrados en los distintos modelos de unión de madera con clavija que se han preparado, con el fin de estudiar los efectos de la superposición y mejorar las propiedades resistentes del conjunto mediante su aplicación.

Con el fin de identificar modelos de uniones operativas en estructuras reales se finaliza el capítulo revisando una edificación que está en proceso de reconstrucción. Esto permite mostrar los daños que llevaron a su colapso y efectuar una revisión en la secuencia de cálculo estructural de todo el conjunto orientada a valorar las cargas con las que se deben enfrentar los nudos donde se han dispuesto clavijas.

3.2 Elementos que mejoran el diseño en uniones con clavija

Las uniones en estructuras de madera de tipo clavija buscan conjugar diferentes elementos de modo que se obtenga el mejor comportamiento mecánico posible, sin debilitar la zona donde se realiza la unión. La correcta elección de estos elementos es fundamental en dicho objetivo. Los siguientes apartados pretenden analizar las premisas para un buen rendimiento, la definición de los materiales fundamentales y aquellos factores que pueden mejorar el diseño, teniendo presente el contexto estructural y las bases técnico-comerciales que condicionan su aplicación.

3.2.1 Premisas para un buen rendimiento de la unión

Entre las premisas que debe cumplir un elemento de unión (Madsen, 1992) se pueden plantear las siguientes:

- Las uniones deben tener una alta resistencia, con baja variabilidad en el tiempo a corto y largo plazo.
- Las uniones han de presentar una rigidez fiable.
- Las uniones deben tener una resistencia al fuego satisfactoria.
- Las uniones deben tener una elevada ductilidad, lo que conduce a una tolerancia a efectos dinámicos como, por ejemplo, los originados por un terremoto.
- La resistencia de la unión también debe ser estable en situaciones de carga cuando haya variaciones de temperatura y de humedad.
- El tamaño y posición de los elementos de fijación no ha de condicionar las dimensiones de las vigas.
- Las técnicas de montaje deben ser eficaces e insensibles a pequeñas tolerancias causadas por la hinchazón o la contracción de la madera.
- La simplicidad debe ser un factor clave en el proceso de diseño, cálculo y montaje de los elementos de unión.
- Los elementos del conjunto de la unión no han de afectar a la estética de la estructura.
- El planteamiento de uniones de alto rendimiento y su coste debe ser equilibrado por un ahorro en madera.
- El impacto ambiental de la fabricación conjunta y su uso ha de ser mínimo.

Se trata de una amplia lista de requisitos derivada de la frecuencia y exigencias de los elementos a unir, por lo que las uniones hechas con elementos de fijación de tipo clavija tienen que satisfacer muchas de estas premisas.

3.2.1.1 Disposición geométrica

La unión con elementos de fijación de tipo clavija, al emplear alguna forma de solape como se observa en la Figura 3-1 izquierda, implica que la madera esté sometida a cargas laterales. Esto significa que los miembros se superponen y que los elementos de sujeción actúan a cortadura simple para formar una articulación, pudiendo introducir excentricidad en la misma. Una forma de limitar los problemas de la presencia de una excentricidad es reemplazar uno de los miembros por dos laterales de la mitad de espesor, como se observa en la Figura 3-1 a la derecha. Esto permite una disposición simétrica que elimina la excentricidad de la articulación, y se puede utilizar para conectar los miembros en cualquier ángulo. También permite la fabricación de articulaciones y juntas de empalme rectas.

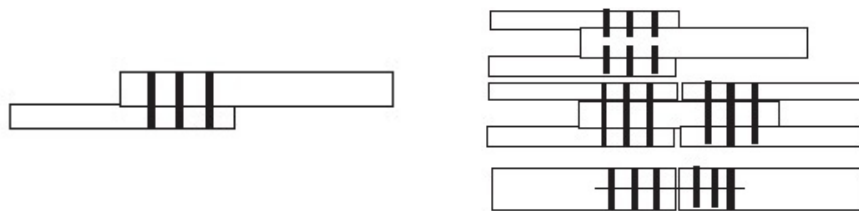


Figura 3-1. Disposición en cortadura simple (izda.) y doble (dcha.).

3.2.1.2 Número de elementos de unión

En las estructuras cargadas estáticamente (a menos que las articulaciones se puedan situar en puntos muy particulares con baja carga), el objetivo básico debe ser que el nudo sea tan fuerte como los miembros que conecta. La presencia de agujeros para colocar los elementos de fijación reduce la capacidad de carga de los propios elementos de madera. Una alternativa es la redistribución de mayor número de elementos de unión en la zona del nudo. Sin embargo, esta modificación del diseño de la unión afecta a su comportamiento mecánico, por ejemplo modificando su capacidad de articulación.

Un número elevado de elementos de unión puede afectar a la articulación y limitar las posibilidades de giro en el nudo. En consecuencia, se debe emplear un número limitado de pernos (en la medida de lo posible) y deben ser de

comportamiento dúctil para lograr el efecto de nudo articulado. Si se opta por articulaciones de tipo clavija tradicionales, pueden adoptarse dos posibilidades en la elección de las clavijas, que serán:

- A. Muy grandes, si han de transmitir los esfuerzos de los miembros conectados.
- B. De baja eficiencia, si son de un tamaño más pequeño acorde con elementos como clavos o tirafondos.

La primera opción puede condicionar las dimensiones de las vigas; la segunda obliga a analizar detalladamente los materiales de la unión y la introducción de elementos complementarios.

3.2.1.3 Límites elástico y plástico de la clavija

Los límites elástico y plástico del material elegido para la clavija condicionan el comportamiento de la unión. Existen distintas opciones para elegir el material. En algunos casos se han utilizado barras de materiales compuestos (por ejemplo, resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio) que permiten dar continuidad y forma a las clavijas, pero sacrifican otros factores como la posibilidad de hacer soldaduras que tiene el acero y la homogeneidad a efectos de cálculo. Por ello, el material más común es el acero.

Un material que presente un alto grado de resistencia limitará la formación de rótulas (relacionadas con el momento plástico). Al incrementar el límite elástico en la clavija (siempre que el módulo de elasticidad sea el mismo), se produce una menor deformación y retrasa la transición a la zona plástica, lo que supone menor absorción de energía por parte de la clavija, siempre considerando que ésta pueda actuar en la zona de comportamiento plástico.

3.2.1.4 Efecto soga

El efecto soga o cable es otro factor que se debe considerar en el diseño de las clavijas. Permite distribuir las tensiones cortantes localizadas para reorientarlas como axiles a lo largo de toda la clavija. De esta forma se transmiten las tensiones de las regiones de las intercaras de la madera a zonas menos críticas dentro del volumen de la clavija. Además, se incrementa la interacción por fricción entre las intercaras de la madera y la zona expuesta a plastificación entre madera y clavija. Se puede recurrir a distintas opciones para lograr acentuar el efecto soga:

- Fijar la clavija en extremos exteriores con sistemas tuerca-arandela (Jesse, 2006), como se muestra en la Figura 3-2.
- Introducir adhesivos en la superficie clavija-agujero (Davis & Claisse, 2001).
- Potenciar la fricción entre clavija y agujero con fijaciones ocultas de expansión o superficies de clavija rugosa (Sjödín et al., 2008).



Figura 3-2. Unión con elementos tuerca-arandela y aplastamiento en el contacto madera-arandela (Jesse, 2006).

3.2.1.5 Sección transversal de la clavija

La forma, en sección transversal, de un elemento de fijación también es importante cuando se considera el rendimiento del empotramiento. Por ejemplo, una sección transversal rectangular sería más eficiente que una sección transversal circular, porque permite incrementar el módulo resistente a flexión. Pero las técnicas de

realización del agujero son complejas, pues ha de considerarse la orientación de las fibras al realizar el mismo. Además, las aristas vivas pueden producir localización de tensiones y efectos de hienda; en consecuencia, las distribuciones poligonales no son una opción práctica, salvo algunas disposiciones, como los clavos fabricados antiguamente por forja y estampación y los dientes de placas-clavo.

3.2.1.6 Fricción en la clavija

La fricción es un elemento de mejora de la clavija en la madera. Los mejores resultados de resistencia por fricción se obtienen haciendo rugosa la superficie de contacto del elemento de fijación por un proceso de moleteado, que deforma la superficie lisa incrementando el rozamiento entre las zonas de contacto (Rodd & Leijten, 2003), (Sjödín, et al., 2008), según se muestra en la Figura 3-3.

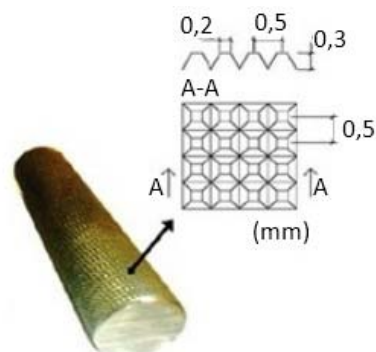


Figura 3-3. Incremento de fricción por moleteado de la clavija (Sjödín, et al., 2008).

Otro elemento para potenciar la fricción es el encolado con resinas, donde se han documentado ganancias de hasta un 50 % (Rodd & Leijten, 2003). Hay que considerar que la superficie del acero presenta buenas características adherentes en el caso de barras roscadas (Proyecto LICONs, 2003); esta técnica de unión resulta especialmente interesante cuando se utilizan clavijas grandes tales como pernos, pero está limitada si se emplean clavos o con tornillos en agujeros pre-perforados. En la Figura 3-4 se muestra cómo aparece una distribución tensional en los resaltos de la clavija que entran en contacto con el adhesivo a lo largo de la misma, mientras que, si la clavija simplemente se introdujera en el agujero, la capacidad de carga sería mucho más limitada.

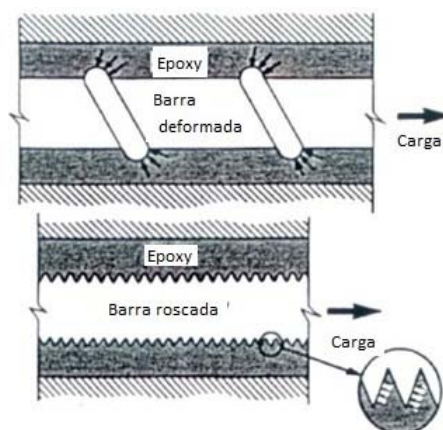


Figura 3-4. Unión con adhesivo (Proyecto LICONs, 2003).

3.2.1.7 Planos de contacto entre madera y madera. Fricción y placas-clavo

Los planos de contacto entre madera y madera pueden contribuir a la capacidad de carga de la unión. Las fuerzas de rozamiento que se dan en estos planos tienden a ser bajas, sobre todo si se comparan con el esfuerzo recogido por la clavija. Están subordinadas al coeficiente de rozamiento (μ), que depende del estado de las superficies de

madera y las cargas normales a estas superficies. En cualquier caso, actuar sobre estas variables puede mejorar el diseño de la unión.

Otra forma de modificar la resistencia en las superficies laterales son las placas-clavo y los conectores. Las placas-clavo son elementos de fijación constituidos por placas metálicas, de bajo espesor, con distinta cantidad de puntas según el proceso de estampación en la placa. Este tipo de uniones se comenzó a utilizar en Estados Unidos en los años 50. Fue resultado de la evolución de las placas metálicas perforadas y de las cartelas de tablero contrachapado clavadas manualmente. Presentan ventajas debido a su mayor facilidad para la industrialización y a una mejor capacidad de transmisión de carga para la misma superficie.

Las placas-clavo se fabrican en acero galvanizado o inoxidable. Sus espesores van desde 2,5 mm a 0,9 mm. El resto de dimensiones son más variadas, pero están condicionadas por el tipo y por las necesidades de la estructura. Se pueden conformar en láminas de tamaño rectangular y distribuciones de clavos regulares (véase Figura 3-5) o pueden tener formas específicas, como discos dentados con un agujero intermedio para permitir el paso de la clavija, como sucede en una familia de uniones llamadas conectores.

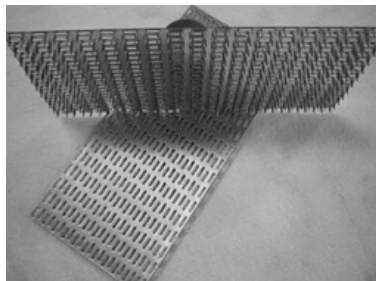


Figura 3-5. Ejemplo de placa-clavo.

La transmisión de la carga se realiza a través de las puntas de la placa, y éstas transmiten el esfuerzo al resto de las piezas de madera. La superficie de transmisión de cargas es más grande que en otros medios de unión. Se emplean en los enlaces de estructuras prefabricadas con piezas de pequeño espesor, disponiendo las placas en las partes exteriores o embebidas entre las dos piezas. Su clavado se realiza mediante prensas hidráulicas en taller.

El corte de las piezas se realiza simplemente a tope, sin necesidad de ensambles. Esto facilita su ejecución y reduce las pérdidas de sección inevitables en las uniones tradicionales. Estos conectores se pueden complementar con clavijas, en cuyo caso deben emplearse procedimientos específicos para la realización de este tipo de unión con elementos mixtos. La Figura 3-6 muestra un conector dentado a la izquierda, mientras que a la derecha se expone la combinación con una unión de tipo clavija intercalándose en los planos de contacto con la madera.

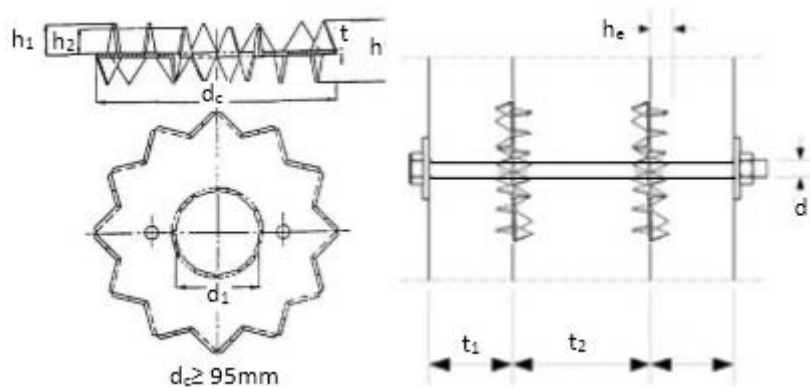


Figura 3-6. Conector dentado (izda.) y composición en unión con clavija en cortadura doble (dcha.).

3.2.2 Densificación de la madera

Otro factor que puede mejorar la capacidad resistente de la unión es la densificación de la madera en las zonas de mayores esfuerzos. Se puede conseguir a través de “chapas densificadas de madera” o DVW (*Densified Veneer Wood*). Supone el refuerzo en las proximidades de los elementos de fijación, como puede observarse en la Figura 3-7, con maderas de alta densidad, como por ejemplo el abedul. Los sistemas que refuerzan las intercaras sometidas a cortante pueden ser de madera densificada o de placas delgadas de acero perforadas; estos refuerzos permiten llegar a incrementar los valores de carga admisible hasta el 80 %, frente a los no reforzados (Rodd & Leijten, 2003).

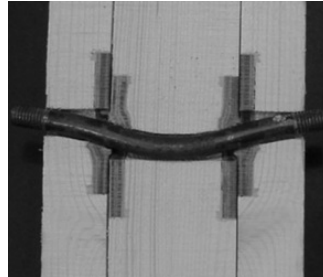


Figura 3-7. Unión con perno y conectores de disco DVW.

En cualquier caso, la densificación generalizada de la madera mejora la capacidad de carga (Dorn et al., 2013). Se puede realizar un proceso de densificación generalizado en la madera con la combinación de calor (alrededor de 170 °C) y compresión (Sotomayor, 2003). Con temperatura y presión, la lignina (constituyente de la pared celular) comienza a ablandarse. Esto provoca dentro de la célula desplazamientos de materia que ocupan los huecos y se crean nuevos enlaces moleculares. Por su parte, un rápido descenso de la temperatura, todavía a una presión alta, mantiene esta situación estructural. Los constituyentes de la pared celular, responsables de la resistencia mecánica, no resultan dañados; mientras que el material se vuelve más homogéneo (Figura 3-8). La recuperación elástica depende en gran medida del contenido de humedad de la madera, tanto antes como después de la compresión. La densificación no es completamente irreversible. Cuando el material se sumerge durante largos períodos en el agua, la configuración de la celda original casi retorna a su situación inicial. Este efecto “memoria” de forma depende de la densidad del producto tratado, ya que lleva más tiempo a la humedad penetrar en un material más denso.



Figura 3-8. Efectos de densificación de la madera (Rodd & Leijten, 2003).

Según algunas investigaciones (Rodd & Leijten, 2003), los procesos de densificación generalizada de la madera fueron propuestos por Stockhart, que en 1886 patentó por primera vez el método para madera maciza por compresión paralela al grano. En 1922, los hermanos austriacos Pfleumer encontraron un método más eficaz: habían puesto accidentalmente un trozo de madera en un autoclave llena de goma. Debido a la alta presión (300 atmósferas) y alta temperatura, la madera se transformó en una masa densa y oscura. Este método de densificación se mejoró por ensayo y error hasta llegar a las técnicas actuales, que se materializan en distintas patentes relacionadas con la densificación de materiales lignocelulósicos (Robert & Kathryn, 2000). Lo más común es aplicar compresión perpendicular a la fibra de la madera (tanto maciza como aglomerada) a través de las placas calentadas en una prensa. También es posible impregnar el material antes de la compresión con productos químicos para mejorar ciertas propiedades, tales como la durabilidad. Estos tratamientos estabilizan las dimensiones, reduciendo las variaciones ante condicionantes atmosféricas, especialmente la humedad.

3.2.2.1 Ductilidad de la unión

La ductilidad de una unión está asociada a la capacidad para recoger energía por parte de misma, y es de gran importancia en las estructuras construidas en zonas de alta actividad sísmica. Una forma eficaz puede ser el uso de un gran número de pequeños elementos de fijación, lo que implica que se deformen fácilmente. De esta manera, los elementos de unión son capaces de recoger más energía. Otra alternativa es utilizar elementos de fijación de gran diámetro y huecos, para reducir así su rigidez (Rodd & Leijten, 2003). Por su naturaleza, los tubos de acero son capaces de deformarse bajo tensiones considerablemente más bajas que las secciones macizas (Figura 3-9). De este modo, el tubo puede recoger energía por deformación de forma análoga a lo que ocurriría con un gran número de elementos de fijación; aunque presenta inconvenientes, ya que requiere un diámetro de agujero mayor, con lo que debilita la sección útil en la madera.

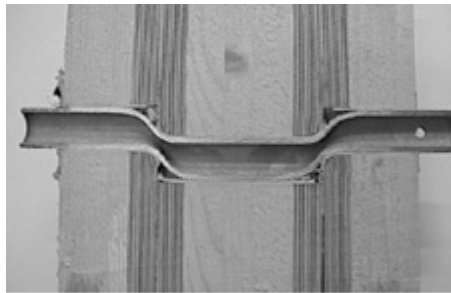


Figura 3-9. Unión mediante tubo de acero hueco.

3.2.2.2 Rigidez de la unión

La situación óptima de cara a mantener la rigidez de la unión sería que ésta se realizase entre varias piezas de madera y que tuviera la misma capacidad resistiva que la del elemento más débil que une. En realidad, esta situación sólo es probable que se logre con el uso de uniones pegadas. En el caso de uniones tipo clavija, la junta presenta un deslizamiento debido a la existencia de holguras entre agujeros y clavijas. Es importante conocer el deslizamiento esperado para limitar las deformaciones del conjunto estructural. Además, el deslizamiento afecta a la distribución de fuerzas y momentos, sobre todo en estructuras estáticamente indeterminadas (hiperestáticas); por ello, el deslizamiento se tiene en cuenta en algunos ensayos normalizados para uniones (UNE-EN 26891, 1992).

Una de las principales razones que pueden limitar, en la práctica, el diseño estructural con madera puede ser la falta de información fiable sobre la rigidez en las articulaciones. En las estructuras reales, el deslizamiento y la rigidez articular dependen de un amplio número de factores, algunos de los cuales están fuera del control del diseñador y pasan a depender del buen hacer del constructor; así, componentes y procesos que faciliten una rigidez conocida y fiable en la unión son muy importantes.

La rigidez se puede mejorar con la superposición de refuerzos y elementos incrustados en el agujero (como las vistas en el Apartado 3.2.1.7). Sin embargo, esto no se refleja necesariamente en una superposición de esfuerzos, ya que:

- No resuelve los problemas de separación del agujero y, por lo tanto, las holguras pueden seguir existiendo, con deslizamientos indeseados.
- No transmite carga inicial de forma homogénea y proporcional a las distintas zonas de trabajo, ni tiene por qué ser recogida de forma simultánea por todos los elementos de unión.
- Tampoco hay garantía de que los valores límite de trabajo sean homogéneos. Éstos pueden fallar en serie para distintas zonas expuestas a tensiones límite.

Para la resolución de los problemas relacionados con la falta de rigidez, se describen a continuación dos métodos posibles (Rodd & Leijten, 2003).

- Llenar el vacío entre la superficie interior del agujero y el cuerpo de la clavija con la inyección de resina. Se pueden utilizar en uniones hechas con cualquier elemento de fijación de tipo clavija, siendo eficaz tanto si la madera es reforzada como si no lo es. El procedimiento de inyección es similar al utilizado con tornillos en las estructuras de acero y funciona bien, pero necesita un control cuidadoso durante el procedimiento de inyección. Consiste en la perforación de un orificio de inyección pequeño y en diagonal, en una cara lateral de la articulación. El elemento de fijación se instala a continuación, con un orificio de ventilación y drenaje en el lado opuesto al orificio de inyección. Entre los elementos de unión adyacentes puede ser necesaria una junta delgada para evitar la pérdida de resina. El proceso se habrá completado cuando la resina emerja a través del orificio de ventilación (Figura 3-10).

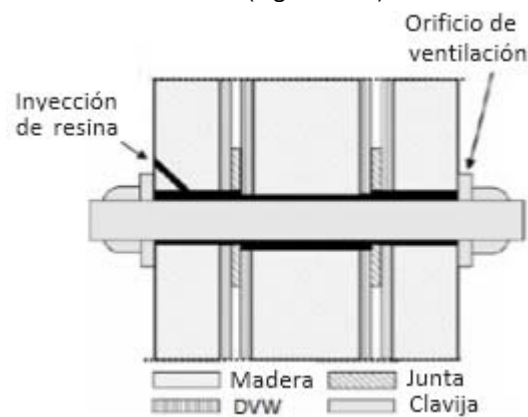


Figura 3-10. Principio de inyección de resina (Rodd & Leijten, 2003).

- Otro método consiste en utilizar un tubo de acero hueco al cual se le aplica un proceso de compresión, a través de un sistema de matrices, mediante el cual se consigue incrementar su diámetro. De esta manera se consigue un ajuste perfecto entre la clavija y el hueco en el que va ubicada (Rodd & Leijten, 2003). Esto garantiza una mayor rigidez inicial. Entre las ventajas de esta metodología podemos enumerar las siguientes:
 - Ensamblajes más fáciles y rápidos.
 - Reducción de preparativos y ajustes.
 - Reducir los costes en caso de reparaciones.

Este método de expansión con tubos ha sido poco utilizado en uniones de madera estructural, ya que las ventajas pueden ser contrarrestadas por la introducción de nuevas tensiones, que unidas al comportamiento ortótropo y a una resistencia muy limitada en la dirección de tracción perpendicular a la madera, pueden ser indeseables, especialmente en modelos de comportamiento elasto-plástico (Kharouf et al., 2003).

3.2.3 Componentes de mejora aplicables a la clavija

Con el diseño se pretende dar uniformidad a la tensión en la superficie de contacto, lograr la transmisión de esfuerzos y la adsorción de energía con diámetros (d) lo menores posibles ya que los fallos por aplastamiento uniforme de madera (que se dan con valores de diámetro grandes) suponen también un debilitamiento de la viga. En pruebas físicas y prototipos para la evaluación de normas de diseño (Proyecto LICONs, 2003) se trabaja con diámetros de 10 a 20 mm. En las barras estudiadas en el presente trabajo se ampliará el muestreo con diámetros comprendidos entre 8 y 30 mm.

Dado que la combinatoria de los elementos puede ser amplia, no se pretende fijar variables de forma exhaustiva, sino representativa entre las fuentes identificadas. Por ejemplo, en lugar de tratar distintos tipos de madera se aplicará el estudio a clases resistentes de uso común en construcción; por otro lado, en lugar de aplicar aceros en el

amplio espectro, se aplicará sobre grupos representativos y elementos (como las arandelas) de uso frecuente. Pensando en el estudio y en una mejora de rendimiento de la clavija, se plantea acotar distintos elementos en el diseño de unión:

1. Materiales.
 - A. Madera con garantías de homogeneidad, que permita escuadrías comerciales reales, con un amplio espectro de momentos de inercia, lo que lleva a la elección de material encolado y homogéneo.
 - B. Clavija de distintas calidades, acero de alta resistencia y dúctil (acero prescrito para la construcción).
 - C. Clavija roscada en acero, que permita el efecto soga (por fijaciones en extremo de clavija con tuerca-arandela) y que mejore el efecto de fricción e incrustación de las fibras de madera con el roscado de acero. Protegida por galvanizado según las indicaciones de la Tabla 3-10, para atenuar degradaciones químicas por corrosión.
2. Disposición.
 - A. Geometría en la unión con simetría, y clavija trabajando en cortadura doble, para evitar excentricidades, como se muestra a la derecha en la Figura 3-1.
 - B. Número de elementos de unión reducido para facilitar el estudio, simplificando la unión y evitando interferencias entre múltiples clavijas (modificación del centro de rotación, interacción entre tensiones de clavijas cercanas). Por ello, se opta por el estudio de uniones de un solo perno.
3. Componentes para potenciar el efecto soga, incrementando la fricción en el interior el agujero y la rigidez. Existen varias opciones:
 - A. Encolado.
 - B. Tuerca-arandela con la clavija roscada.
 - C. Expansión.
4. Componentes para potenciar la fijación en las intercaras de la madera.
 - A. Conectores dentados de tipo B, para mejorar la fricción en las intercaras de la madera.

Como punto de partida, es necesario describir los elementos que son objeto de estudio: la geometría y características mecánicas de la viga, carga a la que se encuentra sometida y tipo de apoyos. Para ello, con el fin de utilizar datos que puedan corresponder a una situación real, se ha buscado un modelo de estructura que incluyera entre sus elementos vigas con uniones clavija. Para las modelizaciones de la unión, se deben considerar sistemas estructurales operativos y completos, para no perder de vista una proyección práctica del trabajo. Se considera el sistema estructural completo en el ámbito de la edificación civil, y sirve como referencia para:

- Describir y acotar con detalle los materiales empleados (escuadrías de madera, control de calidad...).
- Relacionar la normativa de aplicación en edificación estructural con los trabajos de investigación.
- Relacionar la investigación básica y de detalle con las exigencias de trabajo requeridas a la estructura civil.
- Revisar e identificar soluciones aceptadas en el desarrollo práctico y constructivo pero cuyo desarrollo documentado pueda ser menos detallado (especialmente en la rigidez de la unión).
- Conocer exigencias estructurales de conjunto, por ejemplo, magnitudes de las cargas que pueden llegar al nudo o las condiciones en el deterioro.

3.3 Idoneidad de la madera estructural. El marcado CE

Como producto estructural, la madera debe ser marcada por el fabricante. El tratamiento de marcado CE supone definir algunos aspectos concretos (Fernández-Golfín et al., 2003). En el caso de la madera clasificada de tipo estructural se ha de consignar:

- Cada pieza de un lote deberá ser marcada de forma clara e indeleble para suministrar la información mínima relacionada con:

- Producción, en fábrica (CPF).
- Documentación de acompañamiento.
- Distintivos de calidad o evaluaciones técnicas de idoneidad.
- Ensayos realizados sobre la madera.
- El productor, o su representante autorizado, que es responsable del marcado y documentación que ha de acompañar a toda pieza de madera comercializada en el mercado (Figura 3-11).



Figura 3-11. Ejemplo de etiqueta de conformidad del producto.

- Cualquier pieza de madera que se comercialice por separado en el mercado deberá acompañarse del documento comercial original correspondiente al lote del que fue extraída (o copia autenticada del mismo). Dicho documento debe contener la información mínima y, lo que resulta más deseable, incorporar una marca que, de forma indeleble, aporte la información mínima vinculada con la documentación de origen (Labèrnia, 2010). Esto se esquematiza en la Figura 3-12.

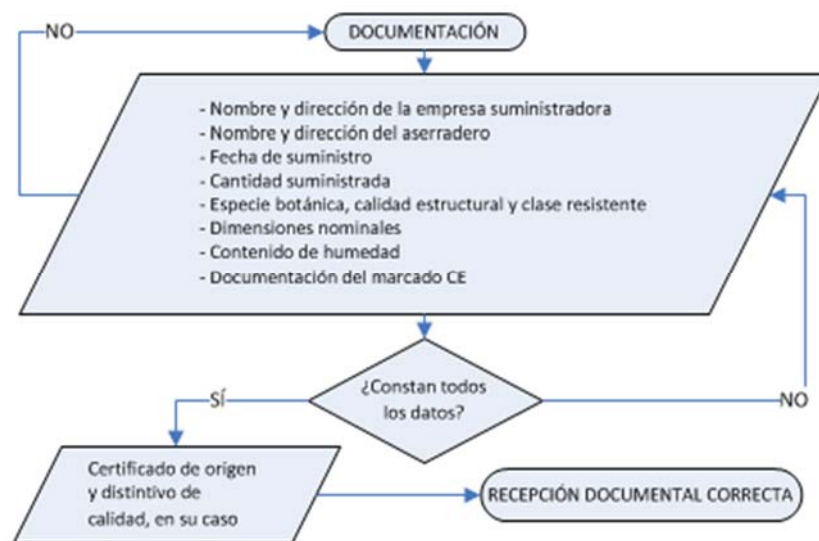


Figura 3-12. Control de la documentación de origen (Labèrnia, 2010).

- Entre el contenido que debe incorporar el marcado CE está la siguiente información:
 1. Nombre o marca identificativa del productor.
 2. Un código de referencia que identifique la documentación con la información exigida.
 3. La clase resistente asignada en la norma (UNE-EN 1912, 2012).
 4. La letra CE de acuerdo con el formato establecido (Directiva 89 106 CEE, 1998).
 5. Los últimos dos dígitos correspondientes al año del marcado CE.
 6. Número del Organismo certificador, si lo hubiera.
 7. Contenido de humedad en el momento de la clasificación, según la siguiente denominación:
 - Madera húmeda (WET GRADED).
 - Madera seca (DRY GRADED).

- Como información adicional:
 1. Denominación completa y dirección registrada del productor.
 2. Código de especie de madera (UNE EN 13556).
 3. La clase de calidad (ME-1 o ME-2) y la norma de clasificación empleada (UNE 56.544).
 4. Resistencias a la flexión, compresión y tracción (no es necesario si se ha marcado la madera con la clase resistente o si se cita la clase de resistencia según la norma norma (UNE-EN 338, 2010)).
 5. Módulo de elasticidad en flexión (no es necesario si se ha marcado la madera con la clase resistente o si se cita la clase de resistencia según la norma (UNE-EN 338, 2010)).
 6. Clase de durabilidad (EN 350-2) o “Durabilidad NPD” (*No performance determined*).
 7. Clase de reacción al fuego o clase F (sólo en documentos de acompañamiento).
 8. Número del certificado EU de conformidad (sólo en documentos de acompañamiento).
 9. Firma del responsable de la clasificación (sólo en documentos de acompañamiento).

En este trabajo se considera necesario caracterizar la madera con el marcado CE porque:

1. Es exigible en obras de ingeniería civil (en particular para productos estructurales).
2. Si no se hiciera, obligaría a realizar ensayos para determinar la clase y estado de la madera con la que se está trabajando.
3. La definición de la madera empleada en las uniones tiene una aplicación en el contexto estructural, para obras de edificación e ingeniería civil y, por lo tanto, se debe valorar su idoneidad en consideración al uso previsto.

El uso del marcado resulta especialmente ventajoso y supone una definición del material en múltiples aspectos, que son tratados como requisitos esenciales propios de los materiales de construcción (Directiva 89 106 CEE, 1998) y están diseñados para su incorporación con carácter permanente a los edificios (DB SE M, 2009) y en las obras de ingeniería civil (véase la Figura 3-13). Las ventajas que implica su uso cuando se aplican en obras son:

- Conocimiento de las resistencias mecánicas y de estabilidad.
- Seguridad en caso de incendio.
- Seguridad en la utilización.
- Higiene, salud y medio ambiente.
- Protección contra el ruido.
- Ahorro de energía y aislamiento térmico.

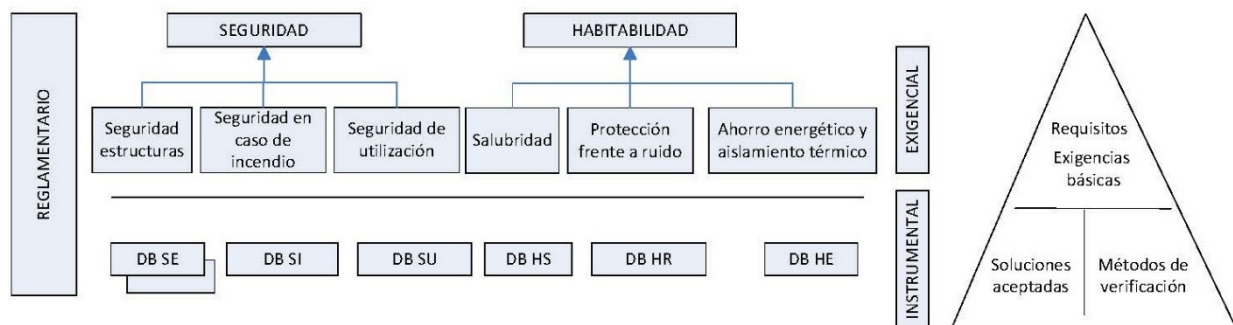


Figura 3-13. Control documental relacionado con el marcado CE en madera estructural para edificación (Confermadera, 2005).

3.4 Caracterización de la madera objeto de estudio

A la hora de elegir un tipo de madera para el estudio se ha considerado especialmente que fuera de uso estructural. La elección ha sido una clase de madera laminada encolada, en consideración a la tendencia observada en otros trabajos de investigación afines (Guan & Rodd, 2001) y a las posibilidades de conseguir dimensiones menos

condicionadas al tamaño original de los árboles. De hecho, el uso de madera encolada homogénea (GLh) ha llegado a generalizarse en el ámbito estructural debido a una serie de ventajas:

- Puede ser producida en casi cualquier forma y tamaño.
- Se reduce el efecto de imperfecciones frente a las piezas individuales de madera maciza.
- Permite que grandes componentes estructurales puedan ser producidos económicamente, sin las limitaciones de la madera aserrada debidas al tamaño del tronco.
- Está fabricada específicamente para su utilización en el ámbito de la construcción visible, compatibilizando estabilidad y estética.
- Para piezas situadas en clase de servicio 1, se pueden utilizar adhesivos de tipo I o II (UNE-EN 301, 2007). Supone un aspecto visual similar al de la madera maciza y presenta buena estabilidad de forma.
- El control de la humedad reduce la posibilidad de un ataque por agentes biológicos (hongos o xilófagos), lo que hace indicada esta madera para categorías de riesgo bajo.
- En condiciones normales de trabajo, no es necesario aplicar ninguna protección química preventiva, aunque se trate de elementos portantes.
- La madera laminada se fabrica a partir de madera escuadrada, separada del núcleo o sin él, lo que permite eludir esta zona de baja capacidad resistente.
- Lleva asociado un control visual que minimiza la existencia de fendas, grietas, nudos y otros defectos propios de la madera, expuestos en el Capítulo 2. La detección de estos defectos permite eliminarla o repararla, Figura 3-14.



Figura 3-14. Reparación de defecto estructural por nudos en madera laminada estructural.

- Las dimensiones son precisas, con tolerancias definidas (UNE-EN 386, 2002). Cada una de las vigas es cepillada por sus cuatro caras con una máquina cepilladora dirigida mediante control numérico computerizado (CNC) para dar garantías dimensionales e, inmediatamente después, se embalan por separado.

Se debe prestar especial cuidado a las líneas de encolado, que pueden suponer fallos imprevistos por hienda en zonas cruciales, como las articulaciones. En estructuras de madera laminada, lo habitual sería que el fallo surgiera por aplastamiento de la madera con un comportamiento dúctil, pero la línea de encolado unida a la generatriz de la clavija puede dar lugar a un crecimiento rápido e imprevisto de la grieta con una rotura frágil. En la parte superior derecha de la Figura 3-14 se muestra la situación de un agujero, para colocación de la clavija, que puede dar lugar a fallo por hienda al estar localizado justo en la línea de encolado.

3.4.1 Madera laminada encolada

Son elementos estructurales formados por el encolado de láminas de madera en dirección paralela a su eje. Según la norma UNE-EN 14080, las láminas tendrán un espesor comprendido entre 6 y 45 mm, y podrán utilizarse maderas de especies coníferas o chopo, tratadas o no frente a agentes biológicos.

El proceso de encolado supone el uso de adhesivos como el poliuretano, aunque también es apta la melamina. Carece de disolventes y formaldehídos, y se conforma en un proceso de prensado descrito en norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). Las láminas se escogen por separado y se unen entre sí por arrastre de fuerza mediante ensamblaje de cola de milano, como unión longitudinal. Se le dota de un secado técnico controlado (temperaturas de hasta 70 °C) que modifica la albúmina. Estas temperaturas tienen como consecuencia un secado técnico con un 15 % de humedad como máximo; no obstante, si la madera es tratada durante el armado, la humedad debe estar comprendida entre el 11 y 18 %. En ambos casos, la variación de contenido de humedad de las láminas de una misma pieza no excederá del 4 % (UNE-EN 386, 2002).

Las estructuras de madera laminada encolada resultan especialmente indicadas en las siguientes condiciones:

- Grandes luces libres (de 30 a 70 m) en edificios de uso público, comercial o deportivo.
- Luces moderadas (8 a 14 m) en construcciones mixtas de madera aserrada y laminada, para los elementos de la estructura principal.
- Estructura de cubierta de peso propio reducido.
- Cuando se requiere un aspecto natural y cálido.
- Cuando se precisa una resistencia a los agentes químicos agresivos.

De acuerdo con las normas UNE-EN 14080 y UNE-EN 386, las maderas aptas para la fabricación de este producto serán las siguientes: falso abeto (*Picea abies*), abeto (*Abies alba*), pino silvestre (*Pinus sylvestris*), pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*), pino laricio (*Pinus nigra*), alerce (*Larix decidua*), pino marítimo (*Pinus pinaster*), chopo (*Populus robusta*, *Populus alba*), pino radiata (*Pinus radiata*), picea Sitka (*Picea sitchensis*), hemlock del oeste (*Tsuga heterophylla*), cedro rojo (*Thuja plicata*) y cedro amarillo (*Chamaecyparis nootkatensis*).

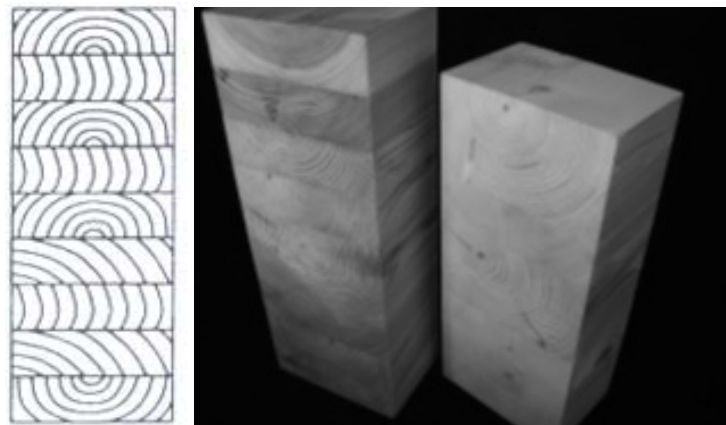


Figura 3-15. Composición de la madera laminada homogénea encolada (Arriaga et al., 2010).

La madera laminada encolada empleada en este trabajo se caracteriza como: madera GL24h, de tipo abeto (*Abies alba*). Tiene su origen en Austria, producida por la casa Noritec Holzindustrie GmbH y distribuida por Almacenes Cámara S.A., según los certificados de calidad (Figura 3-16) y el lote identificado en testa de las vigas (Figura 3-17).

CERTIFICADO DE CONFORMIDAD CE

1359-CPD-0030

En cumplimiento con la Directiva 89/106/CEE del Consejo de las Comunidades Europeas de 21 de diciembre de 1988 relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre los productos de la construcción (Directiva de Productos de Construcción-CPD), modificada por la Directiva 93/68/CEE del Consejo de las Comunidades Europeas de 22 de julio de 1993, se ha verificado que el producto de construcción

Especificaciones de producto
para el CERTIFICADO DE CONFORMIDAD CE 1359-CPD-0030
del 18.02.2009

Madera laminada encolada
correspondientes a las especificaciones indicadas a la vuelta
suministrado al mercado por

Noritec Holzindustrie GmbH
Feistritz 1
A-9751 Sachsenburg

y fabricado en

Feistritz 1, A-9751 Sachsenburg

se somete por parte del fabricante a un control de producción en fábrica y al ensayo posterior de las muestras tomadas en fábrica de acuerdo con un plan de ensayo preestablecido y que el organismo notificado - HOLZFORSCHUNG AUSTRIA - ha llevado a cabo el ensayo inicial de tipo de las características significativas del producto, la inspección inicial de la fábrica y del control de producción en fábrica y que realiza el seguimiento periódico, la evaluación y la aprobación del control de producción en fábrica.

Este certificado indica que se han aplicado todas las disposiciones relativas a la evaluación de la conformidad y especificaciones descritas en el Anexo ZA de la norma

EN 14080:2005

arriba mencionada y que el producto cumple todos los requisitos especificados.

Este certificado fue emitido por primera vez en 14.01.2008 y su una validez permanece mientras no se modifiquen significativamente las condiciones en la especificación técnica armonizada relativa a las condiciones de producción en fábrica o su FPC.

Producto de construcción:

Madera laminada encolada para fines portantes
(edificios y puentes)

Categorías de tablas de madera terciada:

Picea abies/ Abies alba – abeto, GL 24h, GL 24c, GL 28h, GL 28c,
GL 32h, GL 32c; GL 36h, GL 36c
Larix decidua – alerce común,
Pinus sylvestris - pino GL 24h, GL 28h, GL 28c

Datos de resistencias:

conforme a EN 1194

Clases de utilización:

1, 2, 3

Especies de madera:

Picea abies/ Abies alba – abeto,
Larix decidua – alerce común, Pinus
sylvestris - pino

Adhesivo:

Typ: 1: MUF

Comportamiento frente al fuego:

D-s2, d0

Clase de formaldehído:

E1

Clase de durabilidad natural:

Larix decidua – alerce común/ Pinus
sylvestris - pino 3 – 4
Picea abies, Abies alba – abeto 4


DI M. Spjatt
Autorizado para firmar




DI S. Czamutjian
Jefe de la entidad de certificación



Akreditierte Zertifizierungsstelle der Österreichischen Gesellschaft für Holzforschung
HOLZCERT AUSTRIA, A-1030 Wien, Franz Grill-Strasse 7
ZVR 850936522
Tel. +43-17796 65 45-0, Fax +43-1798 26 23-50, E-Mail hca@holzcert.at, Homepage www.holzcert.at

HolzCert Austria es una autoridad de certificación, acreditada y notificada por el Ministerio Federal de Economía y Trabajo (Notified Body 1359)

Figura 3-16. Certificados de conformidad: madera laminada homogénea encolada.



Figura 3-17. Etiqueta de conformidad: madera laminada homogénea encolada.

Las dimensiones de este producto no están normalizadas en una serie de tamaños, sino que cada fabricante tiene dimensiones ligeramente diferentes para el ancho y espesor de lámina. La gama de medidas habituales suele estar entre 50 mm a 300 mm de ancho y 100 mm a 2.500 mm de alto. Son habituales alturas de 80, 100, 110, 130, 140, 160, 180, 200 y 220 mm. Por lo general, la exigencia de resistencia al fuego de 30 minutos obliga a un ancho mínimo en madera de coníferas del orden de 90 a 100 mm. En cualquier caso, esto deberá ser comprobado por el cálculo. La altura máxima de la pieza varía con las características particulares de cada fabricante, pero suele estar en torno a 2.400 mm. La longitud máxima en pieza recta es del orden de 42 m.

Los valores nominales de anchura, altura y longitud de las piezas se ajustarán a las tolerancias especificadas en la norma (UNE-EN 390, 1995):

- anchura de la sección transversal: ± 2 mm.
- altura de la sección transversal:

- $h \leq 400$ mm (+4/-2) mm.
- $h > 400$ mm (+1/-0,5) %.
- longitud de un elemento recto:
 - $l \leq 2$ m (± 2) mm.
 - 2 m $> l \leq 20$ m ($\pm 0,1$).
 - $l > 20$ m (± 20) mm.

Las propiedades mecánicas pueden ser calculadas, una vez establecida la clase resistente, a partir de la normativa (DB SE M, 2009) y (UNE-EN 1194, 1999), según se recoge en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Madera laminada encolada homogénea GL24h. Valores de las propiedades asociadas a esta clase resistente [según (DB SE M, 2009) Tabla E.3] y (UNE-EN 1194, 1999).

Propiedades		Valor
Resistencia (característica), en N/mm ²		
Flexión	$f_{m,g,k}$	24
Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	16,5
Tracción perpendicular	$f_{t,90,g,k}$	0,4
Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	24
Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	2,7
Cortante	$f_{v,g,k}$	2,7
Rigidez, en kN/mm ²		
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,medio}$	11,6
Módulo de elasticidad paralelo 5º-percentil	$E_{0,g,k}$	9,4
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,g,medio}$	0,39
Módulo transversal medio	$G_{g,medio}$	0,72
Densidad, en kg/m ³		
Densidad característica	$\rho_{g,k}$	380

Se considera que la madera tiene un comportamiento elástico lineal ortótropo en las direcciones radial (R), transversal (T) y longitudinal (L), descrito en el Capítulo 2 y la Ecuación 2-2. Además, dado que se obtiene a partir de láminas de madera enteriza con diferentes tipos de corte (véase Figura 2-6), presenta un comportamiento similar en las direcciones radial y tangencial (sólido transversalmente isótropico) caracterizado por las constantes elásticas indicadas en la Tabla 2-4.

Teniendo en cuenta las relaciones vistas en el Apartado 2.2.3.6 y las variables establecidas, en la madera laminada encolada homogénea GL24h cuyas propiedades mecánicas se indicaron en la Tabla 3-1, se pueden relacionar las constantes que definen el material en su comportamiento ortótropo (Tabla 3-2). Para completar estas variables se hace uso de la Tabla 2-4 y en el caso de los coeficientes de Poisson ν_{LR} y ν_{RL} , se toma un valor medio de las aproximaciones establecidas en la Tabla 2-6.

Tabla 3-2. Madera laminada encolada homogénea GL24h. Módulos elásticos y coeficientes de Poisson.

E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{TR}	G_{RT}	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{RL}	ν_{TL}	ν_{TR}
11.600	390	390	720	720	83,6	8,9	0,41	0,41	0,51	0,0138	0,0138	0,51
Módulos de elasticidad logitudinal (E) y transversal (G), en N/mm ²												

En la norma (DB SE M, 2009) se establece una relación entre la madera aserrada que sirve de base, y las maderas laminadas encoladas, tanto en las composiciones homogéneas (GLh) como en las combinadas (GLc). En términos generales, la primera presenta igual clase resistente en todas sus láminas, mientras que la encolada combinada tendrá láminas internas de clases resistentes ligeramente menores, según muestra la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Correspondencias conocidas entre clases resistentes de madera laminada encolada y de madera aserrada [según (DB SE M, 2009) Tabla D.2].

Clases resistentes			
Madera laminada encolada homogénea	GL24h	GL28h	GL32h
Todas las láminas	C24	C30	C40
Madera laminada encolada combinada	GL24c	GL28c	GL32c
Láminas externas*	C24	C30	C40
Láminas internas	C18	C24	C30

* Los requisitos se aplican al sexto del canto extremo de cada lado, con un mínimo de 2 láminas.

3.4.2 Madera maciza encolada

La madera maciza encolada puede estar compuesta por dos o tres láminas previamente seleccionadas, que han sido encoladas entre sí por su superficie plana formando una viga. Por este motivo, comercialmente se conocen respectivamente con el nombre de vigas dúo y trío o marcas derivadas: QLh-Dúo-plus® y QLh-Trío-plus®. Estas vigas se componen a partir de perfiles estructurales de sección rectangular, con un espesor superior a 45 mm y menor o igual a 85 mm, dispuestos en dirección paralela al eje de las láminas (Figura 3-18).

La madera maciza encolada (QLh) debe estar clasificada de acuerdo con la norma UNE-EN 14081-1 (Arriaga et al., 2010). En Europa central, lo más frecuente es utilizar abeto con una calidad S10 (o S10K), según las indicaciones de la norma DIN 4074-1.

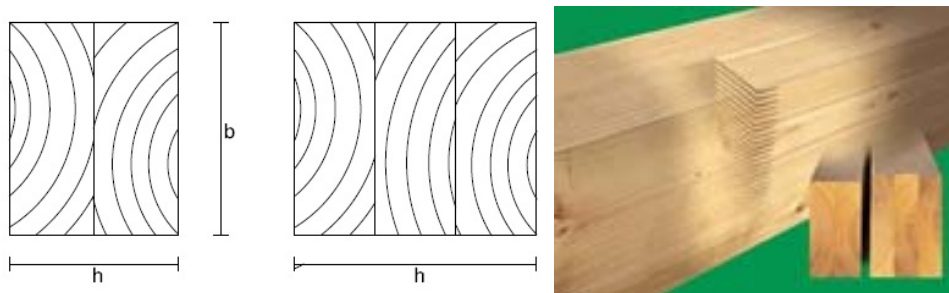


Figura 3-18. Composición de la madera maciza encolada.

Este tipo de madera será otro de los utilizados en el estudio y se describe a continuación. La clase resistente equivalente que se obtiene es C24 y es empleada en vigas, viguetas, pares y correas en viviendas y edificios de luces pequeñas y medianas. La composición es de tipo trío (comercialmente QLh-Trío-plus®) de falso abeto y equivalente (*Picea abies L. Karst*), que es bastante común en Europa central. Sus certificados de calidad se exponen en la Figura 3-19. La madera empleada en el trabajo ha sido producida por la casa Noritec y distribuida por Almacenes Cámara S.A., según los certificados de calidad (Figura 3-19) y el lote identificado en testa de las vigas (Figura 3-20).



Figura 3-19. Certificados de conformidad: madera maciza encolada.

Produktspezifikation
zum ZERTIFIKAT 1359 - CPD - 0177
vom 09.10.2012

Bauprodukt:
Maschinell festigkeitssortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt

Holzarten	Herkunft	Festigkeitsklassen	Dimension
Fichte (Picea abies - PCAS)	DE, AT, CZ, CH, FI, NO, SE, ES, LV, PL, RU*	L17, L22, L25, L27, L30, L36, L40	Dicke 26 - 98 mm Breite 63 - 310 mm

*wesentlich vom Uml und nördlich vom 55. Breitengrad

Visuell festigkeitssortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt

Holzarten	Herkunft	Sortierform	Sortierklassen	Festigkeitsklassen gemäß EN 338
PCAS - Picea abies	MNO	ONORM DIN 4074-1	S7, S10, S13	C16, C24, C30
Fichte			S7K, S10K, S13K	C16, C24, C30
ABAL - Abies alba	MNO	ONORM DIN 4074-1	S7, S10, S13	C16, C24, C30
Tanne			S7K, S10K, S13K	C16, C24, C30
	AT, DE	ONORM DIN 4074-1	S7, S10, S13	C16, C24, C30
			S7K, S10K, S13K	C16, C24, C30
PNSY - Pinus sylvestris	MNO	ONORM DIN 4074-1	S7, S10, S13	C16, C24, C30
Kiefer			S7K, S10K, S13K	C16, C24, C30
LADC - Larix decidua	MNO	ONORM DIN 4074-1	S7, S10, S13	C16, C24, C30
Lärche			S7K, S10K, S13K	C16, C24, C30
	AT, DE	ONORM DIN 4074-1	S7, S10, S13	C16, C24, C30
			S7K, S10K, S13K	C16, C24, C30
Holzartenkombination				
WPCA - Fichte, Tanne	MNO	ONORM DIN 4074-1	S7, S10, S13	C16, C24, C30
			S7K, S10K, S13K	C16, C24, C30
WPCA - Fichte, Tanne	AT, DE	ONORM DIN 4074-1	S7, S10, S13	C16, C24, C30
			S7K, S10K, S13K	C16, C24, C30
WPPA - Fichte, Tanne, Kiefer	MNO	ONORM DIN 4074-1	S7, S10, S13	C16, C24, C30
			S7K, S10K, S13K	C16, C24, C30
WPPA - Fichte, Tanne, Kiefer	AT, DE	ONORM DIN 4074-1	S7, S10, S13	C16, C24, C30
			S7K, S10K, S13K	C16, C24, C30



Figura 3-20. Etiqueta de conformidad para madera maciza encolada.

Generalmente, el grosor (h), la anchura (b) y el área (A) de la sección transversal de las láminas cepilladas cumplen las siguientes condiciones:

$$h \leq 80 \text{ mm} \quad b \leq 240 \text{ mm} \quad A \leq 15.000 \text{ mm}^2$$

El proyecto de norma prEN 14080 limita el grosor a un máximo de 85 mm, la anchura a 280 mm y el canto a 240 mm. Las dimensiones comerciales disponibles se indican en la Tabla 3-4. También se indica que todas las láminas deberán tener el corazón hacia el mismo lado, con la excepción de las piezas destinadas a la clase de servicio 3, en las que las láminas extremas en cada lado deberán tener el corazón mirando hacia el exterior (lo que minimiza las fendas).

Tabla 3-4. Dimensiones comerciales disponibles según composición dúo o trío, madera maciza encolada.

Anchura	Grosor							
	100	120	140	160	180	200	220	240
60		☐☐	☐☐	☐☐	☐☐	☐☐	☐☐	☐☐
80				☐☐	☐☐	☐☐	☐☐	☐☐
100	☐☐			☐☐	☐☐	☐☐	☐☐	☐☐
120		☐☐		☐☐	☐☐	☐☐	☐☐	☐☐
140			☐☐			☐☐	☐☐☐	☐☐☐
160				☐☐		☐☐☐	☐☐☐	☐☐☐
180					☐☐☐	☐☐☐	☐☐☐	☐☐☐
200						☐☐☐		
Longitudes de almacenamiento de 8 m, 10 m y 12,5 m								

Los valores nominales de anchura, grosor y longitud de las piezas se ajustarán a las tolerancias especificadas en la norma (UNE-EN 336, 2003).

- Para la clase de tolerancia 1:
 - Grosos y anchuras ≤ 100 mm (-1 /+3) mm.
 - Grosos y anchuras > 100 mm (-2/+4) mm.
- Para la clase de tolerancia 2:
 - Grosos y anchuras ≤ 100 mm (-1/+1) mm.
 - Grosos y anchuras > 100 mm (-1,5/+1,5) mm.

El grosor real medio y la anchura real media de la madera aserrada no deben ser menores a las dimensiones nominales, considerando y admitiendo las variaciones dimensionales debidas a la humedad.

Las propiedades mecánicas se calculan a partir de los valores para la madera aserrada que son descritos en la norma (DB SE M, 2009) y resumidos en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Madera aserrada. Valores de las propiedades asociadas a la clase resistente C24 [(DB SE M, 2009) Tabla E.1].

Propiedades	Valor	
Resistencia característica, en N/mm ²		
Flexión	$f_{m,k}$	24
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	14
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	22
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,5
Cortante	$f_{v,k}$	4
Rigidez, en kN/mm ²		
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	11
Módulo de elasticidad paralelo 5º-percentil	$E_{0,k}$	7,4
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,37
Módulo transversal medio	G_{medio}	0,69
Densidad, en kg/m ³		
Densidad característica	ρ_k	350
Densidad media	ρ_{medio}	420

Una vez caracterizados los valores de resistencia, rigidez y densidad de la madera aserrada C24, se pueden identificar también los valores de la madera laminada encolada, como se puede ver en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Propiedades de la madera encolada calculadas a partir de las propiedades de láminas fabricadas con madera de coníferas de clase resistente C24 [(DB SE M, 2009) Tabla D.1].

Propiedades		Expresión y valor obtenido
Resistencia (característica), en N/mm ²		
Flexión	$f_{m,g,k}$	$f_{m,g,k} = 7 + 1,15 \cdot f_{t,0,k} = 23,1$
Tracción paralela	$f_{t,0,g,k}$	$f_{t,0,g,k} = 5 + 0,8 \cdot f_{t,0,k} = 16,2$
Tracción perpendicular	$f_{t,90,g,k}$	$f_{t,90,g,k} = 0,2 + 0,015 \cdot f_{t,0,k} = 0,4$
Compresión paralela	$f_{c,0,g,k}$	$f_{c,0,g,k} = 7,2 \cdot f_{t,0,k}^{0,45} = 23,6$
Compresión perpendicular	$f_{c,90,g,k}$	$f_{c,90,g,k} = 0,7 \cdot f_{t,0,k}^{0,5} = 2,6$
Cortante	$f_{v,g,k}$	$f_{v,g,k} = 0,32 \cdot f_{t,0,k}^{0,8} = 2,6$
Rigidez, en kN/mm ²		
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,g,medio}$	$E_{0,g,medio} = 1,05 \quad E_{o,medio} = 11,55$
Módulo de elasticidad paralelo 5º percentil	$E_{0,g,k}$	$E_{0,g,k} = 0,85 \quad E_{o,medio} = 9,35$
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,g,medio}$	$E_{90,g,medio} = 0,035 \quad E_{o,medio} = 0,385$
Módulo transversal medio	$G_{g,medio}$	$G_{g,medio} = 0,065 \quad G_{o,medio} = 0,715$
Densidad, en kg/m ³		
Densidad característica	$\rho_{g,k}$	$\rho_{g,k} = 385$

Para la madera QL24h, la norma alemana DIN 4074-1 identifica la clase resistente equivalente S10 con los valores expuestos en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Madera aserrada. Valores de las propiedades asociadas a la clase resistente S10 (DIN 4074-1).

Propiedades		Valor
Resistencia (característica), en N/mm ²		
Flexión	$f_{m,k}$	24
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	14
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	22
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,6
Coeficientes de cálculo módulo de elasticidad y para el cizallamiento		
Rigidez, en kN/mm ²		
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	11
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,37
Módulo transversal medio	G_{medio}	0,69
Densidad, en kg/m ³		
Densidad característica	ρ_k	350
Densidad media	ρ_{medio}	410

En cualquier caso, se hará uso de los valores para madera aserrada C24 establecidos en la Tabla 3-5. Distintas publicaciones (Arriaga et al., 2010) ratifican la relación entre madera QL24 y S10, obteniendo una clase resistente equivalente C24. Además, la norma (DB SE M, 2009) también establece la equivalencia para la especie falso abeto (*Picea abies L. Karst*), según la Tabla 2-8, y para la clase S10 (de la norma DIN 4074-1) según la Tabla 2-9, con madera aserrada de clase resistente C24.

Otras propiedades que caracterizan la madera son el hinchamiento y contracción (Tabla 3-8), y parámetros como la conductividad térmica o la velocidad de combustión (Tabla 3-9).

Tabla 3-8. Hinchamiento y contracción para la madera C24 y equivalentes.

Tasas de hinchamiento y contracción	
Diferencial de hinchamiento/contracción (cambio de la humedad de la madera en 1 %)	0,24 %
Anisotropía de hinchamiento/contracción (relación tangencial con radial)	2
Coefficiente de hinchamiento/contracción (cambio de la humedad relativa del aire en 1 %)	0,054 %

Tabla 3-9. Parámetros de la madera C24 y equivalentes.

Características y parámetros	
Resistencia a la difusión del vapor de agua, μ (DIN 4108)	40
Conductividad térmica, λ_R (DIN 4108)	0,13W/(m·K)
Durabilidad (clase de resistencia) (DIN 68364) (EN 350)	4
Estabilidad dimensional y de formato	buena
Clase de material (DIN 4102)	B2 (normalmente inflamable)
Velocidad de combustión en el medio	0,7-0,8 mm/min

3.5 Caracterización de las clavijas objeto de estudio

El material empleado para las clavijas es acero de construcción, como ya se indicó en el Apartado 3.2.3, aunque también se utilizaron aceros de la familia F1 para contemplar la influencia de la ductilidad del acero. Los diámetros nominales de clavija (d) están comprendidos entre 10 y 30 mm. En cuanto a la superficie, se emplean clavijas:

- Lisas para facilitar el estudio de los casos más sencillos y ajustados a norma.
- Roscadas, porque es previsible que amplifiquen el efecto sogá al mejorar la fricción con la madera en el interior del agujero, facilitando la incrustación de fibras entre los filetes del roscado y la fijación del adhesivo (si se intercala entre clavija y agujero).
- Moleteadas, para comparar la fricción y el debilitamiento del momento plástico, frente a las lisas y, especialmente, frente a las roscadas donde se presentan pérdidas de sección.

3.5.1 Clavija de acero roscada

La combinatoria del tipo de clavija que se puede emplear es muy amplia: pernos de alta calidad, lisos, barras de acero corrugado, materiales alternativos al acero; pero en consideración a lo indicado en el Apartado 3.2.13.5 y con la filosofía de emplear materiales habituales que potencien la adherencia del adhesivo, para el caso de varilla roscada se va a emplear en el estudio un acero DIN 975 de la casa Varosa y calidad 5.6 con protección superficial. Esta protección superficial del elemento metálico resulta obligada para elementos de fijación, según norma (DB SE M, 2009), ya que la clase de servicio condiciona el tipo de protección mínima que la clavija debe tener (Tabla 3-10).

Tabla 3-10. Protección mínima frente a la corrosión (relativa a la norma ISO 2081), o tipo de acero necesario [según (DB SE M, 2009), Tabla 3.2].

ELEMENTOS DE FIJACIÓN	CLASE DE SERVICIO		
	1	2	3
Clavos y tirafondos con $d < 4$ mm	Ninguna	Fe/Zn 12 c *	Fe/Zn 25 c **
Pernos, pasadores y clavos con $d > 4$ mm	Ninguna	Ninguna	Fe/Zn 25 c **
Grapas	Fe/Zn 12 c *	Fe/Zn 12 c *	Acero inoxidable
Placas dentadas y chapas de acero con espesor de hasta 3 mm	Fe/Zn 12 c *	Fe/Zn 12 c *	Acero inoxidable
Chapas de acero con espesor por encima de 3 y hasta 5 mm	Ninguna	Fe/Zn 12 c *	Fe/Zn 25 c **
Chapas de acero con espesor superior a 5 mm	Ninguna	Ninguna	Fe/Zn 25 c **

* Si se emplea galvanizado en caliente, la protección Fe/Zn 12c debe sustituirse por Z 275, y la protección Fe/Zn 25 c debe sustituirse por Z 350.
 ** En condiciones expuestas especialmente a la corrosión, debe considerarse la utilización de Fe/Zn 40 c, un galvanizado en caliente más grueso o acero inoxidable.

Por otro lado, se tomarán los valores característicos del acero tal y como indica la norma (DB SE A, 2009).

- módulo de elasticidad: E 210.000 N/mm²
- módulo de elasticidad transversal: G 81.000 N/mm²
- coeficiente de Poisson: ν 0,3
- densidad: ρ 7.850 kg/m³

Los límites elástico (f_{yb}) y último (f_{ub}) del acero de la clavija, requeridos para el cálculo del momento plástico, quedan reflejados en la Tabla 3-11.

Tabla 3-11. Características mecánicas de los aceros de clavijas, tuercas y arandelas (DB SE A, 2009).

Clase	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
f_{yb}	240	300	480	640	900
f_{ub}	400	500	600	800	1000

En el presente trabajo, estos límites se han verificado mediante ensayos no destructivos de dureza, según los valores establecidos (Tabla 3-12) y con ensayos de tracción simple en acero, ante la dificultad de obtener los certificados de calidad del fabricante Varosa.

Tabla 3-12. Características mecánicas y físicas de varillas roscadas DIN 975.

Características mecánicas y físicas		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		10.9	12.9
								d ≤ 16 mm	D > 16 mm		
Resistencia nominal a la tracción R_m nominal	N/mm ²	300	400	400	500	500	600	800	800	1000	1200
Resistencia mínima a la tracción R_m mínima	N/mm ²	330	400	420	500	520	600	800	830	1040	1220
Dureza Vickers, HV $F \geq 98$ N	Min	95	120	130	150	160	190	250	250	320	385
	Max	220	220	220	220	220	250	320	335	380	435
Dureza Brinell, HB	Min	90	114	124	147	152	238	242	276	304	366
	Max	209	209	209	209	209	304	318	342	361	414
Dureza Rockell, HR	Min B	52	67	71	79	82	89				
	Min C							22	23	32	39
	Max B	95	95	95	95	95	99,5				
	Max C							32	34	39	44
Límite elástico inferior R_{el} (N/mm ²)	Nor	180	240	320	300	400	480				
	Min	190	240	340	300	420	480				
Límite elástico convencional R_p (N/mm ²)	Nor							640	640	900	1080
	Min							640	660	940	1100
Alargamiento porcentual después de la rotura, A	Min	25	22		20			12	12	10	8
Resistencia a impacto	J min				25			30	30	20	15

En la Tabla 3-13 se muestra el paso de los distintos tipos de rosca métrica normalizada, así como su peso y las cotas que permiten calcular el diámetro interior. Este es especialmente interesante, ya que es el que realmente puede afectar al momento plástico. Las roscas métricas, del tipo agudas o triangulares, quedan definidas por el valor del diámetro exterior (d), del núcleo (d_3) y del de los flancos (d_2), así como por el valor del ángulo de los flancos de la rosca ($\alpha = 60^\circ$, si se trata de la rosca triangular ISO) y, finalmente, por la medida del paso (p). Para las roscas métricas ISO, los ángulos de las espiras son de 60° , y en los tornillos se redondea el fondo de la rosca, con el fin de evitar localización de tensiones por entalla, mientras que las puntas de los filetes de rosca son planas (Figura 3-21).

Tabla 3-13. Paso y peso de varillas roscadas DIN 975.

	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M39
Paso (mm)	0,5	0,7	0,8	1	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2,5	2,5	2,5	3	3	3,5	3,5	4	4
Peso (kg/m)	0,04	0,08	0,12	0,18	0,25	0,32	0,5	0,73	0,97	1,33	1,65	2,08	2,54	3	3,85	4,57	5,9	6,9	8,2
d_3 (mm)= $d+2P\cos(30^\circ)\cdot$ $(1/8-1+1/6)$	2,4	3,1	4,0	4,8	5,8	6,5	8,2	9,9	11,5	13,5	14,9	16,9	18,9	20,3	23,3	25,7	28,7	31,1	34,1

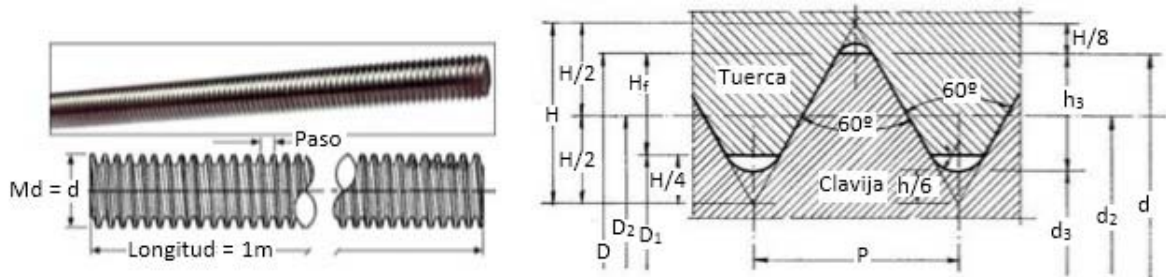


Figura 3-21. Perfil y relaciones de geometría de varillas roscadas.

Los valores geométricos de las roscas han sido verificados con un proyector de perfiles (Figura 3-22). En la Tabla 3-14 se muestran algunas de las cotas ratificadas con el proyector de perfiles.



Figura 3-22. Verificación de perfiles con proyector para las varillas roscadas.

Tabla 3-14. Resultados de verificación de geometría de varillas roscadas, DIN 975.

	Paso	h_3	d	d_{int}	$d_3 = d + 2 \cdot P \cdot \cos(30^\circ) \cdot (1/8 - 1 + 1/6)$
10	1,5	0,96	10	7,89	8,160
12	1,75	0,95	11,6	9,74	9,453
14	2	1,15	13,6	11,22	11,146

3.5.2 Clavija de acero para la construcción

La elección de los aceros de construcción se realiza según la norma (UNE-EN 10025-2, 2006), que es también asumida en los documentos de seguridad estructural para edificación (DB SE A, 2009), y por la Instrucción de Acero Estructural (EAE). Los límites de resistencia elástico y último, requeridos para el cálculo del momento plástico, se reflejan en la Tabla 3-15 y en la Tabla 3-16.

Tabla 3-15. Características mecánicas mínimas de los aceros según (UNE-EN 10025-2, 2006) y su transcripción (DB SE A, 2009).

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t, en mm				Temperatura del ensayo Charpy
	Tensión de límite elástico f_{yb} en N/mm ²		Tensión de rotura f_u , en N/mm ²		
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100	°C
S235JR S235J0 S235J2	235	225	215	360	20 0 -20
S275JR S275J0 S275J2	275	265	255	410	20 0 -20
S355JR S355J0 S355J2 S355K2	355	345	335	470	20 0 -20 -20*
S450J0	450	430	410	550	0

*Se le exige una energía mínima de 40 J

Tabla 3-16. Características mecánicas mínimas de los aceros según (UNE-EN 10025-2, 2006) y su transcripción a la Instrucción de Acero Estructural EAE (Art. 27. Tipos de acero).

Tipo	Espesor nominal t, en mm			
	t < 40		40 < t < 80	
	f_y	f_u	f_y	f_u
S 235	235	360 < f_u < 510	215	360 < f_u < 510
S 275	275	430 < f_u < 580	255	410 < f_u < 560
S 355	355	490 < f_u < 680	335	470 < f_u < 630

Dado que la ductilidad es un factor aconsejable, se muestran los valores de resiliencia (véase la Tabla 3-17). Con esta propiedad se puede establecer la energía que es capaz de recoger el acero.

Tabla 3-17. Resiliencia (J), según el espesor nominal de producto t (mm) según (UNE-EN 10025-2, 2006) transcripción a Instrucción de Acero Estructural EAE (Art. 27. Tipos de acero).

Grado	Temperatura de ensayo, en °C	Resiliencia, en J		
		T < 150	150 < t < 250	250 < t < 400
JR	20	27	27	-
J0	0	27	27	-
J2	- 20	27	27	27
K2	- 20	40 *	33	33

*Equivale a una resiliencia de 27J a - 30 °C.

3.5.3 Clavija de acero al carbono no aleado y templado

Para los aceros al carbono no aleados y templados suministrados, la Tabla 3-18 muestra la composición química según la documentación facilitada por el proveedor. Esta composición puede ser comparada con la reflejada en la Tabla 3-19, que es requerida en aceros no aleados de construcción como establece la norma (UNE-EN 10025-2, 2006). Se indica en negrita el acero caracterizado para el trabajo. Por otro lado, en la Tabla 3-20 se puede ver la relación de designaciones entre distintas normas para ratificar las propiedades mecánicas.

Tabla 3-18 Aceros F111. Composición química según suministrador.



**Aceros
IMS** Int., S.A.

C.I.F.: A-08.426.470
Turquesa 67-A P.S.Cristobal
47012 VALLADOLID
TFNO: 983303504 - FAX: 983303925



HIERROS RUBIO, S.L. -2390-
C/VILLALPANDO S/N
49023 POL. LOS ARENAL-ZAMORA
CIF B49142821
Tf. 980670280

CERTIFICADO DE COLADA

L CALIDAD	COLADA	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
1 F-1	22081	0,095	0,512	0,136	0,010	0,029			
2 F-1	34838 A	0,097	0,525	0,147	0,022	0,030			
3 F-1	34677 A	0,165	0,700	0,202	0,010	0,013			
4 F-1	324538	0,170	0,719	0,162	0,024	0,019			
5 F-1	34268 G	0,230	0,835	0,121	0,010	0,002			
6 F-1	34902 A	0,107	0,495	0,118	0,021	0,039			
7 F-1	33843 G	0,220	0,950	0,116	0,010	0,003			
8 F-1	323676	0,160	0,706	0,191	0,023	0,020			
9 F-1	174835	0,130	0,630	0,160	0,010	0,033			
10 F-1	178020	0,130	0,620	0,160	0,008	0,026			
11 F-1	32874	0,090	0,450	0,090	0,027	0,025			

***** E S C O P I A *****

HIERROS RUBIO, S.L.
C.I.F. B 49142821
CTRA. GIJON - SEVILLA. Km. 277
ZAMORA
TELF. 980 67 02 80

CONFORME CLIENTE
FIRMA

Tabla 3-19. Aceros no aleados de construcción. Composición química según (UNE-EN 10025-2, 2006) transcripción a Instrucción de Acero Estructural EAE.

Designación	Estado de desoxidación	C (%) máx. Para espesor nominal del producto, en mm			Si % máx.	Mn % máx.	P % máx.	S % máx.	N % máx.	Cn % máx.	Otros máx.	
		<16	>16 <40	>40	d	d,e	f	g	h			
Según normas EN 10027-1 y CR 10260	Según norma EN 10027-2											
S235JR	1.0038	FN	0,17	0,17	0,20	-	1,40	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S235J0	1.0114	FN	0,17	0,17	0,17	-	1,40	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S235J2	1.0117	FF	0,17	0,17	0,17	-	1,40	0,025	0,025	-	0,55	-
S275JR	1.0044	FN	0,21	0,21	0,22	-	1,50	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S275J0	1.0143	FN	0,18	0,18	0,18	-	1,50	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S275J2	1.0145	FF	0,18	0,18	0,18	-	1,50	0,025	0,025	-	0,55	-
S355JR	1.0045	FN	0,24	0,24	0,24	0,55	1,60	0,035	0,035	0,012	0,55	-
S355J0	1.0553	FN	0,20	0,20	0,22	0,55	1,60	0,030	0,030	0,012	0,55	-
S355J2	1.0577	FF	0,20	0,20	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	-	0,55	-
S355K2	1.0596	FF	0,20	0,20	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	-	0,55	-
S450J0	1.0590	FF	0,20	0,20	0,22	0,55	1,70	0,030	0,030	0,025	0,55	-

Tabla 3-20. Aceros de construcción no aleados para temple y revenido UNE 36 011, según EN 10 083 DIN 17 200/210.

Designaciones								C. QUÍMICA (% típicos medios)		
Convenc.	I.H.A.	Núm.	UNE	DIN	NF	BS	AISI/SAE/ASTM	C	Mn	Si
F.1	-	-	-	-	-	-	-	0,13	0,50	0,25
Acero de cementac.		1.1121	F-1510 (C10K)	CK10 (C10E)	XC10	040M10	1010	0,10	0,45	0,25
	F-111	305	F-1110	C15 (CK15)	XC12	EN.2	1015	0,10/0,20	0,30/0,50	0,15/0,30
	F-112	306 1.1151	F-1120 (C22E)	C2 (CK22)	XC25	EN.4	1025	0,20/0,30	0,40/0,70	0,15/0,30
	F-113	307	F-1130	C35 (CK35)	XC35	EN.5	1035	0,30/0,40	0,40/0,70	0,15/0,30
	F-114	308 1.1191	F-1140 (C45E)	C45 (CK45)	XC45	EN.8 (080M46)	1045	0,45	0,70	0,25
	F-115	310 1.1203	F-1150 (C55E)	C55 (CK55)	XC55	EN.9 070M55	1055	0,55	0,70	0,25
ST 52		1.0580	F-1515	20Mn5	E36-3	Fe510D1FF	1024	0,22	1,60	0,55
C 60		1.1221	(C60E)	CK60	XC60	080A62	1060	0,60	0,70	0,25

Debido a la falta de certificaciones de producto y dado que los aceros de la familia F1 son menos empleados en construcción, se opta por realizar ensayos con probetas de este material de cara a ratificar sus propiedades mecánicas.

3.5.4 Ensayos para la caracterización de las clavijas

3.5.4.1 Ensayos de tracción simple

Dada la importancia de la caracterización de los aceros, se han realizado ensayos de tracción simple según norma (UNE-EN ISO 6892-1, 2010). Se han tomado muestras de los tres materiales empleados en el presente trabajo (calidades 5.6, S275 JR y F111) que han dado lugar a probetas cuya zona de rotura se puede apreciar en la Figura 3-23. La evolución de las curvas tensión-deformación queda reflejada en la Figura 3-24, donde se pueden identificar variables como el límite elástico del material.



Figura 3-23. Probetas de ensayo a tracción de las clavijas (Acero F111).

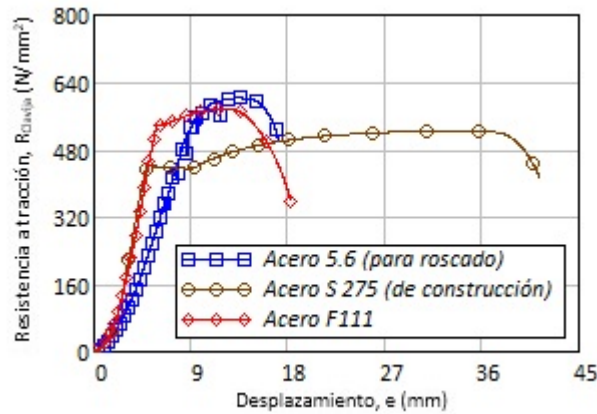


Figura 3-24. Ensayos de tracción simple en barras de diámetro $d = 10$ mm. Comparativa entre clavijas de varilla roscada 5.6, normalizada S275 y calibrada de tipo F111.

La Tabla 3-21 muestra los valores de carga y las tensiones de límite elástico (f_y) y último (f_u) de los aceros empleados de tipo: roscados (calidad 5.6), aceros de construcción de alta resiliencia (S275) y aceros calibrados (F111).

Tabla 3-21. Valores característicos de las clavijas.

Ensayo	Carga de límite elástico, R_y (N)	Carga de límite último, R_u (N)	d (mm)	A (mm^2)	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)
Acero roscado, 5.6 Según UNE-EN ISO 898-1	16.660,00	20.972,00	8	50,72	300,00	500,00
Ensayo 1	17.257,86	19.565,36	7,92	49,27	480,31	495,14
Ensayo 2	17.357,33	19.595,34	7,92	49,27	603	632,32
Ensayo 3	17.357,32		7,92	49,27		
	17.257,86	19.565,36				
Acero para construcción, S275 JR Según UNE-EN 10025	-	-	10	78,54	275,00	410,00
Ensayo 1	4.300,00	21.402,00	10	78,54	442,23	523,04
Ensayo 2	34.807,70	41.157,97	10	78,54	443,19	524,04
Ensayo 3	35.511,77	40.956,01	10	78,54	452,15	521,47
	34.842,90	40.966,11			443,63	521,60
Acero calibrado, F111	-	-	-	-	-	-
Ensayo 1	43.250,83	45.478,70	10	78,54	550,69	579,05
Ensayo 2	42.823,84	45.287,97	10	78,54	545,25	576,62
Ensayo 3	42.819,52	45.380,59	10	78,54	545,20	577,80
	42.819,95	45.297,23			545,20	576,74

3.5.4.2 Ensayos de dureza Vickers

Para ratificar la caracterización de los aceros utilizados en las clavijas se han realizado también ensayos de dureza. Entre los distintos ensayos de dureza, el ensayo Vickers es simple, de alto rendimiento y es útil para ratificar las propiedades de los diferentes componentes microestructurales del material al medir la resistencia a la penetración de una herramienta (penetrador), con unas condiciones de aplicación de la carga establecida. También se tomaron correlaciones Brinell.

En el procedimiento ensayo Vickers se ha utilizado un penetrador de diamante en forma de pirámide de base cuadrada, aplicado perpendicularmente a la superficie, bajo la acción de una carga P. Esta carga se mantiene durante

un cierto tiempo, después del cual es retirada y se mide la diagonal de la impresión que quedó sobre la superficie de la muestra.

Con este valor y utilizando tablas de relación con el tipo de material, como la Tabla 3-12, se relaciona la dureza Vickers (HV) con el tipo de material. Se aplica un marcador piramidal de diamante con un ángulo de 136° entre las caras opuestas. Como resultado, la impresión sobre la muestra (la huella) será un cuadrado donde la longitud de la diagonal se suele medir a través del microscopio para después aplicar la Ecuación 3-1.

$$HV = \frac{1.854 \cdot C}{d^2}$$

Ecuación 3-1

Siendo:

- C carga aplicada al penetrador, en kg.
- d longitud de la diagonal del cuadrado de la impresión, en mm.

En este caso se ha empleado un microdurómetro digital (marca MicroDur II, de la casa Kratkramer Branson) que integra todo el proceso, incluyendo la definición de la dureza Vickers (Figura 3-25).



Figura 3-25. Caracterización de acero de clavijas con microdurómetro, según ensayo ISO 6506:2005.

Las probetas han sido extraídas a partir de secciones transversales de las clavijas, se han sometido a un pulido especular y la superficie plana ha sido ensayada en condiciones análogas (Figura 3-26). Los resultados de los ensayos son los mostrados en la Tabla 3-22, donde además se ha determinado el valor correspondiente al 5º percentil de los resultados obtenidos en las tandas de ensayo para cada uno de los tres materiales. Los valores han sido: HV = 180 en acero de calidad 5.6 extraído de varillas roscadas, HV = 133 en acero de construcción S275 JR y HV = 177 en acero calibrado F111.



Figura 3-26. Probetas de clavija expuestas a ensayos con durómetro.

Tabla 3-22. Valores de dureza con ensayos de durómetro.

	Roscado 5.6 (HV)	S275 JR (HV)	F1114 (HV)
Ensayo 1	180	132	167
Ensayo 2	180	133	177
Ensayo 3	182	134	177
Ensayo 4	183	134	178
Ensayo 5	183	134	179
Ensayo 6	184	134	180
Ensayo 7	186	135	182
Ensayo 8	187	135	183
Ensayo 9	188	135	183
Ensayo 10	188	136	183
Ensayo 11	188	136	184
Ensayo 12	190	136	184
Ensayo 13	192	139	184
Ensayo 14	193	139	185
Ensayo 15	193	141	188
Ensayo 16	193	144	189
Ensayo 17	193	145	192
Ensayo 18	194	148	192
Ensayo 19	197	150	193
Ensayo 20	201	167	196
5º percentil	180	133	177

3.5.4.3 Análisis metalográfico

La preparación de probetas con superficie especular, descrita en el apartado anterior, ha servido también para realizar un análisis metalográfico. En él se estudian las características microestructurales o constitutivas del metal, para relacionarlas con las propiedades físicas, químicas y mecánicas. En el desarrollo de las fases de preparación se han realizado los siguientes pasos:

- Corte con sierra metalográfica dotada de un disco especial de corte por abrasión. Mientras realiza el corte, suministra un gran caudal de refrigerante para evitar el sobrecalentamiento de la muestra. De este modo, no se alteran las condiciones microestructurales de la probeta.
- Pulido haciendo uso de una desbastadora o pulidora metalográfica. En una primera fase, para desbaste grueso, se trata la superficie de la muestra con papel de lija, de manera uniforme, disminuyendo sucesivamente el tamaño de grano (Nº de papel de lija) hasta llegar al papel de menor tamaño de grano, haciendo giros sucesivos a 90º. En una segunda fase de desbaste más fino, se requiere de una superficie plana libre de ralladuras, la cual se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas. Hay una tercera fase de pulido metalográfico con paño colocado en el plato giratorio circular, sobre el cual se depositan pequeñas cantidades de abrasivos, en general diamante industrial en polvo fino (o bien en suspensión), con granulometrías de, por ejemplo, 10, 6, 3, 1 y 0,25 micras.
- Ataque químico: durante unos 30 segundos se han expuesto las probetas a Nital (ácido nítrico) diluido al 5 % en alcohol, lo que elimina los granos muertos y revela la estructura cristalina.
- Exposición a microscopio metalográfico, con aumentos que varían entre 50X y 2000X. Opera con la luz reflejada por el metal, por lo que, para poder observar la muestra, es necesario preparar una probeta y pulir a espejo la superficie.

Los resultados de la estructura cristalográfica coinciden (como cabía esperar) con aceros de construcción no aleados. Se identifican estructuras con granos de ferritas (blancos), de perlita (negros) y una composición química que contiene elementos en el siguiente orden de magnitud: C= 0,20 %, Mn= 0,40 %, Si= 0,26 %, P= 0,012 % y S= 0,013 % (Figura 3-27). Estas composiciones ratifican el tipo de material caracterizado en apartados anteriores.

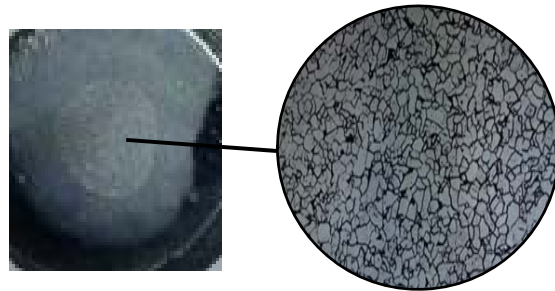


Figura 3-27. Estructura cristalográfica. Probeta tratada con alcohol y Nital (ácido nítrico) al 5 %.

3.6 Refuerzo con adhesivos

No existe un adhesivo universal que permita efectuar cualquier encolado. En caso de ser requerido, su elección es un aspecto muy importante en el ámbito estructural. Ésta está condicionada por los materiales a encolar, el estado de las superficies, las cargas que va a soportar el adhesivo, la exposición a la humedad, los modos y técnicas de aplicación y la cualificación del operador.

Las uniones de madera en las que intervienen los adhesivos responden a dos comportamientos de unión distintos, en muchas ocasiones compatibles:

- Unión mecánica: La unión mecánica basada en adhesivos, más o menos fluidos, supone que se introduzca en los poros de la madera de las dos superficies a unir. Por fraguado, el adhesivo se convierte en un sólido de gran cohesión, anclado fuertemente en ambas piezas. Por ello, la calidad del encolado depende de la rugosidad de las superficies de madera, del número, tamaño y limpieza de poros que contenga, de lo que profundice el adhesivo y de la dureza del adhesivo tras el fraguado.
- Unión específica: Es la que resulta de la atracción química entre los grupos activos de naturaleza polar de la madera y los grupos activos polares del adhesivo. En este caso, la rugosidad de la superficie está demostrado que perjudica la calidad del encolado. También influye la denominada edad de la pieza (tiempo transcurrido desde que se preparó la superficie a encolar), dado que, con el tiempo, el número de grupos polares activos disminuye.

3.6.1 Características del adhesivo

De acuerdo a las necesidades que tenga el elemento de unión, el adhesivo debe presentar las siguientes características:

- Debe ser mojante, es decir, que tenga una tensión superficial muy pequeña.
- La viscosidad ha de ser también baja, para penetrar bien en los poros de la madera. Tampoco conviene que sea excesivamente baja, pues se absorbería rápidamente en las maderas, no quedando nada en la superficie.
- Debe ser polar, lo que supone una separación de las cargas eléctricas en la misma molécula y facilita aspectos como la solubilidad y la creación de fuerzas intermoleculares.
- Ha de poder convertirse en sólido, ya sea por evaporación del disolvente, por enfriamiento o por reacciones químicas.
- Una vez fraguado, debe ser muy resistente.
- Tiene que ser duradero y no alterarse con el tiempo, ni por acciones climatológicas externas (humedad, temperatura, radiación solar...).

En general, las colas no poseen todos estos requisitos, por lo que se suelen combinar con otros elementos simultáneamente, como son:

- Resina: Es la que proporciona la unión pretendida.
- Endurecedor: Es un producto que se añade para activar el fraguado de la resina.
- Cargas y rellenos: Se añaden para bajar el precio de los adhesivos, pero también pueden mejorar propiedades específicas; por ejemplo: la mica, que aumenta las propiedades como aislante eléctrico o la harina, que mejora la elasticidad en las resinas.
- Disolventes: Son productos que facilitan la penetración de la resina en la madera.
- Viscosantes y diluyentes: Se añaden para dar al adhesivo la viscosidad más adecuada.

3.6.2 Factores que afectan a la unión

Hay que tener presente una serie de operaciones y factores para realizar una unión:

- **Extendido.** La aplicación del adhesivo a las superficies a unir debe cubrir toda la superficie de la madera, no sólo en el momento de la aplicación, sino hasta el fraguado. Es decir, que el extendido ha de ser tal que, después de introducirse el adhesivo en los poros de la madera, debe quedar una superficie continua de cola, para que pueda enlazar con la otra superficie a unir.
- **Espesor de la superficie.** Tiene que quedar adhesivo, pero debe ser lo mínimo posible, no sólo por cuestiones de economizar, sino porque tiene más resistencia. De acuerdo con las características de tensión superficial, viscosidad y otras del adhesivo, cada fabricante establece cuál debe ser la dosis óptima que se ha de aplicar para cada uno de sus productos. Algunos autores (Argüelles et al., 2003) recomiendan 1 mm, aunque los fabricantes pueden definir especificaciones particulares.
- **Especie de madera.** La dureza y densidad, condicionadas por la especie de madera, afectan significativamente a la unión en aspectos como el mojado, unido a parámetros específicos del adhesivo como la elasticidad.
- **Presión.** Es conveniente aplicar presión a los productos a encolar, porque facilita el contacto entre los grupos polares de madera y adhesivo. También facilita el fraguado del adhesivo cuando se produce por reacciones químicas.
- **Temperatura.** Aumenta la velocidad de las moléculas del adhesivo, facilitando el contacto entre grupos polares. También suele acelerar el fraguado del adhesivo, excepto algunos tipos particulares (de tipo Hot Melt). En general, los adhesivos requieren de temperaturas superiores a las del medio ambiente para lograr una unión óptima. Incrementar la temperatura supone una disminución de la tensión superficial y de la viscosidad, lo cual facilita la penetración del adhesivo en la madera. Además, produce una evaporación del medio portador (solvente del adhesivo) y acelera las reacciones físico-químicas que conducen al fraguado del adhesivo.

Conjugar temperatura y presión para mejorar el fraguado tiene una serie de ventajas sobre utilizar solo presión; entre las más importantes están la reducción del tiempo de prensado y la posibilidad de aplicar una menor cantidad de adhesivos.

- **Tiempo.** Es necesario para que se establezcan las reacciones químicas necesarias y fragüe el adhesivo. En él se debe resaltar el tiempo de reunión que transcurre desde la aplicación del adhesivo hasta el desarrollo de las condiciones para el fraguado, presión o presión y temperatura. Se compone de dos partes:
 - Tiempo de reunión abierto, entre el esparcido y la unión de los adhesivos.
 - Tiempo de reunión cerrado, entre la unión de adhesivos y la aplicación de las condiciones de fraguado.
- Durante este período, el adhesivo comienza a endurecer y, de acuerdo a las características técnicas, el tiempo de reunión ha de ser regulado. En este control se debe considerar que, si el tiempo de reunión excede los límites máximos y mínimos permitidos por el adhesivo, éste no será capaz de formar una buena unión aunque las condiciones finales de fraguado (presión y temperatura) sean variadas.

- **Geometría.** La geometría del elemento de unión también debe ser tenida en cuenta (Otero et al., 2008), así como aspectos vinculados a la superficie de encolado, la longitud de encolado, el diámetro de la barra o su rugosidad. Todos ellos afectan a la adherencia, especialmente en clavijas.

3.6.3 Tipos de adhesivos

Se desarrolla un primera recopilación de posibles adhesivos en la Tabla 3-23, para seleccionar posteriormente las opciones más interesantes de cara a complementar y reforzar la unión clavija.

Tabla 3-23. Tipos y propiedades de resistencia de los adhesivos de origen natural. Usos característicos (Wood Handbook, USDA. Forest Service, 1999).

Tipo	Forma y color	Preparación y aplicación	Propiedades de resistencia	Usos habituales
Proteínas animales.	Se presentan como sólidos y líquidos de color marrón a blanco.	Se le añade agua cuando está en forma sólida, se empapa, se derrite y se mantiene caliente durante la aplicación. En forma líquida se aplica directamente, tanto a presión como a temperatura ambiente. El proceso de unión se puede ajustar a los pequeños cambios en la temperatura.	En ambiente seco presenta alta resistencia, pero ésta disminuye significativamente en presencia de agua y con atmósferas húmedas.	Se utiliza para ensamblar instrumentos y muebles. También se usa para la reparación de muebles antiguos.
Proteínas de la sangre.	Tradicionalmente se ha hecho uso de sangre entera, parcialmente seca, de color rojo oscuro a negro en la línea de unión.	Se mezcla con agua fría, cal, sosa cáustica y otros productos químicos. Para aplicar estos adhesivos se presiona a temperatura ambiente o calentado hasta los 120 °C, hasta conseguir el secado.	Tiene alta resistencia en seco y una resistencia moderada con agua y en atmósferas húmedas. Se ve afectada por la presencia de microorganismos.	Se aplica en madera blanda de tipo interior, algunas veces en combinación con el adhesivo de soja. Estas proteínas han sido reemplazadas principalmente por adhesivos fenólicos.
Proteínas de caseína.	Se distribuye como polvo con adición de productos químicos. Muestra un color blanco a tostado en la línea de unión.	Hay que mezclar el polvo con agua para después aplicarlo en las superficies y presionar a temperatura ambiente.	Muestra alta resistencia en seco. No es apto para usos en exteriores porque pierde resistencia en presencia de agua y ambientes húmedos.	Se usa principalmente en maderas laminadas de puertas interiores.
Proteínas de soja.	Antes de la aplicación es tratado como polvo con adición de colorantes químicos. Muestra un color de blanco a canela en la línea de unión, aunque puede ser modificado por los colorantes.	Para su preparación se mezcla con agua fría, cal, sosa cáustica y preparados químicos que lo activan. Tras ser aplicado, se presiona a temperatura ambiente o en caliente, sobre todo si se mezcla con pegamento de sangre.	Tiene una resistencia moderada en seco y baja en presencia de agua y ambientes húmedos. Su resistencia frente a temperaturas medias y altas también es moderada.	Se viene empleando con madera contrachapada para uso en interiores. Se está sustituyendo por adhesivos de tipo fenólico, pero se integra con adhesivos de fraguado rápido y adhesivos de resorcinol-soja.
Residuos lignocelulósicos y extractos.	Se presenta en estado líquido o en polvo y puede ser mezclado con adhesivo fenólico. Una vez seco, la línea de unión es de color marrón oscuro.	Se prepara mezclado con cargas (para la fabricación de tableros). El adhesivo se prensa a la vez que es curado en caliente con temperaturas de 130 °C a 150 °C, con una preparación parecida a la del adhesivo fenólico.	Presenta buena resistencia en seco y de moderada a buena resistencia a la humedad. Puede mejorar su durabilidad al mezclarse con adhesivo fenólico.	Se utiliza para reemplazar parcialmente a los adhesivos fenólicos cuando se usan en paneles compuestos y de madera contrachapada.

Tabla 3-24. Tipos y propiedades de resistencia de los adhesivos de origen natural. Usos característicos (Wood Handbook, USDA. Forest Service, 1999) (Cont. 1).

Tipo	Forma y color	Preparación y aplicación	Propiedades de resistencia	Usos habituales
Emulsión de acetato de polivinilo reticulado.	Se presenta en estado líquido a modo de emulsión que incluye copolímeros. Hace uso de un catalizador que se suministra por separado. Presenta un color entre blanco y tostado, con la línea de unión incolora una vez seca.	Al ser una emulsión líquida, requiere ser mezclada con el catalizador. Se cura a temperatura elevada en prensa caliente o expuesta a radiofrecuencia y con temperatura ambiente.	Tiene alta resistencia en seco, que puede ser mejorada en presencia de humedad y temperaturas elevadas. Mantiene la resistencia a largo plazo en ambiente húmedo.	Se utiliza en puertas interiores y exteriores, molduras, carpintería arquitectónica y recubrimientos celulósicos.
Elastómero de contacto.	Tiene apariencia de líquido viscoso, generalmente con bases de neopreno o de estireno-butadieno. El elastómero requiere disolventes orgánicos o emulsiones de agua. Habitualmente es de color amarillo.	En su estado líquido se aplica directamente sobre ambas superficies; se debe secar parcialmente y, a continuación, aplicar presión haciendo uso de elementos como los rodillos de prensado. Tras este proceso, logra una unión casi instantánea condicionada por una temperatura adecuada.	La resistencia se logra inmediatamente después de presionar, y aumenta lentamente durante un período de semanas. La resistencia en seco es muy inferior para la madera convencional; también pierde resistencia si hay presencia de agua o atmósferas húmedas. La película adhesiva cede fácilmente bajo carga estática.	Es de uso habitual en la unión de tapas decorativas para encimeras de cocina, laminación de la fábrica de madera, papel, metal y también en láminas de materiales plásticos.
Masilla elastomérica (adhesivo de construcción).	Presenta consistencia para aplicarse en juntas y rellenos. Pueden ser composiciones sintéticas o naturales. Entre estas últimas, es común el látex (empleado también en la fabricación de caucho). Hace uso de disolventes orgánicos. El color es marrón, amarillo o gris.	Se aplica por extrusión con pistola o con equipos a presión; requiere complementos de clavado u otra fijación para mantener los materiales en su lugar durante el ajuste y el servicio.	Va adquiriendo resistencia de forma lenta durante varias semanas y es resistente al agua y la humedad ambiental. Requiere clavado para asegurar la integridad estructural.	Se puede usar para rellenar huecos en los procesos de montaje de puertas. También se aplica en madera de contrachapado en el suelo. Es compatible con otros sistemas como los trasdosados de cartón y yeso o las espumas rígidas aislantes.
Emulsión de polímero isocianato.	Se facilita por separado para componer una emulsión de líquido polimérico y endurecedor de tipo isocianato. Una vez mezclada, la emulsión es de color blanco y se vuelve incolora en línea de unión cuando ha secado.	Ambos componentes son mezclados por el usuario. Se puede hacer uso de aditivos durante el proceso de mezcla. Curan a temperatura ambiente y con radiofrecuencia donde requiere una alta presión.	Presenta alta resistencia en ambiente seco y húmedo. Es muy resistente al agua y con ambiente húmedo. También resiste ciclos repetitivos de humectación prolongada entre periodos de secado. Se adhiere de forma solvente a metales y plásticos.	Se aplica en vigas, laminadas para interior y exterior, en procesos de laminación de madera contrachapada y cuando tiene que pegarse con metales, plásticos y gran parte de los materiales arquitectónicos.

Tabla 3-24. Tipos y propiedades de resistencia de los adhesivos de origen natural. Usos característicos (Wood Handbook, USDA. Forest Service, 1999) (Cont. 2).

Tipo	Forma y color	Preparación y aplicación	Propiedades de resistencia	Usos habituales
Epoxy.	En estado líquido viscoso requiere suministro de, al menos, dos componentes: la resina y el endurecedor. De aspecto claro a ámbar, aunque el color puede ser modificado con colorantes.	Para la preparación requiere que la resina y el endurecedor sean mezclados en el momento de la aplicación, pudiéndose añadir disolvente para conseguir más fluidez. Una vez curados no admiten disolventes. En función de la formulación química curan a temperatura ambiente o con temperaturas elevadas.	Con alta resistencia en ambiente seco y húmedo, se pueden aplicar a madera, metal, vidrio y plástico. Se pueden encontrar formulaciones para madera (con los aditivos adecuados) resistentes al agua y a atmósferas húmedas. Pueden delaminar con humedecimiento y secado repetidos.	Se aplica en el moldeado de cascos de los barcos de madera, para el montaje de componentes de madera en las aeronaves y, en general, en chapa y madera conformada en frío. También se usa en barandillas arquitectónicas, postes, reparación de vigas de madera laminada y componentes de construcción estructurales.
Fusión en caliente.	Bloques sólidos, pastillas, cintas, barras o películas, sin disolventes, que presentan color blanco y tostado. Una vez curados muestran una línea de unión incolora.	Para su aplicación se funden consiguiendo la difusión. El enlace entre las piezas se establece al solidificarse; requiere equipos de aplicación especial para el control de fusión y el flujo.	Desarrolla fuerza rápidamente al enfriarse, con menor resistencia que los adhesivos de madera convencionales. La resistencia es más moderada en presencia de humedad.	Se utiliza en la franja de borde para los paneles de aglomerado de madera y laminado plástico a modo de parches y cintas de canteado. Otro uso es para la superposición de papel o en el montaje de muebles.
Isocianato.	Los isómeros son líquidos que contienen oligómeros de metileno difenil disocianato. El líquido es ligero y de color marrón, y claro en la línea de unión.	El adhesivo es aplicado directamente por aspersión. Requiere reactivos como el agua (en ocasiones simplemente la humedad ambiental). Con una alta temperatura y alta presión se produce un mejor desarrollo de enlace, especialmente en los tableros de aglomerado.	Es resistente en seco, muy resistente al agua y ambiente húmedo. Se adhiere a los metales y los plásticos.	Se interpone en tableros de aglomerado.
Melamina y melamina-urea.	Se suministra en polvo con un catalizador mezclado. Se le puede añadir hasta un 40 % de urea. Es blanco o color canela, se muestra incoloro en la línea de unión una vez fraguado.	Para la preparación se mezcla con agua. Posteriormente es curado en prensa caliente (120 ° C a 150 ° C). Es especialmente adecuado para el curado rápido de alta frecuencia.	Tiene buena resistencia en seco y es muy resistente al agua y en atmósferas húmedas.	Se emplea en tableros con fibras y partículas de madera, que se revisten con superficies exteriores contrachapadas. Están destinados a muebles y revestimientos decorativos.
Fenólico.	Se puede presentar en líquido o en polvo. Es de color ámbar a rojo oscuro en la línea de unión.	Se mezcla en polvo directamente con las virutas de madera, dando lugar a materiales compuestos para tableros aglomerados. También puede ser aplicado en estado líquido y puede llevar cargas añadidas por el usuario. En paneles aglomerados se cura con procesos de prensado y a temperaturas desde 120 °C hasta los 200 °C.	Es resistente en seco pero mucho más en presencia de agua y humedad. También presenta buenas propiedades a altas temperaturas y ante envejecimiento químico.	Estos adhesivos se usan como elemento de unión entre láminas de tableros de madera contrachapados y aglomerados. Se pueden emplear en exterior. Uno de sus exponentes es la Baquelita. También se usa en tableros de circuitos impresos, bolas de billar y encimeras.
Emulsión de acetato de polivinilo.	Se presenta como líquido listo para usar. También es conocido como cola vinílica. Es de color blanco a bronceado y, una vez seco, presenta un color de amarillo a incoloro en la zona de unión.	El líquido es aplicado directamente. Después se deben presionar los elementos a unir mientras se secan con temperatura ambiente.	La resistencia es baja, tanto en seco como en presencia de humedad y altas temperaturas. Si se aplica en uniones expuestas a una tensión continua, tampoco tiene buenas propiedades resistentes.	Se aplica a muebles, puertas lisas, laminados plásticos, tarima y sistemas de muros en viviendas prefabricadas.

Tabla 3-24. Tipos y propiedades de resistencia de los adhesivos de origen natural. Usos característicos (Wood Handbook, USDA. Forest Service, 1999) (Cont. 3).

Tipo	Forma y color	Preparación y aplicación	Propiedades de resistencia	Usos habituales
Poliuretano	Se presenta desde estado líquido a masilla; suministrado como una parte o como bicomponente reactivo. El color varía de claro a marrón y una vez seco suele ser incoloro en la línea de unión.	El adhesivo es aplicado directamente a una de las dos superficies a unir, preferiblemente empapando esa superficie en agua. Se puede reactivar con la humedad presente en la superficie o en el aire. El curado se puede realizar a temperatura ambiente y con presión. Si se presenta en estado de masilla requiere presión y suele ser prefijado.	Muestra alta resistencia en seco y húmedo, resistente al agua y al ambiente húmedo, tiene resistencia limitada ante la exposición a radiación solar especialmente si se mantiene de forma continua.	Es un adhesivo habitual en construcción para su aplicación a trasdosados con laminado de madera, también admite contrachapados de metal y plástico. Es habitual para el relleno de huecos. También es compatible con la instalación de placas de yeso.
Resorcinol y fenol-resorcinol.	La resina líquida y el endurecedor en polvo se suministran como dos partes; puede polimerizarse con el resorcinol. Es de color rojo oscuro en la línea de unión.	En estado líquido se mezcla con el endurecedor en polvo. El adhesivo de resorcinol cura a temperatura ambiente mientras que el de fenol-resorcinol cura a temperatura de 21 °C a 66 °C.	Tiene alta resistencia en seco. También es muy resistente ante la exposición al agua y en atmósferas con gran humedad relativa. Es más resistente que la madera a alta temperatura y al envejecimiento químico.	Se usa como adhesivo primario en maderas laminadas y en las uniones que deben soportar condiciones severas de servicio. También se aplica en contrachapado de madera dura, y muebles.
Urea.	Se suministra en polvo o en líquido; puede mezclarse con otras resinas como por ejemplo la melamina. Es de color blanco o marrón, incoloro en la línea de unión.	La preparación implica mezclarlo con agua y endurecedor; algunas formulaciones permiten un curado a temperatura ambiente mientras que otras requieren un prensado en caliente a 120 °C.	Tiene alta resistencia y rigidez en seco pero presentan menos resistencia a la humedad que los fenoles. Pierde resistencia con temperaturas superiores a 50 °C.	Se destina al contrachapado de madera dura, tableros de aglomerado, tarimas, puertas y núcleos de muebles.

De la amplia relación de adhesivos posibles se pasa a filtrar aquellos más comúnmente empleados en estructuras de madera, en los siguientes apartados.

3.6.3.1 Adhesivos de contacto

Normalmente están constituidos por una goma sintética que reacciona al entrar en contacto las superficies a unir, previamente encoladas, y ejerciendo una ligera presión. Se pueden aplicar sobre una o sobre las dos superficies que tienen que adherirse, dependiendo de las características de los materiales y de la clase de cola usada en cada caso. Los adhesivos de contacto son muy utilizados para encolar entre sí elementos de índole heterogénea. Son empleados con materiales porosos y blandos (como cuero y goma), pero también para recubrir tableros con estratificados plásticos y chapas o láminas plásticas sobre la madera. Como desventajas, se puede mencionar la poca resistencia a temperaturas extremas, y que no se puede controlar que el modo de aplicación sea uniforme; además, debido a su fraguado rápido, se puede dar el caso de rotura de la capa de adhesión en el momento del montaje, si no se realiza de un modo adecuado.

3.6.3.2 Cianocrilato

Se trata de los adhesivos más recientes que han aparecido en el mercado y se caracterizan por obtener una unión muy eficaz al cabo de pocos segundos, con un simple apretado manual; encolan también la goma y la piel. Los adhesivos a base de cianocrilato son caros y, puesto que necesitaremos un volumen considerable, pueden suponer una opción poco competitiva. En el proceso de encolado es preciso eliminar de las superficies el polvo, la suciedad y cualquier partícula suelta. Es un adhesivo monocomponente. Los dos tipos de cianocrilato usados actualmente se distinguen por tener un éster de metilo o de etilo en el monómero.

Características y propiedades físicas de cianocrilatos:

- Tienen buenas propiedades como aislante térmico y acústico.
- No rellenan los espacios vacíos.
- De fácil combustión, no se apagan al ser retirados del fuego. Sus gases tienen olor afrutado y crepitan al arder. No producen ningún gas tóxico en la combustión, por lo que podemos considerarlos un producto seguro desde un punto de vista de riesgo químico.
- Resisten a la intemperie y a los rayos ultravioleta. No se ha apreciado envejecimiento después de 10 años de exposición exterior. Sin embargo, los envases que contienen cianocrilato no deben quedar expuestos a la luz solar antes de producirse el fraguado, ya que los rayos ultravioleta deterioran rápidamente esta sustancia.

Fraguan en pocos segundos con necesidad de agua (que puede provenir de la humedad ambiental) en la reacción química. Sin embargo, un exceso de agua o superficies de las piezas demasiado grandes puede reducir la resistencia de la unión. Desde un punto de vista comercial, la marca Loctite®, de la casa Henkel, es de las más conocidas.

3.6.3.3 Epoxi

Una resina epoxi o poliepóxido es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor. Las resinas epoxi más frecuentes son producto de una reacción entre epíclorohidrina y bisfenol A. Estas formulaciones pueden tener variantes, como el conjunto resultante de la combinación de dos componentes principales, una base epoxídica y un endurecedor. Son productos de condensación que contienen grupos epoxi funcionales.

Los endurecedores son aminas, amidas y, raramente, isocianatos. Son moléculas orgánicas con elevado número de grupos reactivos, que provocan un endurecimiento del conjunto. Cabe notar que las propiedades finales de la formulación dependen principalmente del tipo de endurecedor elegido. Pueden añadirse otros aditivos a las formulaciones para modificar propiedades de viscosidad, tixotropía (cambios de humedad con el tiempo), características mecánicas, solubilidad en agua o reactividad. Las cargas y rellenos están constituidos por polvo o granulados, en general insolubles, y minerales. Una coloración con pigmentos inorgánicos para cada uno de los componentes evita errores de manipulación, y permite una homogeneización correcta. En consecuencia, las propiedades físicas pueden variar dentro de un importante rango, dependiendo de la utilización prevista del adhesivo.

Pertenecen a un grupo de adhesivos llamados estructurales o de ingeniería, grupo que también incluye el poliuretano, acrílico y cianoacrilato. Estos adhesivos se utilizan en la construcción de aviones, automóviles, bicicletas o esquís. Las resinas epoxídicas que se utilizan en la construcción sirven para pegar gran cantidad de materiales, incluidos algunos plásticos, y se puede conseguir que sean rígidas o flexibles, transparentes o de color, de secado rápido o lento. La resistencia a la tracción de este tipo de adhesivos puede llegar a superar los 0,35 N/mm² y secan en 12 horas, alcanzando gran resistencia al cabo de 3 días (a temperaturas de 20-25 °C). El secado se puede realizar con calor y, en tal caso, serán más resistentes al calor y a los agentes químicos que si se secan a temperatura ambiente. En el ámbito comercial se han identificado marcas como Araldit®, Sika®, Rotafix® o Hilti® con garantías de certificación.

3.6.3.4 Fenoles

El fenol-formaldehído es una resina sintética termoestable, obtenida como producto de la reacción de los fenoles con el formaldehído. A veces, los precursores son otros aldehídos u otro fenol. Estas resinas fenólicas se utilizan principalmente en la producción de tableros, revestimientos y adhesivos. Un derivado bastante extendido es la Baquelita®, fabricada con resina de fenol y harina de madera.

3.6.3.5 Poliuretano

Los adhesivos de poliuretano (PUR) de dos componentes, polioles combinados con isocianatos, fraguan muy rápidamente, proporcionando elevada resistencia mecánica y a la humedad. Se clasifican en dos grandes grupos: termoestables o termoplásticos; los segundos son más empleados en madera pero dada su elevada sensibilidad a elevadas temperaturas no son resistentes al fuego.

3.6.3.6 Polivinilo o cola vinílica

El acetato de polivinilo (PVA), o cola vinílica, seca en menos de una hora y efectúa la adhesión definitiva en menos de 24 horas. Con el adhesivo vinílico se pueden unir muchos materiales: madera, piel, papel... En general, se puede encolar prácticamente todo el material que sea poroso. Esta cola es muy común, económica, no mancha y es virtualmente inodora. La línea de pegado es incolora, y cura rápidamente a temperatura ambiente. En el curado, transfiere agua a la madera y al aire alrededor, en vez de hacerlo por reacción química como otras colas. Su costo es moderado, es fuerte y rellena bien las grietas. El encolado se efectúa extendiendo una capa de cola en las partes que se van a unir. Se deja secar un poco, se unen dichas partes y se presionan con diversos procedimientos durante 12 horas por lo menos.

El PVA no es apto para unir materiales expuestos a la humedad, pues se hincha y se derrama. Su resistencia de adhesión es baja, pues no asegura convenientemente la transmisión de la carga.

3.6.3.7 Resina de urea

Es un adhesivo sintético térmico que requiere equipos especiales para su encolado. Existen muchas combinaciones del mismo. Se encuentra presente en adhesivos, plásticos, resinas, tintas, productos farmacéuticos y acabados para productos textiles, papel y metales. Un derivado es la resina urea-formaldehído empleada en la fabricación de madera aglomerada. También se usa en cosméticos y pinturas.

3.6.4 Selección de adhesivos para uso estructural en clavijas

Sobre los tipos de adhesivos expuestos en el Apartado 3.6.3, las normas estructurales también citan restricciones que establecen una aptitud de servicio en función del uso (Tabla 3-24), además de unos condicionantes generales:

1. La documentación técnica del adhesivo debe incluir las prescripciones de uso e incompatibilidades.
2. El encolado de piezas de madera de especies diferentes o de productos derivados de madera distintos (sobre todo si los coeficientes de contracción son distintos) requiere un conocimiento específico sobre su viabilidad.

Tabla 3-24. Adhesivos en madera para uso estructural y adecuación a las clases de servicio [(DB SE M, 2009) Tabla 4.1].

Tipo de adhesivo	Código	Clase de servicio			Observaciones
		1	2	3	
Fenol-formaldehído ⁽¹⁾	PF	Apto	Apto	Apto	Adhesivo para encolar en caliente (110-140 °C); para fabricación de tableros de madera.
Resorcina-fenol-formaldehído ⁽¹⁾	RPF	Apto	Apto	Apto	
Resorcina-formaldehído ⁽¹⁾	RF	Apto	Apto	Apto	
Melamina-urea-formaldehído ⁽²⁾	MUF	Apto	Apto	Apto	
Urea-formaldehído ⁽²⁾	UF	Apto	No apto	No apto	
Poliuretano ⁽²⁾	PU	Apto	Apto	Apto	Aptitud reducida para rellenar las juntas. El fabricante indicará las prestaciones ante fuego.
Resinas epoxi ⁽²⁾	EP	Apto	Apto	Apto	Aptas para juntas gruesas. Presión de encolado reducida.
Caseína ⁽²⁾		Apto	Poco apto	No apto	Es necesario un fungicida.

(1) Líneas de cola de color marrón oscuro.
(2) Líneas de cola transparentes.

Los tipos de adhesivos para la aplicación en estructuras de madera expuestas a carga se describen en la norma específica (UNE-EN 301, 2007), mientras que la clase de servicio para la estructura de madera se fija en otra norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). La equivalencia queda establecida en la Tabla 3-25. De ella se deduce que adhesivos que cumplan las especificaciones para el Tipo I, pueden utilizarse en todas las clases de servicio, y los que cumplan las especificaciones para el Tipo II únicamente en la clase de servicio 1 o 2, y nunca expuestos de forma prolongada a temperaturas superiores a los 50 °C.

Tabla 3-25. Tipos de adhesivos para uso en distintas condiciones climáticas (UNE-EN 301, 2007).

Tipo de adhesivo	Temperatura	Equivalencia climática	Ejemplos	Equivalencia con las clases de servicio (UNE EN 1995, 2010)
I	> 50 °C	No especificado	Exposición prolongada a temperatura elevada	1,2,3
I	≤ 50 °C	HR > 85 % a 20 °C	Exposición completa a la intemperie	1,2,3
II	≤ 50 °C	HR < 85 % a 20 °C	Edificios con calefacción y ventilación. Exterior protegido de la intemperie. Períodos cortos de exposición a la intemperie	1,2

NOTA: Una humedad relativa (HR) del 85 % a 20 °C producirá un contenido en humedad de aproximadamente el 20 % en las coníferas y en la mayoría de las frondosas, y un contenido en humedad ligeramente inferior en los tableros derivados de la madera.

Para el encolado de madera con madera, y productos derivados de ésta, deberán utilizarse adhesivos de tipo fenol-formaldehído y aminoplásticos (DB SI, 2010). Para el encolado de barras de acero, la temperatura de reblandecimiento del adhesivo deberá determinarse experimentalmente.

Como exigencias relativas a los adhesivos, cabe citar:

1. Aquellos utilizados en la fabricación de elementos estructurales de madera se ajustarán a las normas (UNE-EN 301, 2007) y (UNE-EN 12436, 2002).
2. En el producto se indicará de forma visible que el adhesivo es apto para uso estructural, así como para qué clases de servicio.

Por otro lado, trabajos de investigación (Otero et al., 2008) exponen que determinados adhesivos no deben utilizarse en el tipo de uniones madera-clavija:

- Copolímero de tipo acrilato presenta deficiencias de fraguado.
- Poliuretano monocomponente, por deformaciones excesivas.
- Poliuretano de dos componentes es sensible a la temperatura elevada.
- Las resinas de fenol-resorcinol tienen una retracción en el endurecimiento que no es despreciable y que reduce su eficacia.
- Poliéster, debido a su resistencia insuficiente.
- Cloropreno desechado por endurecimiento deficiente.

La elección del adhesivo también está condicionada por el sistema de instalación (inyección o roscado), el modo de trabajo y las condiciones ambientales (Broughton & Hutchinson, 2001, A). Los trabajos de investigación (Otero, 2009) muestran la apariencia de distintos adhesivos empleados en la unión entre la madera y la clavija cuando las fibras de madera presentan igual orientación que la clavija (Figura 3-28).

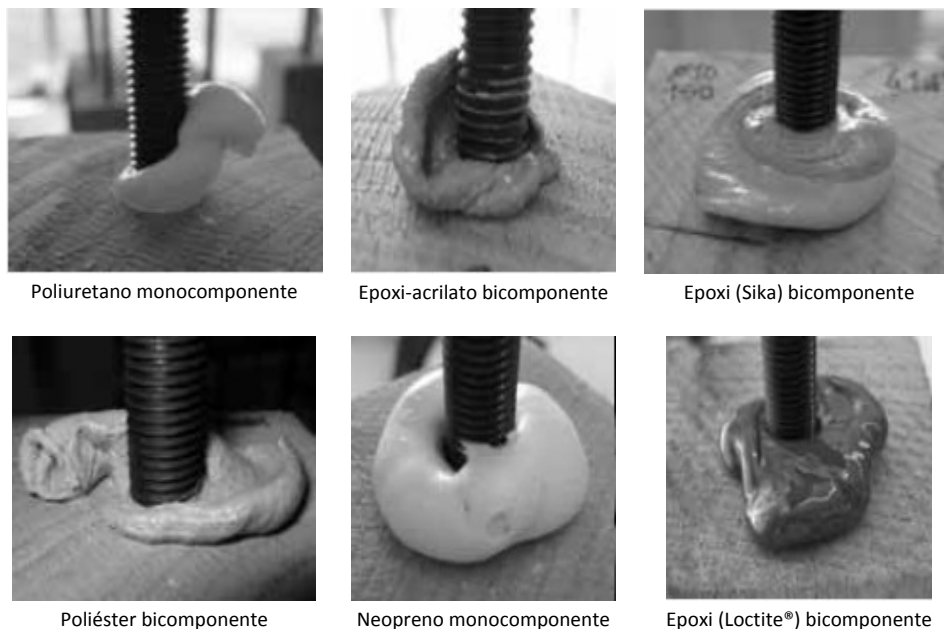


Figura 3-28. Uniones en madera con distintos tipos de adhesivos (Otero, 2009).

También se debe considerar la edad de la estructura. Hay indicaciones de pérdidas en la resistencia a flexión de madera encolada con caseína después de 30 años de servicio (Argüelles et al., 2003). Así mismo, debemos recordar la legislación vigente, como el DB SE, donde se indica que “A falta de indicaciones específicas, como periodo de servicio se adoptará 50 años”. Además, en clavijas que deben trabajar resistiendo fuerzas axiales, la eficacia de la unión depende de la correcta transmisión de las tensiones entre la barra y la madera. Por ello, los sistemas de resinas epoxi se han utilizado en la reparación y modernización de las estructuras de madera de más de 20 años; también han dado muy buenos resultados en la unión de diferentes materiales como la madera, el aluminio, el acero, el vidrio (Broughton & Hutchinson, 2001, B).

Otros adhesivos, como adhesivos de contacto, colas vinílicas, resinas con base cloropreno (neopreno y resinas con base éster) para madera, han sido rechazados al no alcanzar las resistencias y especificaciones deseadas. El uso de formulaciones epoxídicas en la ejecución de refuerzos, mediante pegado de armadura adicional, viene también justificado por la alta adherencia en soportes de hormigón y acero, estabilidad dimensional, endurecimiento rápido e irreversible, resistencia a ataques químicos y elevadas resistencias mecánicas (Luizaga, 2005).

Los adhesivos propuestos por otros investigadores (Otero, 2009) son fenol-resorcinol, poliuretano de dos componentes y formulaciones epoxi. Se selecciona la resina epoxi como mejor adhesivo para la unión clavija-madera. La inyección como método de aplicación también aconseja el uso de una resina epoxi. Las propiedades generales de las formulaciones epoxídicas ponen de manifiesto el carácter versátil de estos materiales. La gran variedad de productos hace posible la selección de adhesivos específicos para cada aplicación, no existiendo, por lo tanto, adhesivos universales. Las características exigibles a los adhesivos, empleados en refuerzos, son:

- Tiempo de endurecimiento máximo 7 días.
- Adhesividad, pegajosidad o *tack*, relaciona la tracción entre la superficie del producto y la del material con que entra en contacto. Las tensiones de rotura tienen que superar los 2,5 N/mm² en los primeros instantes de contacto.
- Resistencia a la compresión superior a 80 N/mm².
- Resistencia a la tracción superior a 30 N/mm².
- Resistencia a la flexión superior a 40 N/mm².
- Resistencia a cizallamiento superior a 7,5 N/mm².

3.6.5 Integración de adhesivos en barras para el refuerzo de la madera estructural

La integración en la madera de barras encoladas para refuerzo o conexión de piezas (Figura 3-29) cuenta con una experiencia de unos 30 años en los países escandinavos, Alemania y Rusia. Se emplean normalmente en piezas de madera laminada, y las primeras aplicaciones se enfocaban a evitar la aparición de grietas provocadas por la tracción perpendicular a la fibra en vigas curvas, apoyos entallados y perforaciones de vigas (Johansson, 1991) (Rubio et al., 2008).

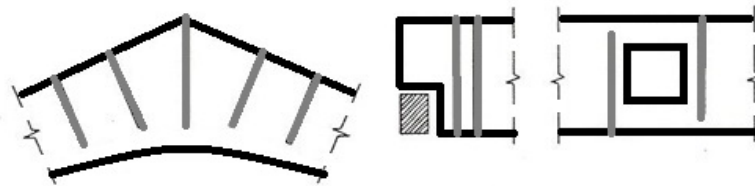


Figura 3-29. Barras encoladas como armadura frente a la tracción perpendicular.

Cuando se utiliza en nudos de unión, la barra encolada puede dar lugar a conexiones mediante distintas configuraciones, según se muestra en la Figura 3-30:

- Por medio de barras encoladas, con una parte roscada expuesta que se puede conectar a un accesorio de acero.
- Por medio de una varilla continua, que une en cada miembro y encierra la madera en toda su longitud.
- Mediante el uso de las varillas para fijar placas de acero, que luego pueden ser soldadas entre sí y quedar ocultas en el nudo.
- Por sistemas mixtos de barras encoladas y embebidas en la madera y/o de extremos fijados con tuerca, arandela y tornillo.

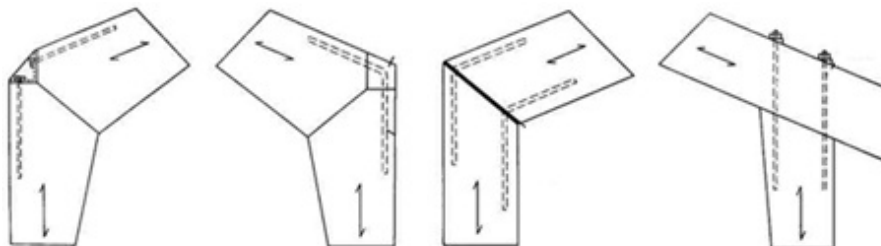


Figura 3-30. Barras de refuerzo en nudo rígido de esquina (Proyecto LICONS, 2003).

El nudo de esquina de pórtico presenta una organización similar. Las dos piezas de madera a unir llegan a la obra con las barras encoladas de la forma representada en el dintel. Los extremos salientes de las barras se doblan y se sueldan a las pletinas de cada borde, que presentan ranuras para alojar las barras. Su misión es conseguir la continuidad de los esfuerzos de flexión.

Otra aplicación para las barras encoladas, implementada en Rusia, fue la respuesta ante el problema de un apoyo sobre una base reducida; se insertaban barras de acero encoladas en dirección perpendicular a la fibra, que recogían la carga desde la base y la repartían a través de la altura de la sección (Figura 3-31). Esta misma idea se emplea para el refuerzo de vigas con fallos por cortante, utilizando barras encoladas dispuestas a 90° o a 45°, para la obtención de enlaces rígidos, como por ejemplo el empotramiento de un pilar, el arranque de un arco en la cimentación (Figura 3-32), el nudo rígido de esquina de un pórtico o el refuerzo de vigas peraltadas.

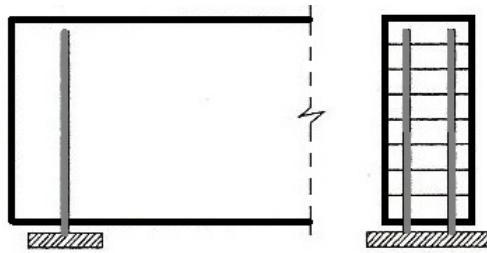


Figura 3-31. Barras de refuerzo en apoyos de vigas de madera.

Para estos mismos enlaces, algunos autores han realizado experiencias interesantes disponiendo barras inclinadas respecto a la fibra. El motivo es que la disposición de las barras paralelas a la fibra tiene ciertos inconvenientes:

- El número de barras que pueden colocarse queda limitado a una parte de la testa de la pieza.
- La disposición obliga a concentrar las barras y, por tanto, las tensiones.
- Existe un cierto riesgo de formación de fendas cerca de las barras, lo que resta eficacia a su conexión con el resto de la pieza.
- Presentan mayor dificultad de ejecución.

El empotramiento de un pilar se realiza a través de una base metálica, nivelada y anclada en la cimentación, que recibe la pieza de madera con un solape de las caras de la base. Las barras inclinadas, previamente encoladas a la madera, se sueldan a ésta. Los ensayos demostraron que el ángulo de 30° es el más eficaz.

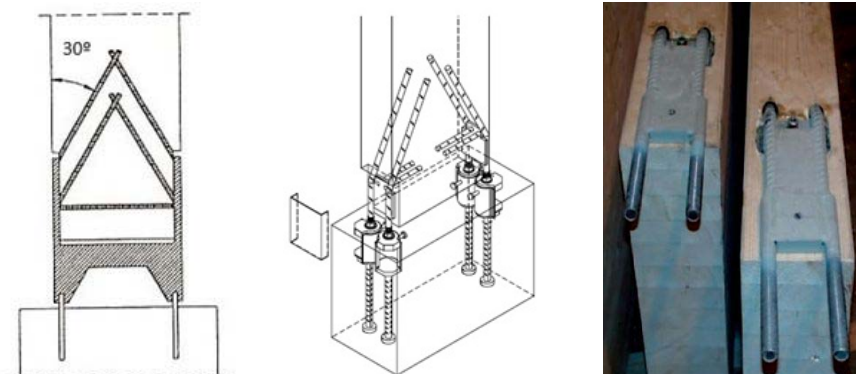


Figura 3-32. Empotramiento y nudo rígido de esquina con barras encoladas inclinadas (Argüelles, 2010).

En consecuencia, el empleo de adhesivos como método de unión de las barras introducidas en piezas de madera resulta adecuado y su uso implica una serie de ventajas:

- Enlaces de alta rigidez.
- Buen comportamiento al fuego, si la madera recubre y protege el acero (Oksanen & Kangas, 1999).

- Posibilidad de prefabricación de las uniones.
- Diseño de uniones con elementos de conexión ocultos y mejores resultados estéticos.

3.6.5.1 Comportamiento mecánico

3.6.5.1.1 Capacidad de carga en barras sometidas a esfuerzos axiales

Al estudiar experimentalmente el comportamiento mecánico de las barras encoladas sometidas a esfuerzos axiales, se llega a las siguientes conclusiones:

- La resistencia de las barras sometidas a compresión o a tracción es la misma.
- La resistencia presenta dependencia de la densidad de la madera.
- Se obtienen resistencias ligeramente superiores cuando las barras encoladas están dispuestas en dirección perpendicular a la fibra frente a las que están situadas en paralelo.
- La distribución de tensiones tangenciales a lo largo de la superficie de anclaje de la barra se basa en la teoría de Volkersen (1953), como describen autores posteriores (Johansson, 1991). La distribución de las tensiones no es uniforme y depende de la rigidez de la madera, de la barra y del anclaje entre madera y barra.

A continuación se expone el planteamiento del cálculo de las barras encoladas fundamentado en resultados experimentales. No obstante, su aplicación práctica es sencilla y la determinación de las fuerzas sobre cada barra se efectúa mediante el equilibrio estático y la hipótesis de Bernoulli.

Se propone una primera aproximación a la superficie crítica que condiciona la longitud de encolado y el diámetro del taladro (Ecuación 3-2):

$$F_k = \pi \cdot d \cdot l_g \cdot f_{v,\alpha,k}$$

Ecuación 3-2

A partir de la selección del adhesivo y de las distintas configuraciones geométricas y de montaje, se puede evaluar la capacidad de carga de la barra de unión pegada con distintas técnicas. Hay expresiones de cálculo para la resistencia axial basadas en resultados de ensayos (Riberholt, 1988). La Ecuación 3-3 y la Ecuación 3-4 definen la capacidad de carga axial característica para esfuerzos de tracción y compresión:

$$F_{ax,k} = f_{ws} \cdot \rho_k \cdot d \cdot l_g^{1/2}; \quad \text{para } l_g \geq 200 \text{ mm}$$

Ecuación 3-3

$$F_{ax,k} = f_{wl} \cdot \rho_k \cdot d \cdot l_g; \quad \text{para } l_g < 200 \text{ mm}$$

Ecuación 3-4

Siendo:

- $F_{ax,k}$ capacidad de carga característica axial para la extracción de la clavija con adhesivo, en N.
- f_{ws} parámetro de resistencia, en $\text{N}/\text{mm}^{1.5}$. En adhesivos frágiles, como fenol-resorcinol y resinas epoxi, su valor es de 0,520, y en adhesivos no frágiles, como los de poliuretano de dos componentes, alcanza el valor de 0,650.
- f_{wl} parámetro de resistencia, en N/mm^2 :
 - 0,037 en adhesivos frágiles, como fenol-resorcinol y resinas epoxi.
 - 0,046 en adhesivos no frágiles, como los de poliuretano de dos componentes.
- ρ_k densidad característica de la madera, en kg/m^3 .
- d valor mayor de los dos siguientes: diámetro del agujero y/o diámetro de la barra, en mm.
- l_g longitud encolada, en mm.

Estas expresiones tienen validez siempre que se cumplan las distancias mínimas recogidas en la Tabla 3-26.

Tabla 3-26. Distancias mínimas entre barras sometidas a carga axial.

Distancia mínima	
a ₁	2·d
a ₂	1,5·d
a ₄	2·d
a ₅	2,5·d

Las distancias a_i entre las distintas barras, y entre barras y perímetro de la viga, quedan definidas en la Figura 3-33.

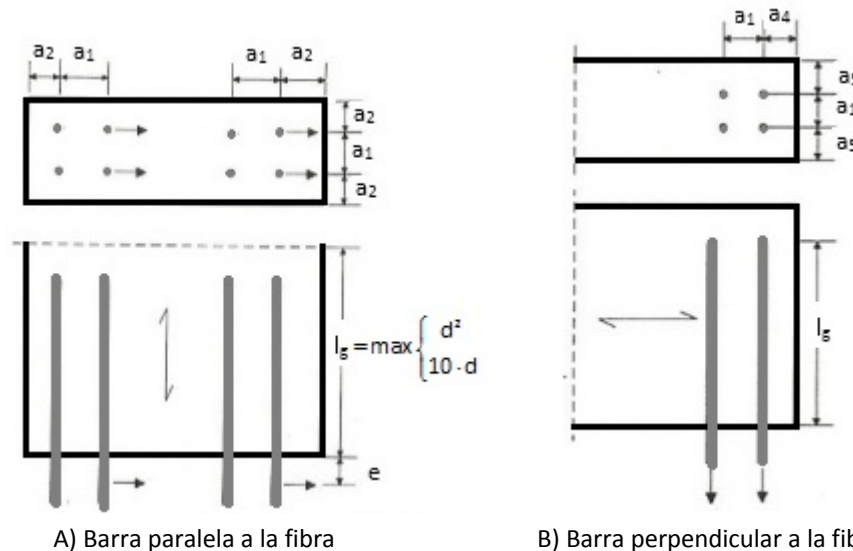


Figura 3-33. Distancias mínimas entre barras sometidas a carga axial, dispuestas paralela o perpendicularmente a la fibra.

Existen otras propuestas, como las definidas en la Ecuación 3-5 y en la Ecuación 3-6. La primera aparece en el borrador del Eurocódigo 5 pr EN 1995-1-1 *Design of timber structures. General Rules General rules and rules for buildings*, recomendada únicamente para su aplicación en elementos de madera laminada, pero no es asumida en las versiones definitivas (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) ni en otras normas (DB SE M, 2009); constituyen la principal referencia normativa con la que se cuenta para el diseño de las uniones encoladas en madera, a pesar de tratarse de una propuesta considerada únicamente a modo de borrador y que no ha sido incluida en posteriores versiones. Estas primeras versiones del Eurocódigo recomiendan las siguientes expresiones para determinar la capacidad de las uniones encoladas realizadas en madera laminada:

$$F_{ax,k} = \pi \cdot d_{eq} \cdot l_g \cdot f_{v,\alpha,k}$$

Ecuación 3-5. Según Eurocode 5 pr EN 1995-1-1 (Eurocode 5 pr EN 1995-1-1, 1995).

$$F_{ax,k} = \pi \cdot d \cdot l_g \cdot \left(\frac{\rho}{380} \right)^{0,56} \cdot f_{v,\alpha,k}$$

Ecuación 3-6. Según (Gerold, 1992), para epoxi.

Siendo:

- F_{ax,k} capacidad de carga característica axial para la extracción la clavija con adhesivo, en N.
- f_{v,α,k} resistencia a la extracción, en N/mm², para un taladro realizado con un ángulo α, respecto a la dirección de la fibra de la madera.

$$f_{V,\alpha,k} = \frac{f_{V,90,k}}{\sin^2(\alpha) + 1,5 \cdot \cos^2(\alpha)}$$

Ecuación 3-7

- $f_{V,90,k}$ resistencia a la extracción, en N/mm², para un taladro realizado con un ángulo de 90° respecto a la dirección de la fibra de la madera.

$$f_{V,90,k} = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot (d_{eq})^{-0,2} \cdot \rho_k^{1,5}$$

Ecuación 3-8

- $f'_{V,\alpha,k}$ resistencia a la extracción, en N/mm², según el criterio de Gerold, donde $\lambda = l/d$.

$$f'_{V,\alpha,k} = 12,6 \cdot (1 - 0,042 \cdot \lambda)$$

Ecuación 3-9

- d diámetro del agujero, en mm.
- d_{eq} diámetro equivalente de agujero, valor mínimo del diámetro (d), o 1,5 veces el diámetro interior de la clavija (d_{int}), en mm.
- l_g longitud encolada, en mm.
- ρ_k densidad característica de la madera, en kg/m³.

Las ecuaciones expuestas anteriormente han sido comparadas por (Otero, 2009) y (Otero et al., 2010), según se muestra en la Figura 3-34.

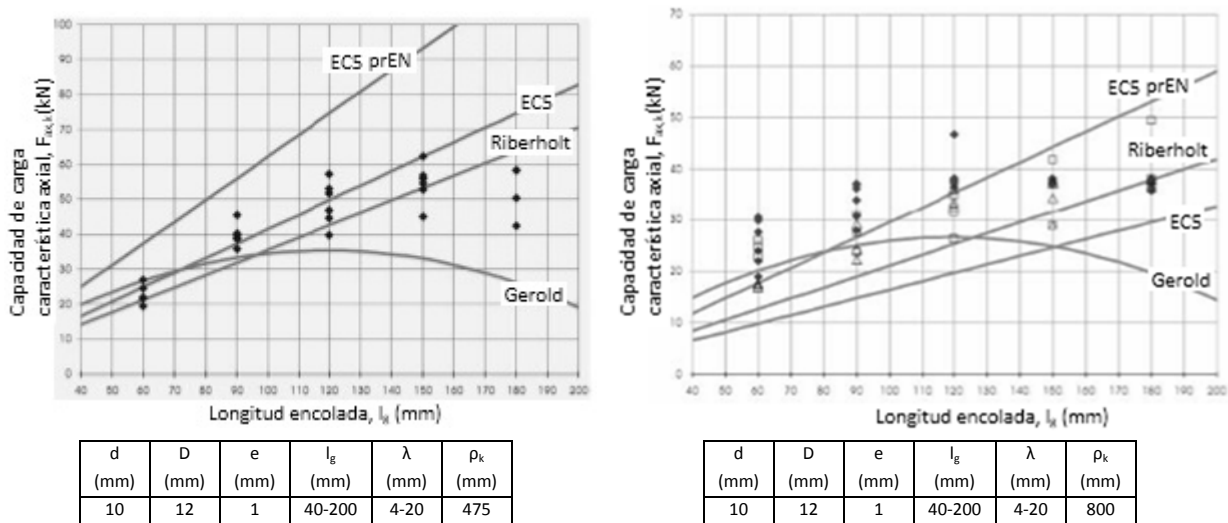


Figura 3-34. Capacidad de carga del adhesivo en función de la longitud del encolado en la clavija (Otero, 2009).

Discrepando de lo que indica el Eurocode 5 pr EN 1995-1-1 (Eurocode 5 pr EN 1995-1-1, 1995), existen trabajos empíricos que han llegado a la conclusión de que la densidad no influye en la resistencia de la unión encolada (Estévez et al., 2007), (Otero et al., 2010). Además, deberán tenerse en cuenta las siguientes limitaciones:

- Para evitar fallos por pandeo, la tensión axial en una barra comprimida no deberá superar los 400 N/mm².
- La longitud de encolado deberá ser, como mínimo, el valor más alto entre el diámetro al cuadrado (d^2), o 10·d según se acota en la Figura 3-33 y tomando el diámetro (d) en mm, si la distribución de la fuerza en un grupo de barras resulta estáticamente indeterminada.
- La fuerza total recogida por un grupo de barras en la superficie de encolado deberá ser menor que la que supone el desgarramiento de un trozo de la pieza de madera sin llegar al agotamiento del elemento

encolado, lo que se determina por la resistencia del área eficaz de la madera que se puede desgarrar (Argüelles et al., 2003). Estos fallos también se pueden dar ante una sola barra encolada (Figura 3-35).



Figura 3-35. Varilla roscada M12 con adhesivo y fallo por desgarro en la madera (HILTI Co., 2001).

3.6.5.1.2 Capacidad de carga en barras sometidas a esfuerzos cortantes

La capacidad de carga de un perno sometido a carga de corte depende principalmente de la resistencia al aplastamiento. Una barra encolada se comporta frente a cargas de corte como un perno encolado, con la ventaja de que el ajuste no tiene holguras (recuérdese que los pernos pueden tener hasta 1 mm de holgura), lo que conlleva un incremento de la capacidad resistente y de la rigidez de la unión, que ha sido evaluado en distintos trabajos (Rodd & Leijten, 2003), (Guan & Rodd, 2001) y (Davis & Claisse, 2000).

El factor que define el incremento de resistencia varía en función del diámetro del perno (12 a 25 mm) y de la dirección de la fibra, alcanzando valores comprendidos entre 1,25 y 1,96. Y el factor del incremento de la rigidez es mucho mayor, desde 4,98 a 11,9 (Johansson, 1991).

La capacidad de carga de las barras encoladas en dirección perpendicular a la fibra puede calcularse como si se tratara de pernos. En este caso, el efecto del encolado permite incrementar la resistencia al aplastamiento, multiplicándola por un factor de 1,2. En la Figura 3-36 se representan dos ejemplos.

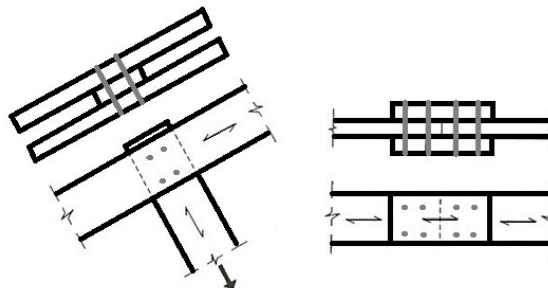


Figura 3-36. Ejemplos de barras encoladas con carga lateral y disposición perpendicular a la fibra.

Para barras encoladas en dirección paralela a la fibra, el valor característico de la capacidad de carga de una barra sometida a una fuerza perpendicular a la superficie de la madera (Figura 3-33) es:

$$F_k = \left(\sqrt{e^2 + \frac{2 \cdot M_{y,k}}{d \cdot f_h}} - e \right) d \cdot f_h$$

Ecuación 3-10

Siendo:

- $M_{y,k}$ valor característico del momento plástico de la barra, en N·mm (visto en el Apartado 2.7.5).
- d valor mayor de los dos siguientes: diámetro del agujero o diámetro de la barra, en mm.
- f_h parámetro de resistencia al aplastamiento que se define por la siguiente expresión, en N/mm².

$$f_h = (0,0023 + 0,75 d^{-1,5}) \rho_k$$

Ecuación 3-11

- ρ_k la densidad característica de la madera, en kg/m^3 .
- e distancia entre la superficie de la madera y la línea de acción de la carga que actúa sobre la clavija encolada, en mm.

De forma semejante a lo visto en el apartado anterior, las distancias mínimas se indican en la Tabla 3-27. Aquí, la capacidad resistente puede aumentarse si se encola un tablero contrachapado a la testa (Riberholt, 1988).

Tabla 3-27. Distancias mínimas entre barras encoladas con carga de corte y dirección paralela a la fibra.

Distancia mínima	
a_1	$2 \cdot d$
a_2	$2 \cdot d$
a_3	$4 \cdot d$

3.6.5.1.3 Contenido de humedad y consecuencias derivadas

Las variaciones dimensionales de la madera ocasionadas por la variación del contenido de humedad originan tensiones tangenciales no despreciables entre la madera y la barra. Este fenómeno resulta más acusado cuando la barra está insertada en dirección perpendicular a la fibra, debido a que la hinchazón y merma es muy superior en esta dirección, comparada con la longitudinal. Por este motivo, las barras encoladas no son recomendables en clase de servicio 3, o al menos deberán tomarse ciertas precauciones.

La humedad presente se puede dividir en dos componentes, agua absorbida y agua libre. La primera se encuentra dentro de las paredes de las células y el agua libre se halla dentro de los lúmenes de células de madera. Se puede asumir que el agua libre no comienza a entrar en la madera hasta que las paredes de las células han absorbido su humedad máxima posible. Este punto de transición se denota generalmente como el punto de saturación de la fibra.

En un análisis para determinar la temperatura y el contenido de humedad a que están sometidos los elementos de unión, es conveniente considerar la exposición teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- Exposición al exterior del edificio.
- Espacios del subsuelo.
- Cavidades de la pared.
- Espacios de techo.
- Construcción exterior.

Para determinar las condiciones de los elementos de la envolvente del edificio, primero es necesario especificar las condiciones a las que está sometida la construcción, tanto en el exterior como en su interior. Estas pueden obtenerse a partir de la información meteorológica y de las condiciones de uso finales, respectivamente. La temperatura y el contenido de humedad de los elementos de revestimiento de la construcción y también la ubicación de la condensación de humedad se pueden obtener a partir de técnicas analíticas o por observaciones empíricas en construcciones similares.

Ensayos realizados sobre madera con exposición a humedad de más del 25 % indican una reducción del 60 % a 64 % en la fuerza de extracción de la misma barra encolada frente a condiciones normales, independientemente del tipo de adhesivo o especie de madera (Kasal et al., 2004). Piezas de roble, unidas con el epoxi Sikadur® y varillas de acero corrugado, parecen mostrar una reducción casi lineal de la resistencia de adhesión con el aumento de humedad de la madera, porque la dilatación (por el aumento de la humedad) supone un menor número de fibras de madera en la superficie en contacto con el adhesivo. Esto es apreciable cuando se supera el 10 % de humedad en la madera, y muy sensible al superar el 22 %.

3.6.5.1.4 Temperatura

Las variaciones térmicas a las que se ve sometida la unión deben garantizar un trabajo solidario de la clavija y la madera. Si las clavijas son de acero y el rango de temperaturas al que se ve expuesta la unión no está fuera del intervalo entre -20 °C y 60 °C, la unión puede funcionar correctamente. También se debe tener presente que cada adhesivo puede presentar condicionantes más restrictivos y limitaciones efectivas de servicio. La histéresis térmica también debe ser tenida en cuenta.

3.6.5.2 Fatiga

Una de las experiencias recientes sobre la utilización de las barras encoladas como medio de unión en una situación realmente comprometida fue desarrollada por Riberholt (Riberholt, 1988) para el anclaje de las aspas de un generador eléctrico eólico. Las aspas estaban fabricadas en madera laminada y tenían una longitud de 20 m. La conexión de las aspas al eje del rotor se efectuó mediante 26 barras de acero de gran longitud encoladas a la madera formando un círculo. En esta aplicación, los esfuerzos sufren una inversión en cada rotación, lo que añade además un problema de fatiga.

Para comprobar su comportamiento se ensayaron estas uniones en laboratorio sometiéndolas a 150 millones de ciclos, con un resultado de fallo por fatiga en el acero de las barras, y no en el encolado a la madera.

La vida de servicio de las aspas de madera laminada resultó ser superior a las de fibra de vidrio, a pesar de la adversidad de las condiciones de trabajo (fatiga y exposición directa a la intemperie).

3.6.5.3 Corrosión

Es preciso evitar la corrosión del acero mediante la protección adecuada. La oxidación del metal perjudicaría la unión entre la barra y la madera, por lo que este aspecto cobra especial relevancia en las barras cargadas axialmente. El recubrimiento con resinas epoxi aporta una buena protección contra la corrosión. Se puede hablar de dos tipos de corrosión: incrustados de corrosión y expuestos a la corrosión, dependiendo de si la superficie metálica está en contacto con la madera o la atmósfera.

En el caso de que los elementos de acero tengan tratamientos superficiales como el cincado, la corrosión no se inicia hasta no haber perdido el tratamiento superficial. Una vez iniciado el proceso, se debe considerar una pérdida de metal que parte de la superficie y es función del tiempo, del tipo de acero y las condiciones atmosféricas y de la madera.

La corrosión está relacionada con la condensación de la humedad en la superficie del acero, depende de los parámetros climáticos y de la existencia de depósitos de sal en el metal. Por ejemplo, la deposición de cloruro de sodio en una superficie de metal puede producir condensación con humedad relativa tan baja como el 75 %. Para los depósitos de cloruro de magnesio, la correspondiente humedad relativa sería del 35 %. Agentes meteorológicos como la exposición a lluvia o a vientos pueden reducir la sal de una superficie de metal. En cualquier caso, uno de los objetivos del diseño será proteger la unión de la corrosión.

3.6.6 Características de los elementos de unión para facilitar la adherencia

Partiendo del encolado con clavija metálica y madera, es lógico pensar que aquellos elementos que faciliten el mojado e incrementos de la superficie de adherencia son interesantes. Se aconseja que la madera que se vaya a unir sea porosa para facilitar el mojado, que esté limpia, con los cortes recientes, y que no tengan sustancias que se interpongan entre la madera y el adhesivo. La humedad excesiva de la madera es una barrera a la unión con el adhesivo, por lo que debe estar seca.

Las resinas, grasas, aceites o taninos que puede contener la madera o la clavija dificultan el secado. Si la madera contiene en exceso estos productos, la unión no será buena, salvo que previamente se eliminen estos productos de la superficie mediante disolventes.

Hay autores (Argüelles et al., 2003) que recomiendan el uso de varillas roscadas de acero, con protección superficial por galvanizado, y en particular por cincado, porque la superficie roscada mejora la adherencia con el adhesivo. Si el método de instalación es el roscado, un defecto local del adhesivo no representa una pérdida grave de capacidad, ya que la transmisión de tensiones continúa, de modo mecánico, a través del roscado.

En el caso de barras que trabajan resistiendo cargas de corte, la elección del adhesivo es menos importante, ya que la transmisión de fuerzas se realiza a través de tensiones de compresión (aplastamiento) entre barra, adhesivo y madera; pero no debemos olvidar aspectos limitantes como puede ser la sensibilidad a altas temperaturas o la humedad, que limitan el empleo de determinados adhesivos, según se indica en la Tabla 3-24.

3.6.7 Procesos de encolado

El proceso de encolado está condicionado por distintos factores. Para la puesta en obra de la unión se debe valorar si la aplicación del adhesivo puede hacerse en taller o debe ser *in situ* (en la misma obra), porque esto puede afectar a variables como la viscosidad, la retracción o el mojado del adhesivo. En taller, las condiciones de aplicación pueden ser controladas mejor, mientras que en la obra se pueden alterar las condiciones de curado (de modo similar a lo que ocurre con el fraguado del hormigón) porque las circunstancias ambientales alteran propiedades que influyen en la unión. Incluso en función de la secuencia de montaje la interacción del adhesivo con las superficies se puede ver afectado. En la Figura 3-37 se puede apreciar que hay múltiples aspectos de dimensionado y exigencias de uso que deben ser tenidos en cuenta para la selección de adhesivo como los esfuerzos a los que se ve sometida la unión, el tipo de madera, de clavija (y las variables que derivan de éstas) o las condiciones ambientales a lo largo del tiempo de vida de la estructura entre otras.

PUESTA EN OBRA	EN TALLER		IN SITU		
	VISCOSIDAD	RETRACCIÓN	CURADO	MOJADO	...
DIMENSIONADO	Tipo de esfuerzos	Tipo de madera	Tipo de clavija		
	Longitud de encolado activo	Diámetro de la clavija	Geometría de las superficies		
	Orientación de la fibra	Espesor de adhesivo	Estado de las superficies		
	Condiciones ambientales	Comportamiento frente al fuego	Porosidad de la madera		

Figura 3-37. Consideraciones de diseño para la integración de adhesivo en la unión con clavija.

Hay parámetros geométricos de especial interés, como el diámetro de la barra, la longitud de encolado (se recomienda que sea mayor de $10 \cdot d$), el espesor del adhesivo ($D > 1,25 \cdot d$) y la distancia del eje del agujero al borde ($2,5 \cdot d$), como se indica en investigaciones (Otero et al., 2008). Éstos pueden condicionar los tipos de fallo: cortante o hendidura en la madera o tracción en la barra (Figura 3-38).



Figura 3-38. Modos de fallo de la unión con adhesivo. Cortante, hendidura y tracción (Otero, 2009).

El encolado entre la madera y la barra se puede realizar de distintas maneras:

- Mediante un taladro en la madera, con un diámetro ligeramente superior al de la barra para conseguir una holgura suficiente para la inyección del adhesivo. Esta diferencia de diámetros es normalmente de 1 mm (Johansson, 1991), aunque otros autores recomiendan de 3 a 5 mm.
- Otra solución es aplicar el adhesivo en el agujero y después introducir la barra a rosca para permitir que el adhesivo se distribuya en toda la superficie. La barra deberá tener una ranura, o canal, a lo largo de su longitud.
- Empleando sistemas de inyección una vez colocado el elemento de unión (Rodd & Leijten, 2003).
- Aplicar el adhesivo en la superficie del agujero y en la barra con pincel. En este caso no es necesario utilizar barras con ranuras, aunque la resistencia general de la unión será inferior.

En barras que deben trabajar resistiendo fuerzas axiales, la eficacia de la unión depende de la correcta transmisión de las tensiones entre la barra y la madera. Si el método de aplicación es el de inyección, debería utilizarse una resina epoxi. Las resinas de fenol-resorcinol tienen una retracción en el endurecimiento considerable, lo que reduce su eficacia. Los adhesivos de poliuretano de dos componentes son sensibles a la temperatura elevada.

De forma semejante a lo indicado para la madera en el Apartado 3.3, para el adhesivo se tendrán en consideración las referencias de los Documentos de Idoneidad Técnica Europeos (DITE) o *European Technical Approval* (ETA) del adhesivo en cuestión. Por definición, estos documentos constituyen una evaluación técnica favorable del producto, indicando aquellos que son aptos para emplearse como productos de construcción con marcado CE (Reglamento (UE) Nº 305/2011, 2013). Ello da garantías, asegurando unos valores mínimos de sus propiedades y homogeneidad en la formulación química.

3.6.8 Unión con adhesivo

Los epoxis tienen múltiples aplicaciones y, entre las más comunes está el uso como adhesivo. A esta familia de adhesivos corresponden todos aquellos que están bajo la marca HILTI HIT RE 500, que resisten hasta $0,35 \text{ N/mm}^2$, secan en 12 horas y alcanzan su máxima resistencia al cabo de 3 días (a $20\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$).

En lo referente al procedimiento de curado utilizado, hay autores que emplean un período de 7 días (Broughton & Hutchinson, 2001, A) a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del 65 %. Con el fin de mejorar en la sensibilidad posterior a la humedad en la madera (del orden del 25 %) se amplía el periodo de curado prolongándolo hasta los 21 días, lo que refuerza los enlaces entre la resina y la madera. Como resultado, hay menos humedad presente en el contacto de la madera con el adhesivo y se incrementa la resistencia de la fijación.

Según las características técnicas del adhesivo (ETA-04/0027, 2013), se trata de un producto bicomponente apto para el uso con varillas roscadas, que puede trabajar a temperaturas de $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+70 \text{ }^\circ\text{C}$ con elementos cincados y galvanizados (así como con aceros inoxidables). La temperatura de aplicación durante la instalación del anclaje deberá ser de al menos $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Si el secado del adhesivo epoxídico se realiza con calor, habitualmente presenta valores

de resistencia mayores que si se seca a temperatura ambiente. No requiere par de apriete, pero si se aplicara, no se deben superar determinados valores (entre 10 y 150 N·m), en función del diámetro de la varilla roscada (por ejemplo, en el caso de $d = 10$ mm, el par de apriete debe ser menor de 20 N·m). También se debe verificar la fecha de caducidad del adhesivo. La resistencia a la tracción de este tipo de adhesivos puede llegar a superar los 0,35 N/mm². Las características mecánicas vienen indicadas en la Tabla 3-28.

Tabla 3-28. Características generales de epoxi Hilti HIT-RE 500.

HIT-RE 500	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M27	M30
Fallo en acero con varillas de calidades roscadas								
Resistencia característica, $N_{Rk,s}$ (kN), calidad 5.6	18	29	42	79	123	177	230	281
Resistencia característica, $N_{Rk,s}$ (kN), calidad 8.8	29	46	67	126	196	282	367	449
Factor de seguridad parcial, $\gamma_{Ms,N}$	1,5							
Alargamiento a la rotura	2,0 %							
Temperatura de fallo por calor, según ASTM D-648-95	63 °C							
Resistencia eléctrica, según DIN IEC 93 (12.93)	$6,6 \times 10^{13} \Omega/m$							
Módulo de elasticidad longitudinal, según DIN 53452	5.700 MPa							

Las características del epoxi HIT-RE 500 se han estudiado de forma particular cuando se emplea con madera (HILTI Co., 2001) suministrando información específica para el diseño cuando se usa con clavijas roscadas de acero (de M8 a M30) pegadas a la madera (de clases resistentes C16 hasta C40). En estos trabajos se consideran las exigencias requeridas para estructuras de madera (Eurocode 5 pr EN 1995-1-1, 1995) y normas como la DIN 1052 que es análoga a la europea (UNE-EN 384, 2004) según autores (Arriaga et al., 2010). Los ensayos se realizaron como muestra la Figura 3-39, con clavijas orientadas a 0° y 90° respecto a la fibra de madera. El contenido en humedad (al fijar la clavija con el adhesivo) era menor del 12 % y el agujero para la inyección del epoxi fue desde 2 mm hasta 6 mm por encima del nominal de la barra roscada. Los resultados se muestran en la Tabla 3-29 y la resistencia a la extracción ($f_{v,\alpha,k}$) es de interés para aplicarse en la Ecuación 3-5.



Figura 3-39. Ensayos de extracción en clavijas roscadas pegadas a madera con epoxi Hilti HIT-RE 500 (HILTI Co., 2001).

Tabla 3-29. Resistencia a la extracción de aceros pegados a madera con epoxi Hilti HIT-RE 500 (HILTI Co., 2001).

	Profundidad efectiva de clavija roscada de acero en la madera, l_g (mm)		
	≤ 250 mm	$250 \text{ mm} < l_g \leq 500$ mm	$500 \text{ mm} < l_g \leq 1.000$ mm
$f_{v,\alpha,k}$ (N/mm ²)	4,0	$5,25 - 0,005 \cdot l_g$ (4,0 ... 2,75 N/mm ²)	$3,5 - 0,0015 \cdot l_g$ (2,75 ... 2,0 N/mm ²)

En condiciones generales, el adhesivo HIT-RE 500 es compatible con hormigón, mortero, madera, ladrillo y acero; pero se descarta en materiales como el plomo o el yeso por su baja resistencia mecánica en presencia de agua. Tampoco se aconseja en presencia de ácidos y bases fuertes o muy concentrados. Se trata de sistemas bicomponente que requieren aplicadores específicos (ETA-04/0027, 2013), según las especificaciones mostradas en la Figura 3-40.

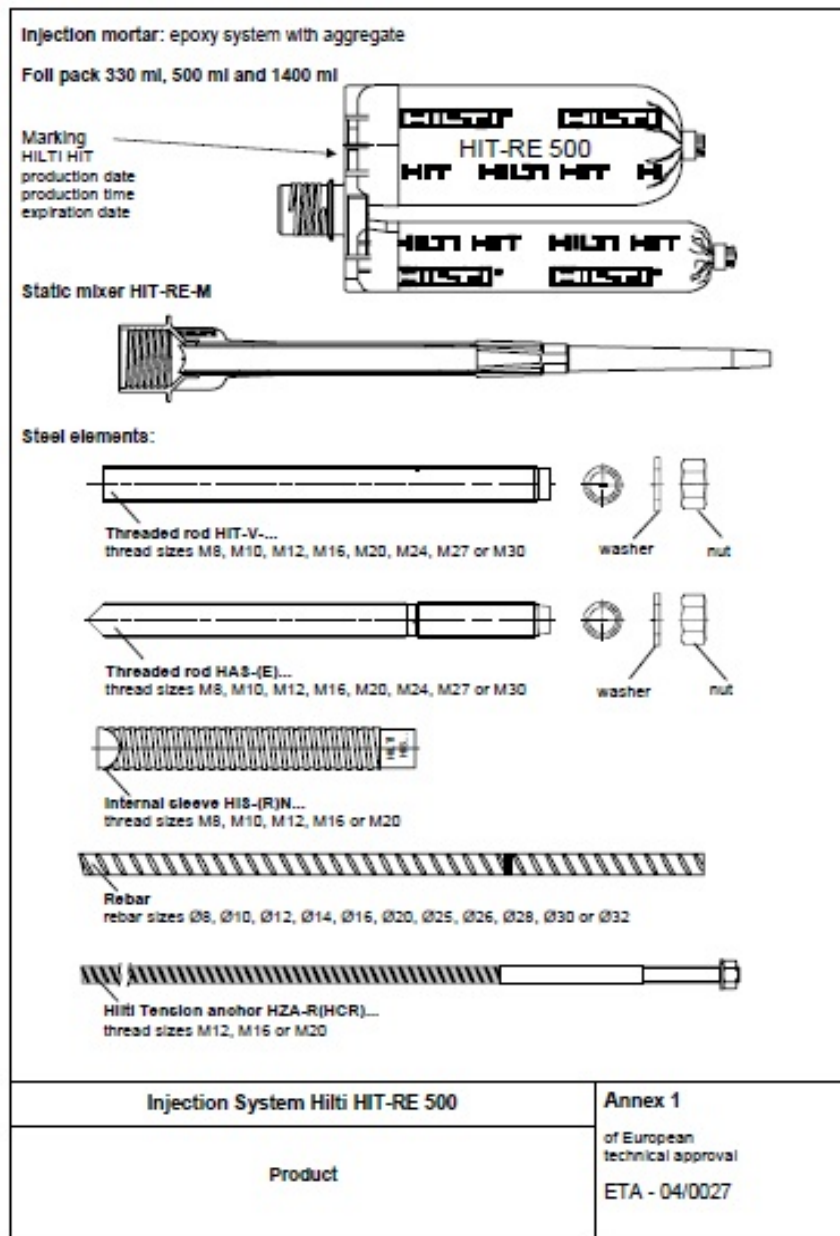


Figura 3-40. Kit de aplicación y elementos metálicos compatibles con epoxi HILTI HIT RE 500 (ETA-04/0027, 2013).

En el procedimiento de preparación y aplicación se respetará lo indicado por el fabricante (ETA-04/0027, 2013), lo que supone introducir el paquete (con el papel de aluminio) en el soporte (descartando paquetes metálicos dañados o caducados) para, a continuación, fijar el mezclador Hilti HIT-RE-M al conector colector pack. No se debe modificar el sistema de mezclas de ninguna manera y se usa solamente el mezclador que se suministra con el adhesivo desechando las primeras proporciones que salen del paquete (en función del tamaño del paquete, 3 golpes de aplicador en los paquetes de 330 ml, 4 golpes en el de 500 ml y 65 ml en el envase 1400 ml), según se muestra en la Figura 3-41.

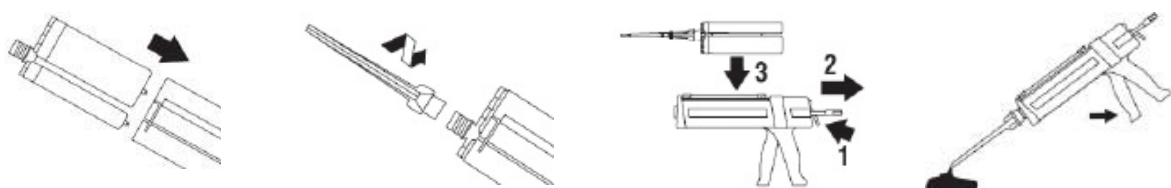


Figura 3-41. Secuencia de preparación de epoxi bicomponente.

En el proceso de aplicación es fundamental que, tras el taladrado, se realice una limpieza de la madera por soplado o barrido y que se aplique el adhesivo de dentro a fuera (Figura 3-42). El siguiente paso es introducir el elemento de unión con el sentido de rotación para facilitar el reparto del adhesivo dentro en las intercaras y en el filete de la rosca.

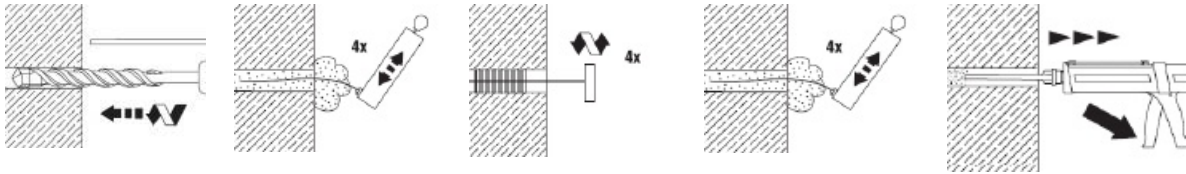


Figura 3-42. Secuencia de preparación del agujero para clavija.

Es importante el procedimiento de montaje, ya que permite:

- Transmisión de tensiones sin formación de puntos críticos, persiguiendo una distribución uniforme de los esfuerzos.
- Evitar la concentración de tensiones en la superficie de adherencia.
- Evitar la corrosión galvánica mediante la separación y aislamiento de los materiales a unir.
- Disminuir o eliminar la transmisión de vibraciones entre los materiales pegados.
- Evitar el fallo de la unión por fatiga.
- Unir materiales de distinta naturaleza.
- Mejorar la estética de las uniones.
- Reducir los costes de puesta en obra.

3.7 Refuerzo con conectores

Otra posibilidad de mejorar el comportamiento de la clavija, que amplía lo expuesto en el Apartado 3.2.1.7, es el empleo de conectores colocados en las intercaras de la unión (Figura 3-43).

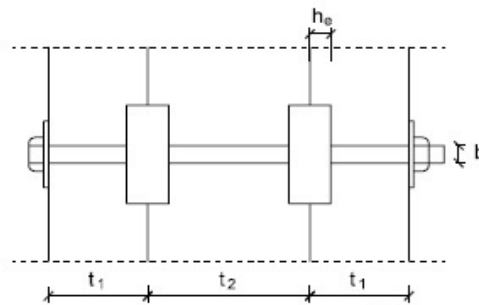


Figura 3-43. Empleo de conectores de anillo en unión clavija (DB SE M, 2009).

Según norma (UNE-EN 912, 2011), el conector de doble cara está constituido por una placa circular cuyos bordes han sido cortados y plegados, formando dientes triangulares que se proyectan alternativamente a ambos lados de la placa y forman ángulos de 90° (Figura 3-44).

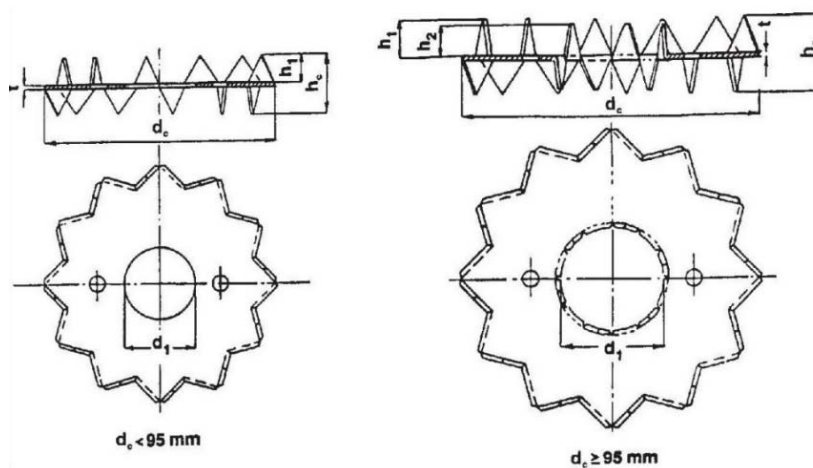


Figura 3-44. Conector de placa dentada tipo C1 (UNE-EN 912, 2011).

Los dientes se deben espaciar regularmente alrededor del perímetro de la placa y, en los conectores de diámetro $d_c \geq 95$ mm, también alrededor del perímetro central del orificio. El conector puede llevar dos orificios para clavos equidistantes a los lados del orificio para la clavija, que permiten fijarlo a uno de los miembros de madera para facilitar el centrado y colocación. En caso de existir, deben situarse en un eje perpendicular a la línea de cargas para evitar que el proceso de plastificación en la madera quede debilitado por la interferencia con estos clavos. La Tabla 3-30 muestra los valores geométricos normalizados de los conectores C1 de diversos tamaños.

Tabla 3-30. Medidas de los conectores tipo C1.

Diámetro	Altura	Grosor*	Diámetro del orificio central	Número de dientes exteriores	Número de dientes interiores	Altura de los dientes interiores**
d_c	h_c	t	d_1			h_2
50	13,0	1,0	17,0	24	-	-
62	16,0	1,2	21,0	24	-	-
75	19,5	1,25	26,0	24	-	-
95	24,0	1,35	33,0	24	12	9,5
117	30,0	1,5	48,0	24	12	12,5
140	31,0	1,65	58,0	28	14	10,5
165	33,0	1,8	68,0	32	16	11,0

Tolerancias de grosor $t \pm 0,02$, en otras medidas $\pm 0,5$. Unidades en mm
 * Grosor sin galvanizado.
 ** Altura de los dientes exteriores $h_1 = (h_c - t)/2$.

Están constituidos por bandas de acero de bajo contenido en carbono conformado en frío y no revestidas. Los materiales deben ser conformes con los aceros del tipo DC01+C390 (material número 1.0330), según EN 10139. Además, la elasticidad mínima del material debe ser del 10 %. También es posible utilizar chapas laminadas en frío de acero de alta elasticidad conformado en frío H320M, según EN 10268.

Los criterios de fallo se reflejan en la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) en su Apartado 8.8 para placas metálicas dentadas o placas-clavo y en el 8.9 para conectores de anillo de tipo A o conectores de placa de tipo B y C. Se debe destacar que el Eurocódigo 5 hace referencia a la norma EN 912 del año 1999, mientras que las trasposiciones del Eurocódigo 5 según DB SE M (DB SE M, 2009) hacen referencia a la norma UNE-EN 912, omitiendo el año y habiendo sido actualizada (UNE-EN 912, 2011). Por otro lado, mientras el Eurocódigo 5 indica que los conectores de tipo C1 son de doble cara, el DB SE M indica que estos mismos conectores son de cara simple, por lo que este último documento puede requerir de una revisión. De cara a este trabajo, se hará uso de conectores de doble cara, que en lo sucesivo citaremos como de tipo C (Figura 3-44). Los nudos se siguen considerando articulados

dato que no restringen el giro en el caso de conectores en anillo (Figura 3-43) y es prácticamente despreciable en los conectores dentados. La Figura 3-45 muestra conectores PZD 1 de calidad DX51D + Z275MAC, que tienen su origen en Polonia, producidos por la casa Domax. Están fabricados en base a las prescripciones de los conectores tipo C1, según la norma (UNE-EN 912, 2011).



Figura 3-45. Conector de placa dentada, casa Domax, modelo PZD1, 50x17 mm.

De acuerdo con las relaciones de geometría establecidas en la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), para conectores de anillo, el espesor mínimo de las piezas externas de madera (t_1) debe ser igual a $2,25 \cdot h_e$, y el de la pieza interna de madera (t_2) debe ser igual a $3,75 \cdot h_e$, donde h_e es la profundidad de inserción. El diámetro del perno queda establecido entre 12 y 24 mm cuando el diámetro exterior del conector (d_c) sea ≤ 130 mm. En el modelo fijado para el estudio se tendrán en consideración estas referencias, aunque para homogeneizar los ensayos con las situaciones en las que se prescinde de conector, se tomarán diámetros de clavija $d = 10$ mm. Para el tipo de conectores C, de doble dentado, según (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), la capacidad de carga ($F_{v,Rk}$) queda definida por la Ecuación 3-12.

$$F_{v,Rk_Conect} = 25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot d_c^{1,5}$$

Ecuación 3-12

Siendo:

- $F_{v,Rk}$ valor característico de la capacidad de carga por cada conector dentado, en N.
- k_i factores de modificación, con i desde 1 hasta 3.
- d_c diámetro del conector dentado para el tipo C1, en mm.

El factor k_1 depende del espesor de la madera, según la Ecuación 3-13.

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \frac{t_1}{3 \cdot h_e} \\ \frac{t_2}{5 \cdot h_e} \end{array} \right.$$

Ecuación 3-13

Siendo:

- t_1 y t_2 espesores de las piezas de madera, en mm.
- h_e altura de los dientes, en mm.

El factor k_2 depende de la distancia a la testa, según la Ecuación 3-14.

$$k_2 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \frac{a_{3,t}}{1,5 \cdot d_c} \end{array} \right.$$

Ecuación 3-14

Estando $a_{3,t}$ determinado por la Ecuación 3-15, y siendo d_c el diámetro del conector dentado.

$$a_{3,t} = \text{máx} \begin{cases} 1,5 \cdot d_c \\ 7 \cdot d \\ 80\text{mm} \end{cases}$$

Ecuación 3-15

El factor k_3 depende de la densidad característica de la madera (ρ_k), según la Ecuación 3-16.

$$k_3 = \text{mín} \begin{cases} 1,5 \\ \frac{\varphi_k}{350} \end{cases}$$

Ecuación 3-16

En lo referente al deslizamiento para conectores dentados de doble cara, se puede determinar el deslizamiento según la Ecuación 3-17, a partir de la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).

$$K_{\text{ser}} = 1,5 \cdot \rho_m \cdot \frac{d_c}{4}$$

Ecuación 3-17

3.8 Refuerzo con sistemas de expansión

El empleo de la expansión en la clavija orientado a su uso en madera estructural ha sido probado por algunos autores con buenos resultados (Rodd & Leijten, 2003). La expansión controlada aporta una serie de ventajas:

- Reduce el deslizamiento de la unión.
- Mejora la distribución de tensiones a lo largo del agujero donde se ubica la clavija.
- Aporta rigidez a la unión.

Es razonable pensar que situar las superficies sometidas a compresión en regiones alejadas de las intercaras de la madera dé lugar a mejoras en la capacidad de carga con diámetros similares de agujero, frente a la zona que es tratada como crítica en las ecuaciones analíticas de la unión clavija madera (DB SE M, 2009). En otros materiales, especialmente en hormigón, las uniones por expansión se realizan a través de kits, lo que tiene numerosas ventajas:

- Montaje rápido y sencillo en la obra.
- Reduce los costes de reparación e inmovilización.
- No es necesario efectuar trabajos de reacondicionamiento ni ajustes en la unión.
- Ofrece una solución permanente y, en determinados casos, reutilizable.

La clavija en comportamiento expansivo se puede definir como una pieza normalmente metálica, cilíndrica, con cabeza de apriete por un extremo, que puede ser roscado por el otro, asegurado con un cono, una tuerca, un remache o cuña, dotada de manguitos de expansión que rellenan el agujero ante el desplazamiento relativo de una de las piezas interiores. En la Figura 3-46 se muestra uno de esos sistemas comunes para hormigón.



Figura 3-46. Pernos de expansión de camisa tipo cono para hormigón.

A lo largo de las dos últimas décadas, la presión creciente para reducir el plazo de construcción de estructuras ha producido un rápido desarrollo en el sector de las técnicas de montaje. Por ejemplo, un mayor número de dispositivos han sido diseñados y utilizados para introducir cargas concentradas en edificaciones. La gran variedad de productos de fijación disponibles y el constante crecimiento de las aplicaciones requieren, cada vez más, un conocimiento especializado en su comportamiento. Para cubrir una amplia gama de requisitos de resistencia y de aplicación se han desarrollado múltiples variantes. Por ejemplo, se han aplicado expansiones en pequeños elementos de madera con manguitos intermedios de plástico, sobre todo en muebles (Figura 3-47).



Figura 3-47. Perno de expansión para mobiliario auxiliar.

Además, se han desarrollado técnicas de instalación para sistemas de unión cuyas características pueden ser adaptadas a situaciones especiales de la construcción con madera, y ofrecer ventajas añadidas sobre los diseños de unión clásicos.

Son muchos los productos cuyas características de rendimiento cubren la demanda creciente de fijaciones seguras y fiables, aunque tienen una orientación predominante para su uso sobre hormigón, fábrica y acero. Están cuidadosamente controlados, y han sido puestos en el mercado por distintos fabricantes (Fischer, 2014), (Würth GmbH & Co, 2014), (HILTI Co., 2014), (Spit, Illinois Tool Group., 2012) y (DISLAS UTH, 2014) entre otros, con una amplia gama de alternativas reconocidas. Se considera de interés revisar estos sistemas de referencia para valorar su posibilidad de aplicación en uniones en estructuras de madera.

3.8.1 Expansión de camisa metálica

3.8.1.1 Sistema de expansión con avance por rosca con tuerca tronco-cónica

Los sistemas de expansión con camisa metálica consisten en un tubo metálico, abierto típicamente en tres partes en un tramo de longitud limitada, por el que se pasa un tornillo de rosca, con una tuerca de forma cónica estampada o labrada con irregularidades o incisiones que le hacen clavarse en el interior del tubo y no girar con el tornillo, conforme se acerca a la cabeza del tornillo, para ir abriendo la camisa metálica. Con distintos tipos de acabado, es habitual que tengan tratamiento anticorrosión por acero cincado, bicromatado o acero inoxidable. Suele ser apto para cargas medias en tracción (Figura 3-48). En su fijación, se debe dar un par de apriete, preferentemente controlado con una llave dinamométrica, sobre la tuerca o tornillo para anclar el conjunto. Con ello se ejerce un esfuerzo de tracción en el tornillo o perno, y el cono se introduce en los segmentos de expansión, abriéndolos contra el agujero.



Figura 3-48. Secuencia de expansión por cono bajo camisa metálica.

El sistema de expansión puede tener múltiples variantes:

- Disponer de camisa con ancho especial para incrementar la capacidad de carga, sobre todo a tracción y cortante, como las referencias HLS de Hilti® (Figura 3-49 A).

- Sistemas de camisa encastrable y rosca interna que permite el enclavamiento dentro del material en que se embebe, como las referencias HAM de Hilti® (Figura 3-49 B).
- Elementos de doble expansión con aleación de zinc, indicada en cargas con esfuerzos de cortante o vibración. No se fractura y permite cierres en cualquier longitud (Figura 3-49 C).
- Espárragos de expansión por segmentos llamados comúnmente “parabolts”. Suelen localizar la zona de expansión en el extremo interior, con una camisa de expansión más corta; los diámetros van de los 6 a los 12 mm y las longitudes están comprendidas entre 60 y 90 mm. El orificio debe tener igual o mayor profundidad que el espárrago. Algunos modelos incorporan un sistema de expansión doble (Figura 3-49 D).

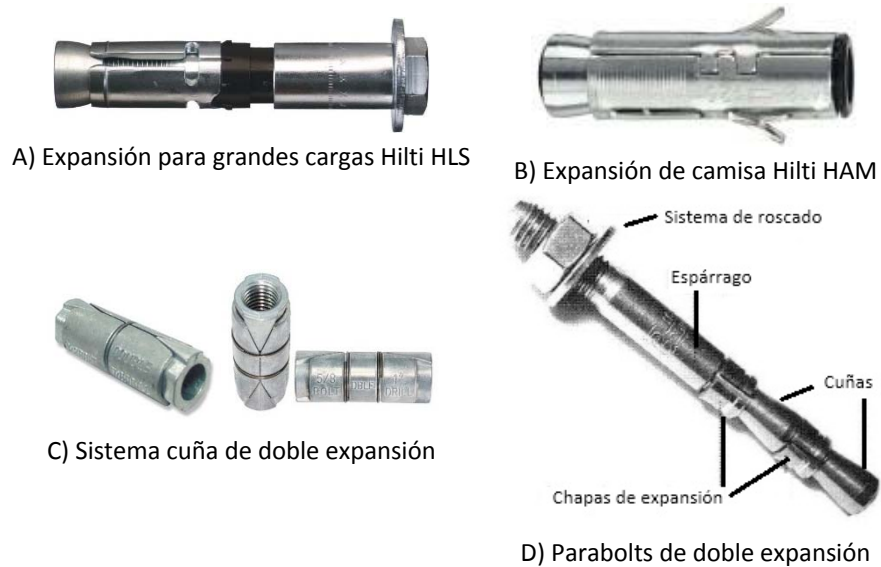


Figura 3-49. Variantes de sistemas de expansión.

Las limitaciones de longitud de los sistemas anteriores pueden ser resueltas con expansión por camisa abierta, como el sistema WUS de Wusth® (Figura 3-50). Los fabricantes recomiendan este sistema para carpintería (Würth GmbH & Co, 2014), vinculándolo con la fijación de marcos de ventanas y puertas de madera, compatible tanto con soportes macizos (hormigón, ladrillo macizo, piedra natural...) como con vigas estructurales. De forma similar a lo anteriormente expuesto, constan de:

- Casquillo de chapa de acero zincada.
- Tornillo de acero galvanizado bicromado amarillo.
- Cono habitualmente de fundición conformado a presión y cromado.



Figura 3-50. Camisa de expansión abierta HILTI HT APC Wurth WUS para carpintería.

3.8.1.2 Sistema de expansión por cuña de golpeo o encastre

Estos sistemas requieren la colocación a tope, con una cuña que queda ajustada por impacto. Para realizar el orificio, hay que usar un taladro o broca con limitación de profundidad. Comúnmente se conocen como “raumer” (Figura 3-51 A). Habitualmente están fabricados en acero inoxidable. Una variante, de características similares, es el taco auto perforante, comúnmente llamado “spit” (Figura 3-51 B); su uso habitual se centra en fijaciones de roca en escalada deportiva. La ventaja de este sistema está a la hora de colocarlos, ya que no precisa de taladro. Una corona dentada en uno de sus extremos, junto a un burilador acoplado al mismo, y un martillo son elementos suficientes; se golpea y gira a medida que los dientes de acero templado erosionan el material de anclaje típicamente frágil. Disponen de una cuña que se coloca en el extremo dentado del taco, donde hay unas ranuras para ayudar a efectuar la expansión. Están fabricados en acero al carbono, lo que les confiere una elevada dureza exterior; por el contrario, les afecta bastante la corrosión.

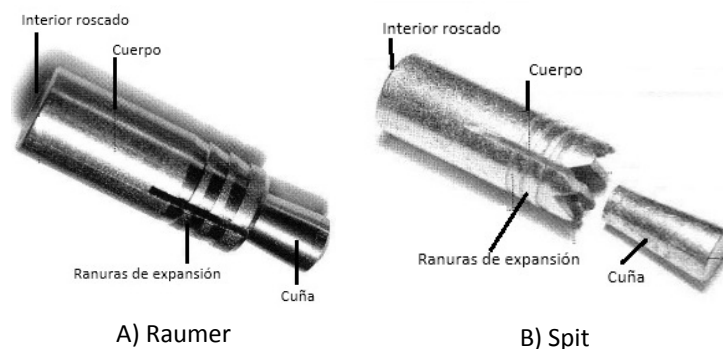


Figura 3-51. Sistema de expansión por golpeo con cuña externa.

Otra variante son los anclajes de expansión por desplazamiento interno (Figura 3-52), donde la cuña viene integrada en el cuerpo de la camisa. Se colocan golpeando la cuña de expansión hasta un punto determinado con una herramienta especial. Los anclajes de expansión por desplazamiento transfieren las cargas externas en el material base principalmente mediante fricción. La expansión se limita a la altura del cono. Los anclajes de expansión por desplazamiento no sufren “expansión ampliada”, lo que supone que incrementos de carga no mejoran la expansión.

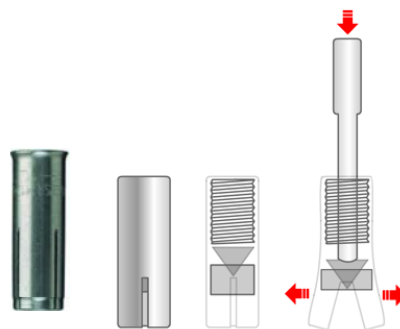


Figura 3-52. Sistema de expansión por golpeo con cuña interna Hilti APC HR.

Estos sistemas de expansión son sensibles a las tolerancias del diámetro del agujero taladrado y a la expansión incompleta del taco, por lo que es de especial importancia utilizar brocas y técnicas que respeten las tolerancias estipuladas. Además se debe mantener la profundidad del agujero de forma exacta y ser estrictos en la limpieza del mismo. Por otro lado, a priori no es posible realizar colocaciones pasantes con este tipo de anclajes, con lo cual su aplicación en uniones clavija de madera presenta dificultades.

3.8.1.3 Sistema de roscado expansivo

La expansión por roscado interior de la camisa requiere un roscado continuo que va reduciendo la sección. Es habitual que disponga de un exterior moleteado o estriado para una mejor resistencia (Figura 3-53).



Figura 3-53. Tacos con expansión por sistema de roscado reducido.

Al roscar las varillas macho, se expande la camisa formando el cono de expansión progresivo y se fija en el soporte (Figura 3-54). Se ha venido empleando en elementos de construcción en hormigón y ladrillo para fijaciones secundarias y distanciadas (como falsos techos), con pequeñas profundidades de anclaje o montaje pasante. No requiere útiles especiales de colocación y, normalmente, se fabrican en aleaciones de cobre y zinc (latón) resistentes a la corrosión.



Figura 3-54. Integración de tacos con expansión por sistema de roscado en varilla roscada.

Estos tacos de expansión pueden actuar con una sola varilla (a modo de clavija) de mayor longitud y se pueden colocar varios de ellos en serie, dispuestos de tal forma que apliquen la expansión en zonas seleccionadas a lo largo del agujero. Se han integrado en las uniones con clavija objeto de estudio con la intención de:

- Poder aplicar las expansiones en zonas ocultas no expuestas a intemperie (Figura 3-55 A).
- Distribuir la expansión en zonas estratégicas de la unión para potenciar el efecto sogá fuera de los tramos de aplastamiento por plastificación de la madera (b_1 y b_2). De esta forma se pueden distribuir los esfuerzos sin afectar a las regiones que en la unión con clavija simple tendrían más tensiones.

La aplicación de este sistema mejoraría la resistencia al fuego de la unión así como su comportamiento mecánico por la aparición del efecto sogá. Sin embargo, durante el montaje aparecieron problemas de giros relativos y, en el momento en que se incrementaba los pares de apriete, dio lugar a roturas de las pestañas de expansión (Figura 3-55 B y C).



A) Vista frontal

B) Sección transversal cortada

C) Rotura de pestañas

Figura 3-55. Montaje del elemento clavija en pieza de madera.

3.8.2 Expansión por camisa plástica

Su empleo se ha generalizado sobre todo para montajes de fijación en hormigón y materiales de obra de fábrica (Figura 3-57). Cuentan con tornillos de cabeza avellanada para facilitar la integración de la cabeza o tornillos de cabeza hexagonal con arandela para potenciar el efecto sogá. La camisa dispone de tres zonas diferenciadas: una punta de entrada normalmente más robusta, la zona de agarre expansivo y estriado y el tramo antigiro. Se presentan con diámetros de clavija de 8 a 14 mm y largos comerciales de hasta 360 mm; y pueden estar dotados de dientes asimétricos, lo que permite su utilización en materiales de construcción macizos y huecos.

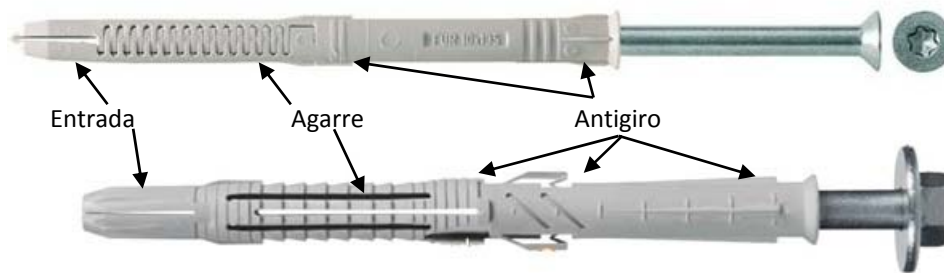


Figura 3-56. Sistema de expansión de poliamida para clavijas de tipo Fischer FUR y Spit Prolong.

Los sistemas de expansión por camisa plástica permiten la adaptación a entornos irregulares (Figura 3-57). Aunque son compatibles con estructuras metálicas, en general se aplican a la transición de madera a materiales de hormigón y fábrica, dado su largo tramo antigiro (Fischer, 2014). Es habitual que estos sistemas traten de reducir la transmisión de esfuerzos de flexión, lo que presenta una ventaja frente a los sistemas de anclaje químico o de acero en contacto directo. Requieren el ajuste con un par de apriete establecido.

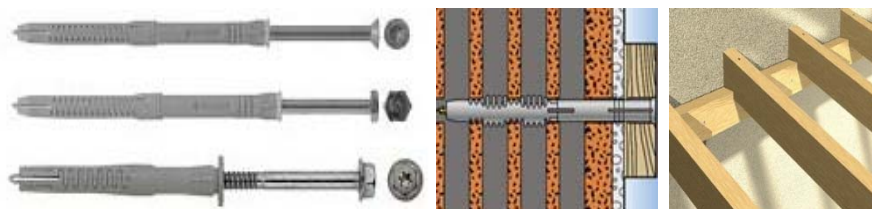


Figura 3-57. Integración de clavija Fischer FUR en sistemas mixtos madera-fábrica.

La camisa plástica suele ser de nylon, también llamado nylon 66 o nailon. Éste es un material de tipo poliamídico, muy resistente, con una estructura similar a la de la seda. Sólido, originalmente translúcido blanco o semicristalino; además de emplearse en clavijas, es material base para distintos elementos mecánicos (engranajes, cremalleras, cojinetes, incluso cuerdas de guitarra). Sus propiedades se indican en la Tabla 3-31. Además es termoplástico, por lo que se puede moldear con calor y, una vez enfriado, recuperar sus propiedades originales.

Tabla 3-31. Propiedades del nylon 66.

Punto de fusión	255 °C
Densidad	1,14 g/cm ³
Calor específico	1,67 J/(mol·K)
Tensión de tracción en el punto de fluencia	79,29 N/mm ²
Módulo de elasticidad a tracción	2.964,75 N/mm ²
Dureza Rockwell	R118
Coefficiente cinético de fricción	0,45

En general, este sistema no es pasante y requiere el avance de la clavija para su expansión, motivo por el cual el interior de la unión madera clavija (en su composición simétrica) no se puede unir.

Si se atiende al criterio de unión trabajando en cortadura doble, resulta importante que la clavija atraviese la totalidad del agujero y se pueda fijar en ambos extremos de igual modo; esto permite la continuidad en los esfuerzos de tracción por efecto soga y simetría. Sin embargo, los sistemas de expansión por camisa plástica descritos (Figura 3-57) están pensados para extremos interiores no accesibles, y requieren el avance de la clavija dentro del agujero para su expansión, sacrificando la continuidad de la clavija y la simetría del sistema. Ello debilita los efectos de tracción que equilibran las clavijas respecto al eje de simetría.

3.8.3 Otros sistemas de expansión

3.8.3.1 Socavado

Los sistemas de expansión por socavado o autoexcavado se suelen emplear en fijaciones para cargas pesadas (impacto, sismo y fatiga) (HILTI Co., 2014), para la fijación de elementos como tuberías pesadas, barreras de seguridad, maquinaria industrial, raíles de grúas, estructuras incrustadas, barreras antigolpe, fijaciones de techo, carriles de ascensores, retroadaptación de puentes, etc. Su instalación necesita útiles especiales como brocas con tope de profundidad, útiles de colocación o martillos específicos (Figura 3-58). Existen también aplicaciones específicas en hormigón para usos especiales como las centrales nucleares.



Figura 3-58. Sistema de expansión por excavado Hilti HDAD.

3.8.3.2 Remachado y roblonado

El remache supone otra técnica de expansión donde el elemento pasante puede quedar expuesto a cargas cortantes. Consiste en un tubo cilíndrico (el vástago) que en su fin dispone de una cabeza. Las cabezas tienen un diámetro mayor que el resto del remache y se suelen cerrar en un extremo por impacto, tracción de un mandril, roscado o compresión. Es un método de unión antiguo, que inicialmente se orientó a la unión de estructuras metálicas con sistemas de roblonado (Figura 3-59), donde éstos se cerraban por impacto, normalmente en caliente, lo que mejoraba las propiedades de la unión, pues el dimensionado se calculaba frente a esfuerzos cortantes mientras que la contracción del roblón introducía pretensados que aumentaban los coeficientes de seguridad.



Figura 3-59. Roblones y estructura metálica con clavijas roblonadas.

Posteriormente se ha extendido su empleo en fijaciones rápidas con pequeño tamaño y acceso desde uno de los lados (Figura 3-60). En general, la cabeza tiene un diámetro mayor que el resto del remache, para introducirlo en el agujero y que pueda quedar encajado; después se introduce un elemento de embutición y deslizamiento que ensancha el extremo encajado que, en ocasiones, alcanza el interior del agujero. La técnica es interesante cuando este proceso de embutido puede dar lugar a expansiones controladas a lo largo de la clavija sobre la madera, si bien el montaje por roblonado puede resultar complicado por las deformaciones que llegan a ocasionarse en el metal, sobre todo si se aplica con sistemas esbeltos.



Figura 3-60. Sistemas de remachado.

3.8.3.3 Expansión para huecos

Los sistemas de expansión para huecos se abren en forma de paraguas (Figura 3-61); pueden contar con punta redondeada, lo que requiere un pretaladro a modo de guía, o con punta afilada cuando existe la posibilidad de clavar directamente el kit. Por otro lado, es habitual que la camisa disponga de un collar con dientes que se claven sobre el agujero para facilitar la expansión de la camisa.



Figura 3-61. Sistema de expansión para huecos y cargas ligeras y variantes de uso.

Este sistema se ha empleado habitualmente en paredes de ladrillo hueco y materiales de construcción ligeros, (Würth GmbH & Co, 2014), como techos de madera, placas y paneles de cartón-yeso, tableros de fibras duras, paredes prefabricadas, abrazaderas para tubos y materiales huecos con un espesor máximo de pared de 55 mm. También tienen una vertiente de uso en superficies duras, como aplacados y azulejos, requiriendo de útiles especiales (Figura 3-62) que facilitan la apertura en paraguas de las pestañas de la valona (seguro contra giro) que deben doblarse dejándolas apoyadas sobre los huecos interiores. Las piezas roscadas incorporadas al sistema de serie pueden sustituirse por otros elementos de fijación como varillas métricas, ganchos, cáncamos cerrados o tornillo con cabeza especial. Resulta interesante el bloqueo de la camisa por pestañas y por deformación mecánica de la camisa de expansión.



Figura 3-62. Útiles de anclaje para expansión en huecos con cargas ligeras.

3.8.3.4 Expansión por cuña de impacto

Los sistemas de expansión por cuña de impacto se emplean como fijación múltiple de elementos no portantes en hormigón expuesto a tracción (HILTI Co., 2014). Es habitual para anclajes de elementos bajo techo, donde se inserta

la clavija. La expansión queda garantizada tras un suave golpeo sobre el vástago saliente que proyecta la clavija pequeña a modo de cuña hacia adentro (Figura 3-63); no requiere ninguna herramienta especial para su colocación y, visualmente se controla que el expansor esté introducido.



Figura 3-63. Anclajes por expansión en cuña Hilti DBZ y FDN.

Se emplea para la fijación de listones y rastreles de madera, perfiles metálicos, falsos techos, cintas de chapa perforadas, construcciones de bases de metal y revestimientos de techos.

3.8.4 Tubo con expansión controlada

Los anteriores sistemas, tal y como es posible encontrarlos en el mercado, tienen limitaciones en longitud y/o diámetros de la clavija para su utilización en estructuras de madera. No obstante, solventando estas limitaciones dimensionales, el concepto de diseño es válido. Para resolverlas, algunos autores han optado por el empleo de tubos expansionados mediante elementos mecánicos (Rodd & Leijten, 2003). Una vez introducida la clavija a modo de tubo, se le acopla una matriz (Figura 3-64), que ejerce efectos de presión sobre la clavija, logrando su expansión. El remachado que aparece en los bordes exteriores permite que el material circundante se abra a modo de grandes arandelas capaces de transmitir esfuerzos axiales al resto de la clavija y, en consecuencia, provocar la aparición del efecto sogá.

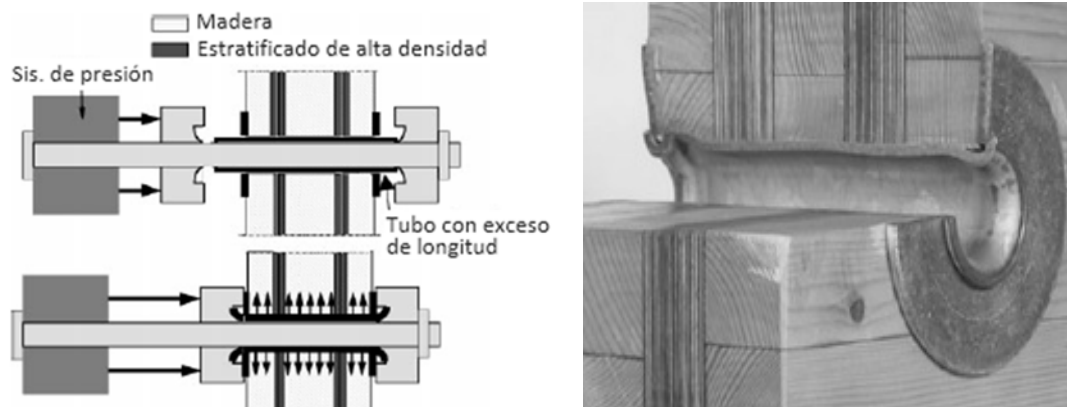


Figura 3-64. Sistema de expansión de clavija de tipo tubo hueco (Rodd & Leijten, 2003).

Aunque este sistema mejora la ductilidad de la unión y reduce los deslizamientos, presenta algunos inconvenientes:

- La clavija es hueca con lo que el diámetro de agujero debe ser más grande para conseguir momentos de inercia equivalentes a los de clavija maciza, lo que debilita la madera y facilita los modos de fallo por aplastamiento continuo en ésta (modos de fallo tres y cuatro según se vio en el Apartado 2.6.1).
- La expansión se realiza con matrices exteriores a la unión, lo cual supone expansiones no uniformes a lo largo del tubo y resulta sensible a problemas de pandeo local en función del espesor de las paredes del tubo.
- El efecto de remache provocado en las caras exteriores de la clavija limita las posibilidades de ocultar la unión, lo que la hace más sensible a fuego.

Visto el sistema de expansión por camisa abierta (Figura 3-50), donde el cono se podía desplazar a lo largo de toda la clavija para lograr la expansión en superficies amplias de contacto con el agujero, se plantea un nuevo procedimiento de expansión con camisa. Se opta por una camisa cerrada (a modo de tubo) donde se pretende desarrollar una expansión homogénea a lo largo de todo él con elementos pasantes. Dado que el desplazamiento por rosca con tuerca cónica (Figura 3-46) puede tener limitaciones de carga, se emplean bolas (de rodamiento) calibradas y lubricadas (Figura 3-65) donde, si es necesario, se pueden realizar pasadas sucesivas con bolas de diámetros más grandes por el interior del tubo. Este procedimiento reduce problemas frente a los perfiles abiertos de pequeño espesor expuestos a flexión, donde aparecen tensiones cortantes y problemas de deformación local.

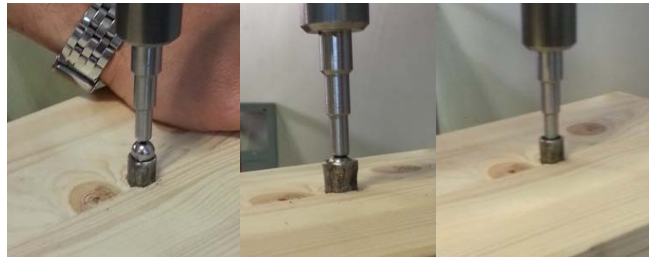


Figura 3-65. Expansión de tubo metálico por bola.

El ensanchamiento con bolas calibradas presenta mejoras frente al sistema de matrices que aplica presión en los extremos de la clavija propuesto por otros autores (Rodd & Leijten, 2003). Entre las ventajas están las siguientes:

- Permite expansiones progresivas, al poder hacer uso de distintos tamaños de bolas, y configuraciones de camisa tubular (tanto en espesor como en tipo de material).
- Facilita el empleo de diámetros más reducidos y con clavijas más esbeltas, reduciendo los problemas de pandeo frente al sistema de compresión con matriz exterior (Figura 3-64) y/o los remachados (Figura 3-59).
- Con el paso de bolas calibradas, se facilita la inserción de la clavija maciza en el interior (Figura 3-66), que incrementará el momento de inercia y la resistencia a flexión del conjunto. Además, se evita la pérdida de sección útil de madera frente a los sistemas de expansión que mantienen huecos o juegos significativos entre la camisa y el vástago interior (Figura 3-48).
- Se evitan asimetrías como ocurre en los anclajes de expansión en cuña (Figura 3-63) o con camisa de expansión abierta (Figura 3-50).
- Se puede conseguir una expansión controlada y uniforme a lo largo de todo el agujero, sin pérdidas innecesarias en la sección útil de la madera como ocurre en los sistemas de expansión en paraguas (Figura 3-61).



Figura 3-66. Relleno del tubo expandido con la clavija maciza.

En los montajes se ha empleado una prensa de 300 KN (Figura 3-67). La expansión ejercida por la bola (lubricada) no ha sobrepasado determinados valores de la carga (10 KN para incrementos de diámetro del orden de 2 mm). Por otro lado, este proceso permite:

- Conocer con exactitud las dimensiones del diámetro interior del tubo tras la expansión y previo a la introducción de la varilla maciza
- Medir la carga requerida para lograr una determinada expansión del tubo y, en consecuencia, facilitar la sustitución de las bolas y la prensa por tuercas con exterior en forma de cono que avanzan sobre varillas con sistemas roscadas que consigan el mismo efecto para kits de montaje en obra.



Figura 3-67. Prensa empleada en el proceso de expansión.

Uno de los problemas que se debe resolver se refiere al proceso de introducción de las bolas. Tras sobrepasar éstas el borde del tubo, se necesitan útiles de empuje (Figura 3-68) para embutir la bola, dado que el agujero de la clavija tubo es de menor diámetro. Esto provoca problemas de pandeo. Por ello, en las primeras fases, se diseñó un herraje de embutición con resaltes escalonados (para ser empleado en distintos diámetros de tubos) por mecanizado con torno; una vez embebida la bola en el tubo, el empuje se realiza por varillas de longitudes progresivamente mayores que resultan arriostradas a pandeo por las paredes del tubo. En el Capítulo 6 se exponen los resultados que este sistema aporta a la unión estructural.



Figura 3-68. Sistema de embutición.

3.9 Aplicación práctica de uniones en estructuras de edificación. El conjunto histórico de las dársenas del Canal de Castilla, en Alar del Rey

Con objeto de centrar el análisis, utilizando valores adecuados de las características mecánicas, dimensiones y cargas en la unión que se va a estudiar, como se indicó en el Apartado 3.2.3, se tomará como referencia una estructura real. En este caso, se ha elegido una estructura que incluyera elementos con clavija dentro de sus uniones. El diseño y cálculo de la estructura, de acuerdo con la normativa vigente, sirve para definir con precisión la geometría, y ratificar la caracterización de los materiales y las cargas en las uniones que se van a estudiar.

Para caracterizar los nudos de unión con clavija que contiene este ejemplo de estructura, no resulta necesario realizar el proyecto completo con todas sus exigencias legales (memoria, planos, pliego de prescripciones, mediciones, presupuestos, gestión de residuos, estudio de seguridad y salud,...). Este apartado se limitará a una síntesis del cálculo estructural, donde se exponen los valores de las características mecánicas de los materiales empleados y de las acciones a las que se encuentra sometida la estructura.

De acuerdo con la Ley 38/1999 de Ordenación de la Edificación (LOE), según el Boletín Oficial del Estado (BOE) de 6 de noviembre de 1999, los edificios deben cumplir los requisitos básicos desarrollados en el Código Técnico de la

Edificación (CTE), aprobado por el Real Decreto 214/2006, BOE de 28 de marzo de 2006, donde se especifican y cuantifican las exigencias básicas de seguridad estructural. En lo que afecta a las estructuras de madera, quedan afectadas por los siguientes Documentos Básicos de Seguridad Estructural (DB SE):

- DB SE. Seguridad Estructural: Resistencia y estabilidad, Aptitud de servicio (DB SE, 2009)
- DB SE-AE. Seguridad Estructural: Acciones en la Edificación (DB SE AE, 2009).
- DB SE-M. Seguridad Estructural: Estructuras de Madera (DB SE M, 2009).
- DB SE-A. Seguridad Estructural: Estructuras de Acero (DB SE A, 2009).

De forma complementaria, se han considerado también los Eurocódigos en los que se fundamentan los Documentos Básicos mencionados:

- Eurocódigo 0. Bases de cálculo de estructuras (Eurocódigo. UNE EN 1990, 2003).
- Eurocódigo 1. Acciones en estructuras (Eurocódigo 1. UNE EN 1991-1-1, 2003).
- Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras de acero. (Eurocódigo 3. UNE EN 1993-1, 2013)
- Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera UNE-EN 1995 (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).

3.9.1 Contexto y descripción de la estructura

La estructura modelo de referencia parte del proyecto de restauración (Sanz, 2008) de los Almacenes de Picos en la Dársena del Canal de Castilla (Figura 3-69). La empresa encargada de llevarla a cabo, REARASA, tiene amplia experiencia en el ámbito de las estructuras y la restauración en madera. También será el fabricante de las probetas que posteriormente se han ensayado para realizar este estudio. Otras obras de rehabilitación llevadas a cabo por esta empresa son: las Aceñas de Olivares (Zamora), la Ermita de Santa Ana (Valladolid), el Real Monasterio de Santa Clara (Tordesillas) o el Alfarje de la Universidad (Salamanca). Sus trabajos han sido estudiados y documentados por varios autores (Fernández & Fernández, 2007) y (Nuere, 2007).



Figura 3-69. Vista exterior de las dársenas de Alar del Rey (Palencia).

Esta estructura permite identificar también la trayectoria histórica en el uso de la madera estructural y su durabilidad. Si bien no es el objetivo principal de este trabajo, se va a introducir aquí una breve reseña histórica de esta construcción. La obra civil del Canal de Castilla surge en sus primeros proyectos en los siglos XVI y XVII, en el marco de un plan global de obras públicas orientado a promover el desarrollo económico con una red de canales navegables. En el siglo XVIII, derivado de este plan de obras públicas, bajo el reinado de Fernando VI, se proyecta este edificio en Alar del Rey, Palencia. Destinado para almacenamiento, fue finalizado hacia 1791, en la época de Carlos III. Su misión, al igual que la de otros almacenes similares, como los ubicados en las dársenas de Medina de Rioseco, Valladolid, era la de actuar de almacén de puerto para el embarque o desembarque de las mercancías, fundamentalmente cereales. Es declarado Bien de Interés Cultural, con la categoría de Conjunto Histórico, según Decreto 154/1991, de 13 de junio.

El edificio sufrió restauraciones en el año 2003 y se completó con el proyecto de 2008, orientándolo como Centro de Interpretación del Canal de Castilla. Los procedimientos de restauración empleados han estado condicionados por los aspectos visuales y del entorno. La estructura de cubierta está formada por cerchas (Figura 3-70), que

solventan el problema de la excesiva flexión del tirante según se va ganando luz. Los pares se refuerzan a flexión, colocando tornapuntas que reducen la luz. Esta tipología de cercha es de uso común en nuestra geografía, especialmente en el medio rural, de ahí su denominación común de cercha española. En la Figura 3-71 se muestran las dimensiones y composición de la obra realizada.



Figura 3-70. Vista de las naves antes y después de los trabajos de rehabilitación de 2003. Composición de cerchas.

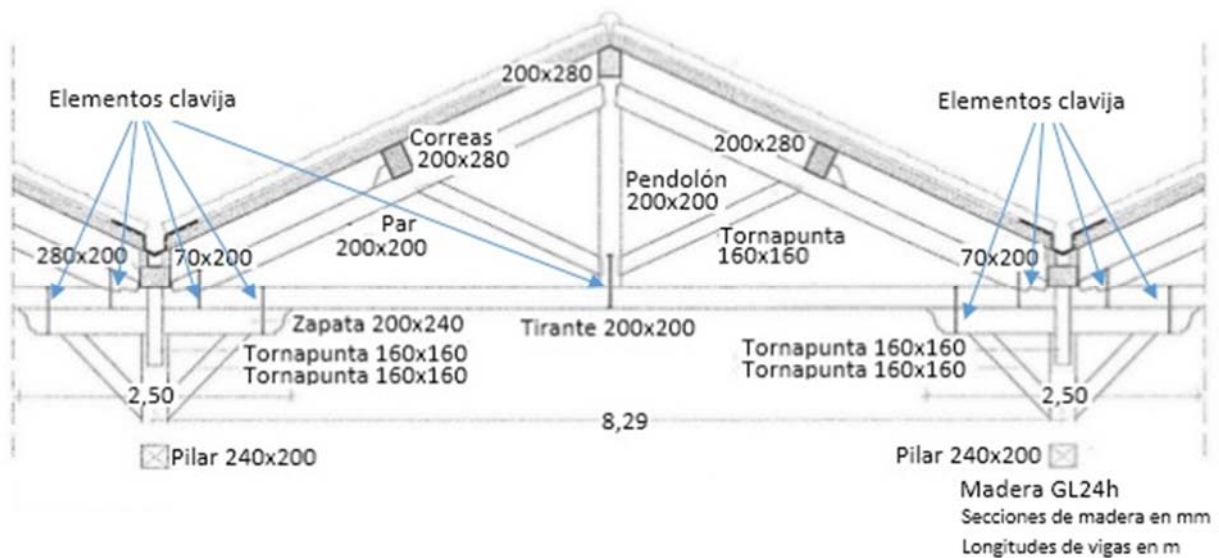


Figura 3-71. Diseño de cercha española.

Sobre estas cerchas descansan correas, las cuales reciben parecillos de madera dispuestos perpendicularmente a los aleros y limahoyas. Sobre los parecillos se clava la tablazón y sobre ésta se coloca la teja árabe. Las cerchas descansan sobre pilares que transmiten el esfuerzo al terreno mediante basas troncopiramidales de piedra caliza (Figura 3-72). Los pilares de madera aserrada originales fueron sustituidos, en los trabajos de 2003, por otros que se fijan sobre la zapata de piedra caliza existente. Están formados por dos piezas de madera unidas en la parte inferior y a media altura mediante otra pieza intermedia (Figura 3-77), a través de uniones semejantes a las estudiadas en el presente trabajo. Esta disposición permite emplear piezas de menores esquadras (con el consiguiente ahorro de costes) y la sustitución de elementos parciales en lugar de toda la columna si se producen deterioros.

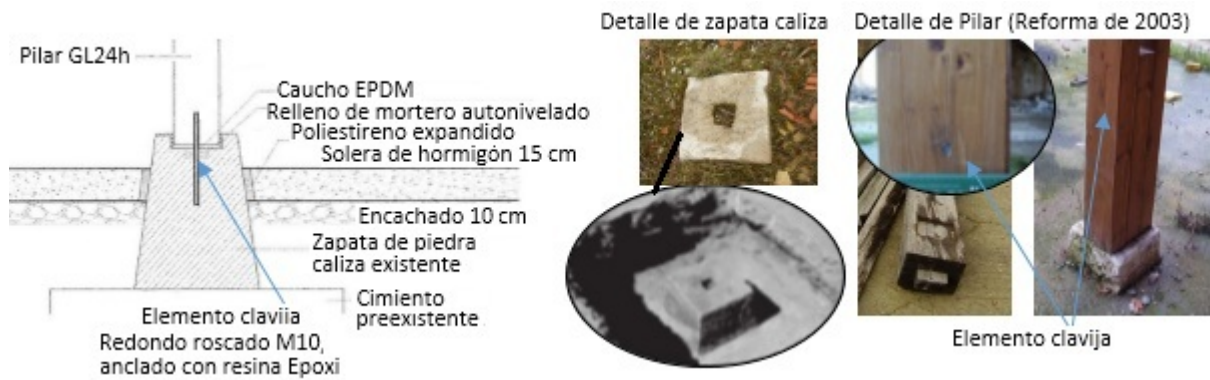


Figura 3-72. Apoyos de pilares.

También existían uniones tradicionales, en rayo de júpiter (Figura 3-73), que se habían reforzado mediante una clavija. Alrededor de dicha clavija se había originado pudrición parda (Figura 3-74), por la penetración de agua procedente de goteras, que facilitó el desarrollo de los hongos. La descomposición causada por la pudrición fue una de las causas últimas del colapso de la estructura original.



Figura 3-73. Unión tradicional en Rayo de Júpiter

El daño provocado por la deficiente cubrición y la consiguiente exposición a la lluvia fue una de las causas iniciales de fallo en los elementos de la estructura (Figura 3-74), y es un ejemplo de los riesgos derivados de la falta de mantenimiento y protección, factores que afectan especialmente a la durabilidad de la estructura. Cualquier diseño de la unión debe tener en consideración el posible ataque por los hongos de pudrición, los xilófagos y la corrosión, lo que implica el tratamiento de la madera, su control de humedad, la protección superficial de las piezas y, en definitiva, el uso de materiales con las exigencias de construcción expuestas en apartados anteriores.



A) Recorte de par con unión en rayo de Júpiter reforzado con clavija.



B) Viga de tirante degradada por pudrición parda propagada desde la unión tipo clavija.

Figura 3-74. Daños en uniones de la estructura primaria afectadas por pudrición: A) Recorte de par con unión rayo de Júpiter, B) Viga de tirante.

En el desarrollo de la rehabilitación se puede observar la colocación de elementos tipo clavija (coexistiendo con las uniones tradicionales), en composición simétrica en el encuentro de pendolón con tirante (Figura 3-75). En el detalle de la Figura 3-75, correspondiente a la rehabilitación de 2003, se puede apreciar el refuerzo con placas-clavo en

caras exteriores. Éstas fueron retiradas en la obra final realizada en 2008 (Figura 3-71), para mejorar la resistencia a fuego de la estructura, en favor de estribos unidos por clavija en composición simétrica metal-madera. En distintos elementos estructurales se pueden identificar disposiciones de uniones de madera con clavija en cortadura simple como pueden ser los encuentros de tornapuntas con tirantes pertenecientes a la rehabilitaciones de 2008 (Figura 3-76) y en cortadura doble simétrica (Figura 3-77).



Figura 3-75. Encuentros de pendolón con tirantes.



A) Encuentro de tornapuntas y tirante



B) Pendolón

Figura 3-76. Detalles en uniones tipo clavija. Encuentro de tornapuntas, tirante y pendolón.



Figura 3-77. Composición de columnas con cerchas.

En distintos nudos de la estructura se puede apreciar como la orientación relativa entre las piezas de madera varía desde 0° (Figura 3-78 A) a 90° en disposición simétrica (Figura 3-78 C). En ellos también se identifica:

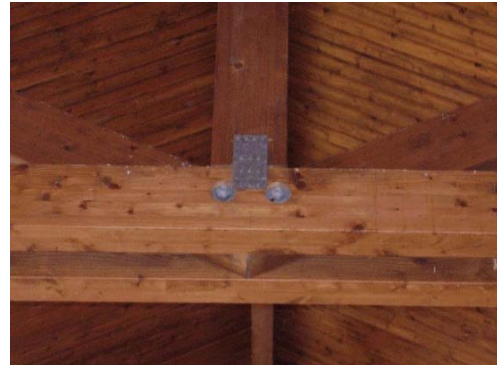
- Sistema tuerca-arandela, para mejorar el efecto sogá.
- Avellanado orientado a ocultar la unión para mejorar la resistencia al fuego.



A) Transición de pilar.



B) Encuentro de tornapunta y pilar



C) Encuentro de pendolón con tirantes y tornapunta en cercha

Figura 3-78. Uniones con distintas orientaciones de fibras entre madera.

La estructura original estaba realizada con madera aserrada de pino C18 mientras que las especificaciones de rehabilitación introducen madera laminada encolada GL24h (Figura 3-79), según las indicaciones del proyecto (Sanz, 2008), justificada en la necesidad de emplear maderas con marcado CE.



Figura 3-79. Edificación tras la rehabilitación de 2008 y detalles de las correas de madera laminada.

En el diseño de las uniones tipo clavija empleadas en el proceso de restauración se intentó mantener al máximo posible las características de la estructura original, pero a la vez evitando los problemas de humedad y adaptándose a las exigencias de la normativa actual. Por otro lado el estudio de esta obra singular permitió:

- Identificar los cambios que se han producido en las técnicas de construcción.
- Identificar los cambios que se han producido en las técnicas de unión.
- Identificar problemas de degradación que pueden aparecer en la estructura.
- Conocer la evolución temporal de las uniones y los problemas de degradación que pueden dar.
- Conectar la línea de investigación de este trabajo con un caso práctico.
- Ratificar la adecuación de los materiales y elementos de unión caracterizados.
- Identificar escuadrías, de cara a modelizaciones y ensayos, ya que así lo requiere el nuevo enfoque en los ensayos mecánicos de la madera para uso estructural, que aconseja probetas a escala real (Ariza, 2002).

3.9.2 Cálculo de la estructura

Se debe realizar el dimensionamiento de los nudos a partir de datos reales y ecuaciones, siguiendo las indicaciones del (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). Esto supone un proceso previo de análisis de la estructura, las condiciones de contorno y los detalles de las uniones propuestos en el proyecto de rehabilitación (Sanz, 2008), donde se fijan las siguientes características:

- Madera laminada encolada de conífera, de calidad GL24h.
- Humedad máxima de la madera: 18 %.
- El acabado de las vigas se realizará mediante cepillado, lo que permitirá obtener superficies planas.
- La madera será sometida a un tratamiento de protección fungicida, insecticida e hidrorrepelente.
- El cálculo, dimensionamiento y fabricación de todos los elementos de madera laminada y herrajes se adecuará a la normativa actual.

Las características mecánicas de la madera elegida, GL24h, ya se indicaron en la Tabla 3-1. Por otra parte, los valores característicos de las acciones sobre el edificio (Tabla 3-32) han sido determinadas a partir del documento de Seguridad Estructural, Acciones en la edificación (DB SE AE, 2009) y a partir de los datos del proyecto (Tabla 3-32). Se consideró la carga de nieve en una zona 3 (con altitud 749 m) y la de viento en una zona B (con velocidades de 27 m/s) junto con un grado de aspereza III (propio de zonas rurales) y una categoría de uso C propio de zonas con acceso público.

Tabla 3-32. Valores característicos de las acciones consideradas sobre la estructura.

Acciones constantes (peso propio):	
Correas	0,22 KN/m ²
Tablero (panel sándwich)	0,50 KN/m ²
Tejas	0,50 KN/m ²
Acciones variables:	
Uso /nieve	1,00 KN/m ²
Viento (presión dinámica)	1,00 KN/m ²

Otras condiciones que la estructura debe cumplir son:

- Limitación de flecha en servicio para todos los elementos de valor $f < L/300$.
- Limitación por aplastamiento en los herrajes (este apartado será estudiado en los capítulos posteriores).

Es habitual el empleo de pernos para uniones en estructuras de madera con clases de servicio elevada. La estructura estudiada en este trabajo que se corresponde con la de las Dársenas de Alar del Rey, está sometida a clase de servicio 3, es decir a unas condiciones de humedad relativa que excede el 85 %.

La norma de aplicación (DB SE M, 2009) indica que las uniones exteriores expuestas al agua deben diseñarse de forma que se evite la retención del agua y, además de la protección de otros materiales, las uniones deben quedar ventiladas y con capacidad de evacuar el agua rápidamente. De hecho, como se comentó en apartados previos, la pudrición parda aparecida en las uniones fue uno de los factores del colapso de la estructura original. Independiente de los motivos de fallo anteriores, los elementos mecánicos de fijación tipo clavija se dimensionan con una resistencia característica a rotura en tracción del acero $f_{u,k}$, y no se consideran reducciones del área debido a la presencia de agujeros en la zona comprimida de las piezas siempre que los agujeros estén rellenos por un material más rígido que la propia madera.

Las dimensiones geométricas más significativas quedan expuestas en la Figura 3-80 y Figura 3-81. Se han obtenido de los planos del proyecto de rehabilitación (Sanz, 2008), que definen la estructura primaria que soporta la cubierta

como una cercha española con pendolón así como las cotas características. Otras dimensiones geométricas de la obra son las siguientes:

- Pendiente en cubierta: 46,10 %.
- Área sobre cerchas centrales: $4,5 \cdot 4,56 = 20,53 \text{ m}^2$.
- Área de cada una de las naves: $32,30 \cdot 8,29 = 267,77 \text{ m}^2$.
- Numero de naves adosadas: 12.

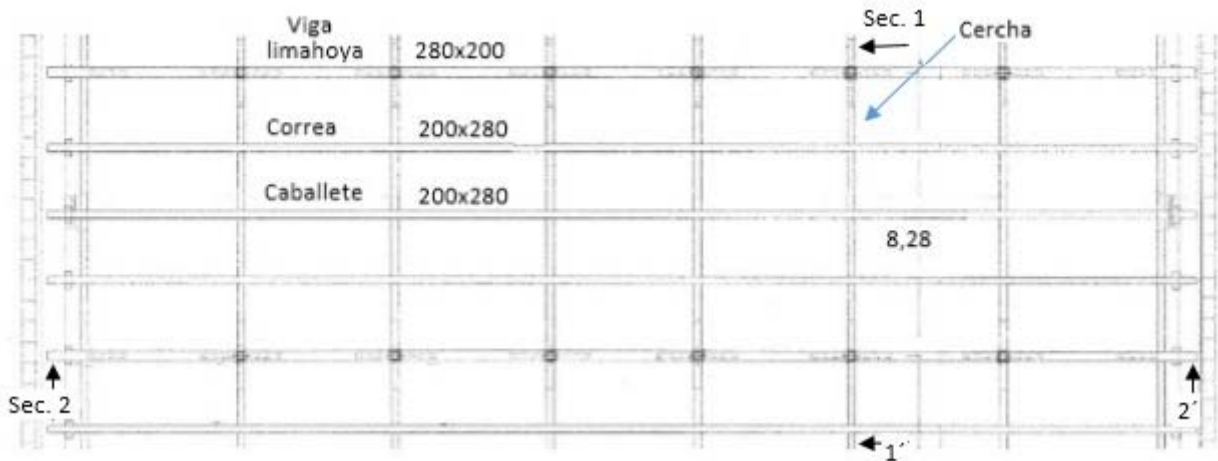


Figura 3-80. Dársenas de picos de Alar del Rey. Planta de una de las naves adosadas (Sanz, 2008).

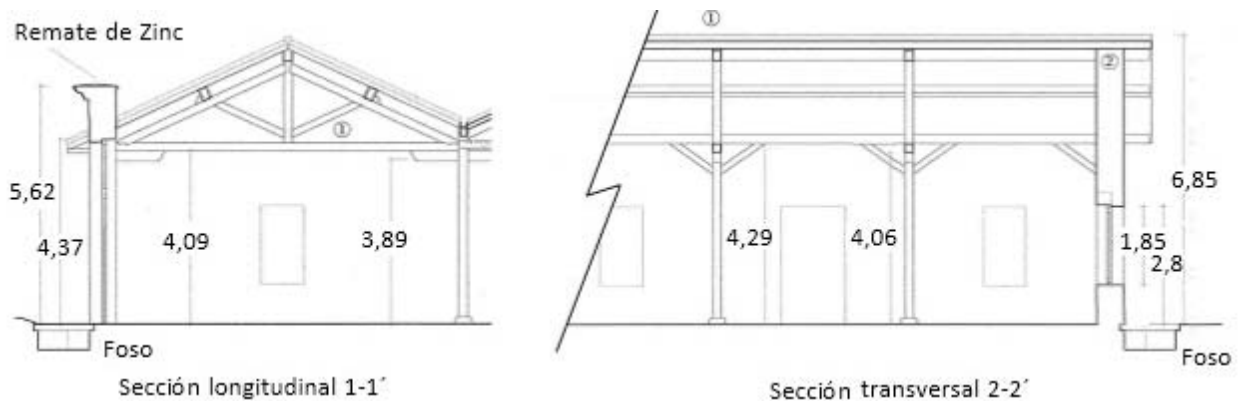


Figura 3-81. Dársenas de picos de Alar del Rey. Secciones de planos de alzados (Sanz, 2008).

La duración de las cargas se ha determinado teniendo en cuenta la clasificación indicada en la norma (DB SE M, 2009), según la Tabla 3-33 y la Tabla 3-34. En base a ello, se determina el coeficiente k_{mod} de cada una de las combinaciones. La duración de la carga viene determinada por la hipótesis simple de menor duración que interviene en cada combinación. Teniendo en cuenta la clase de servicio 3, a partir de las resistencias características, se determinan los valores de las resistencias de cálculo.

Tabla 3-33. Clases de duración de las acciones [(DB SE M, 2009) Tabla 2.2].

Clase de duración	Duración aproximada acumulada de la carga característica	Acción
Permanente	Más de 10 años	Permanente, peso propio.
Larga	De 6 meses a 10 años	Apeos o estructuras provisionales no itinerantes.
Media	De 1 semana a 6 meses	Sobrecarga de uso; nieve en localidades de $>1.000 \text{ m}$.
Corta	Menos de 1 semana	Viento; nieve en localidades de $< 1.000 \text{ m}$.
Instantánea	Algunos segundos	Sismo.

Atendiendo a los tipos de cargas consideradas en la estructura, se ha dado la siguiente duración:

Tabla 3-34. Tiempo de duración en función del tipo de acción.

Acciones	Duración
CP	Permanente
S. Uso	Corta
Nieve	Corta
Viento	Corta

Las particularidades de la edificación y la aplicación de la normativa vigente de cálculo de estructuras conducen a una amplia combinatoria de situaciones, que solo puede abordarse mediante el empleo de aplicaciones informáticas adaptadas a la normativa.

Existen múltiples programas en el mercado que contemplan las especificaciones estructurales que establece la normativa, como Tricalc[®] de Arktec, CYPE[®] de CYPECAD[®], ESwIn[®] de Procedimientos-Uno, o CADWork[®] (éste último está muy especializado en estructuras de madera). De entre ellos, se eligió CYPE[®] 3D, 2014.a en su versión educacional Campus, para la determinación de esfuerzos en barras porque:

- Su uso está muy generalizado (aproximadamente 48.000 profesionales registrados).
- Permite ejecutar el cálculo matricial de la estructura para todas sus combinaciones, considerando el CTE.
- Dispone de funciones de salida gráfica de esfuerzos, planos CAD y memoria técnica.
- Permite intercomunicarse con otros programas e importar estructuras, definir mediciones, precios, estudio de seguridad, etc.

Aunque la plataforma informática tiene una amplia librería de detalles constructivos, no contempla el cálculo de los nudos. Para estas partes de la estructura existen otras opciones, como es el uso de programas de cálculo por elementos finitos, entre ellos ANSYS[®], Cosmos[®], Robot Structural[®] o Abaqus[®].

En la Figura 3-82 se muestran extractos de la modelización realizada con CYPE[®], donde se aprecia la disposición de las cerchas y las escuadrías definidas para el cálculo dimensional.

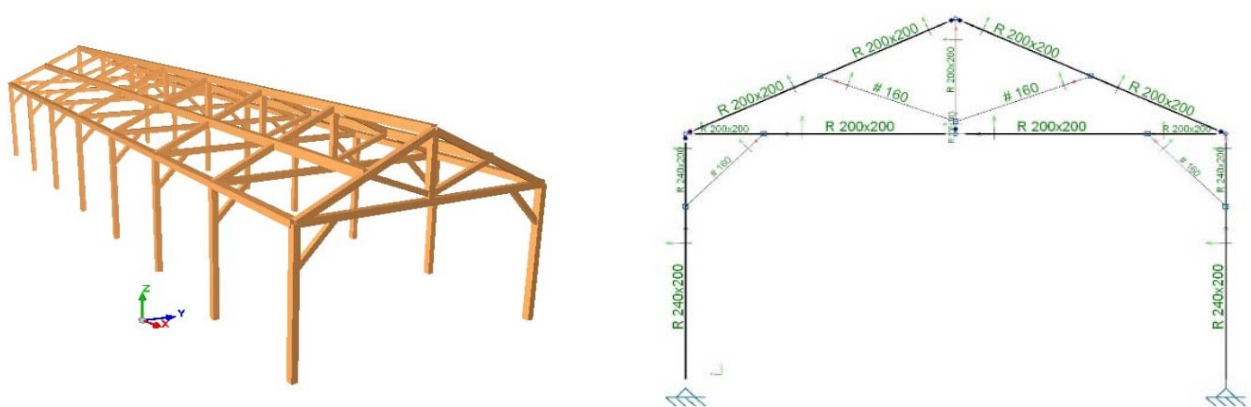


Figura 3-82. Modelo en tres dimensiones de la estructura. Definición de escuadrías.

Sin entrar en detalle sobre el cálculo estructural completo, más propio de un proyecto, la modelización permite establecer relaciones entre escuadrías, cargas y caracterizar los nudos objeto del presente estudio. En la Figura 3-83 se muestran valores de carga de distintos nudos.

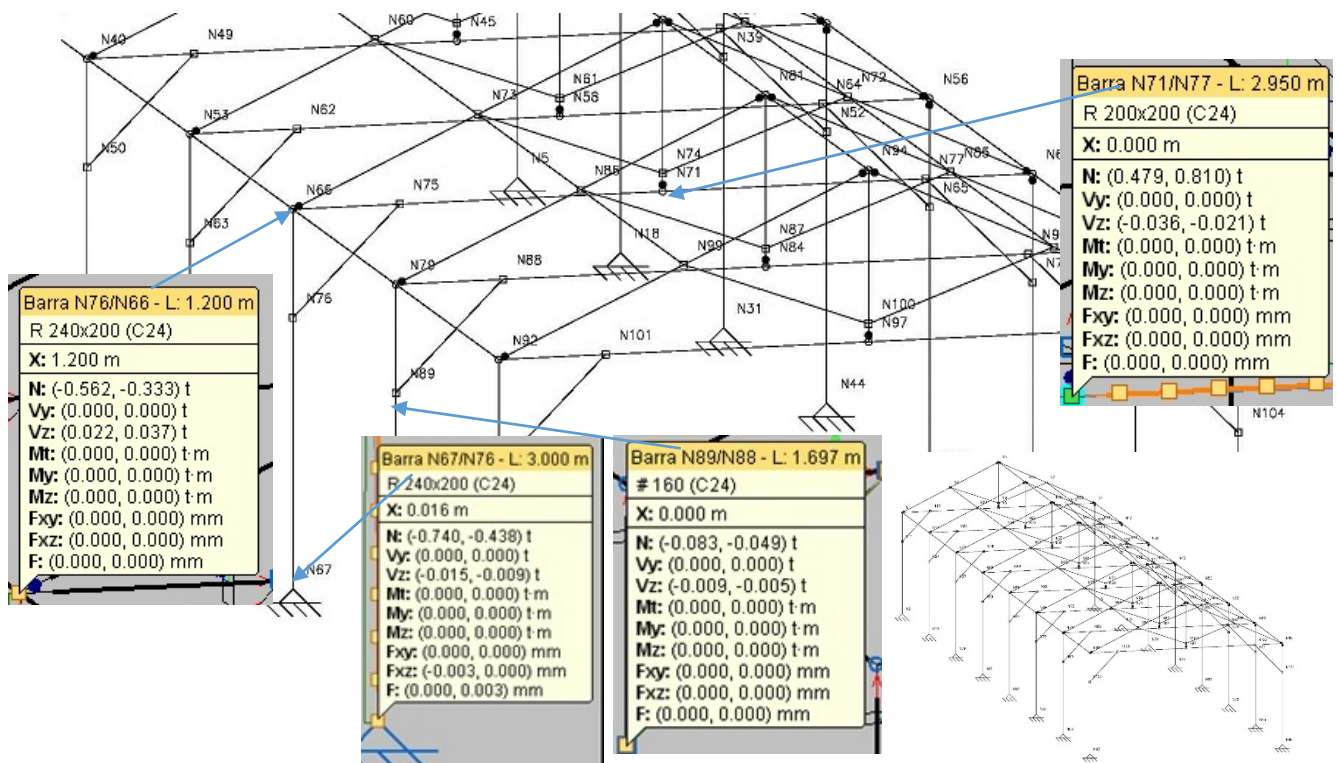


Figura 3-83. Solicitaciones de algnos de los nudos.

La Tabla 3-35 resume parte de los resultados, indicando la carga axil máxima que transmiten las barras a los nudos. También se ha identificado la situación de las uniones con clavija representadas en la Figura 3-83 para los planos de cerchas y pilares intermedios. Estos cálculos reflejan los valores máximos de carga en la dirección axial de la viga para la evolvente más desfavorable de los distintos estados de carga, y permiten fijar las necesidades resistentes a las que se puede enfrentar el nudo articulado al que habría que añadirle la clavija calculada con el objetivo de conocer las necesidades en la capacidad de carga ($F_{v,Rk}$) que debe soportar la unión.

Tabla 3-35. Carga axil sobre uniones madera-madera (para plano de carga intermedio).

Tipo de nudo	Detalle	Número de nudo	Carga axil máxima (KN)
Encuentro de pilar con su base	Figura 3-72	N67	7,4
Unión de pendolón con estribo al tirante de correa	Figura 3-78 C	N71	4,79
Tornapunta con tirante	Figura 3-78 B	N89	0,83
Encuentro de pilar con cercha	Figura 3-77	N66	0,33

En el Apartado 1.1.2 se indicó que, en las estructuras de madera, del 20 al 25 % del coste de la estructura está vinculado con el diseño y construcción de las uniones entre sus diferentes elementos; y que, dado que las uniones se dimensionan al final del proceso, se les presta menos atención. Efectivamente, tanto del proyecto analizado de rehabilitación (Sanz, 2008), como del proceso práctico (resumido en este apartado) para recalculer la estructura e identificar las cargas en las uniones, se deducen valoraciones análogas. Es común centrar el cálculo en la estructura primaria (de vigas) para llegar a un dimensionado de las escuadrías de madera, posponiendo los criterios relacionados con el dimensionado de la unión. De hecho, siendo críticos con el estudio del proyecto original (Sanz, 2008), no se identifica un cálculo de los nudos de madera con uniones de tipo clavija, a pesar de que son introducidos tanto en los planos como en la ejecución material de la estructura. Además, las modelizaciones realizadas con aplicaciones como CYPE® resuelven el dimensionado de las vigas de madera conforme a la norma de aplicación (DB SE M, 2009), incluso plasman las representaciones en planos como puede apreciarse en la Figura 3-82, pero no integran algoritmos para comprobar el comportamiento en los nudos de madera, ni para el dimensionado de las clavijas.

El cálculo estructural realizado sobre la estructura del edificio pone de manifiesto las cargas de trabajo y por lo tanto la capacidad de carga por plano cortante y elemento de fijación que deben tener las clavijas. También resalta la necesidad de identificar el comportamiento de la unión una vez conocidas las cargas a las que se ve sometido el nudo. Parte de este comportamiento debe estar relacionado con las deformaciones, mediante los coeficientes de deslizamiento (K_{ser}) y la capacidad de carga (máxima) por plano cortante y elemento de fijación ($F_{v,Rk}$). En consecuencia, frente a las cargas de trabajo máximas resultantes de un modo de fallo en la unión inicialmente desconocido, tal y como son proporcionadas por las normas de aplicación (DB SE M, 2009) y (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), se hace necesario valorar el modo de fallo más eficiente, y una vez establecido, dimensionar la unión teniendo presente la evolución en la capacidad de carga y el deslizamiento para los distintos estados de trabajo que se pueden dar sobre la misma.

4 Modelos numéricos

4.1 Introducción

En este capítulo se fija el problema base que va a ser objeto de estudio y se describe el modelo inicial que, posteriormente, será expuesto a la modificación de las variables cuyo efecto se pretende estudiar. Se establece la disposición de la unión en su conjunto con la geometría y los datos de partida básicos para poder realizar los cálculos resistentes.

Una vez establecido el modelo base, se reflejan las ecuaciones que dan lugar al cálculo analítico de la unión junto con los resultados de estos cálculos fundamentados en las ecuaciones descritas en el Capítulo 2 para el dimensionado de las uniones de madera con clavija. Se define el valor de la capacidad de carga para distintos modos de fallo, la anchura interior de aplastamiento o el deslizamiento que presenta la unión. También se hacen desarrollos similares con las ecuaciones disponibles para los elementos complementarios como adhesivos o conectores. Este modelo se plasma en una hoja de cálculo de tipo MathCAD® que permite ver todo el desarrollo de cálculo y generar gráficas de resultados; posteriormente, se extiende a libros de cálculo con el fin de poder mantener el modelo inicial y extender los cálculos cuando se modifican las variables cuyo efecto se pretende estudiar, con el fin de comparar la evolución de resultados.

A continuación se muestra el modelo de elementos finitos desarrollado con el programa Abaqus®. Se describe su proceso de montaje indicando las etapas necesarias y los parámetros más significativos que se deben configurar en Abaqus®, para modelizar un problema similar al descrito en el problema base. Este nuevo modelo numérico permite establecer una serie de etapas intermedias para valorar el comportamiento de la unión a medida que entre en carga. Se exponen técnicas que permiten un montaje rápido del modelo de elementos finitos a través de archivos de tipo Script desarrollados con sentencias de programación en lenguaje Python®, que se ejecutan dentro de Abaqus®. Por último, se refleja una subrutina realizada con el lenguaje de programación Fortran®, que permite una mejor definición del comportamiento mecánico de la madera para la simulación con Abaqus®. Se describen las bases y el flujo de cálculo que la subrutina utiliza para modelizar numéricamente su comportamiento elástico y plástico así como las diferentes capacidades resistentes en tracción y compresión; todo ello de una forma acorde con el comportamiento que presenta la madera (descrito en el Capítulo 2) y las variables resistentes que se fijaron en el Capítulo 3.

Tanto el modelo analítico como el de elementos finitos, cuya estructura se describe en este capítulo, dan lugar a archivos de cálculos y resultados que son facilitados en soporte digital.

4.2 Dimensionamiento con ecuaciones analíticas y de normativa

En el Capítulo 2 se ha desarrollado la teoría (Johansen, 1949) en con la que se fundamentó el diseño de uniones con elementos clavija. En ella se deducen las ecuaciones que definen la capacidad de carga, basadas en el estudio del aplastamiento local en las piezas de madera y del fallo por flexión en la clavija, contemplándose cuatro posibles modos de fallo para el caso de cortadura doble y seis para cortadura simple. Las ecuaciones incluidas en la norma europea (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) siguen las mismas expresiones, con pequeñas variaciones respecto a la teoría original; en aspectos como la adición de un coeficiente de seguridad al valor de la carga ($F_{v,Rk}$), y de un factor de superposición por efecto soga ($F_{ax,Rk}$), siendo éste un valor característico de la capacidad de carga al arranque del medio de fijación habitual en clavos.

4.2.1 Planteamiento del problema

El conjunto de la unión no debe afectar a la estética de la estructura, lo que supone composiciones donde los elementos de fijación sean discretos y no condicionen significativamente las dimensiones de la viga. A la vez, la composición de la unión debe ser simple. Las disposiciones en cortadura doble evitan excentricidades en la unión y

permiten la conexión de los miembros a unir en casi cualquier ángulo (Apartado 3.2.1.1) , así como el trabajo con escuadrías de madera de menor tamaño, al distribuir las reacciones en dos planos de cortante, como se pudo apreciar en aplicaciones prácticas (Figura 3-77) y donde ya se han analizado las cargas que llegan desde las vigas (Apartado 3.9.2).

El uso de una única clavija facilita el comportamiento de ésta como articulación ante efectos dinámicos, otorga una elevada ductilidad a la unión y simplifica el diseño y el montaje reduciendo los errores en éste. También simplifica la sustitución en el caso de que se hayan producido daños sobre la estructura, permitiendo tratar la clavija como fusible mecánico si fuera necesario y la introducción de distintos tipos de refuerzo, como las fijaciones: que mejoran el efecto sogá, o los conectores en las intercaras de madera. Si atendemos a la resistencia al fuego, la introducción de una clavija (frente a un número más elevado de ellas) reduce la difusión térmica y la velocidad de carbonización (Apartado 2.7.10) y facilita ocultar la unión (Figura 2-57).

Por estos motivos, se parte del modelo de unión que se muestra en la Figura 4-1, con los parámetros descritos y justificados en el Capítulo 3, donde se ha expuesto:

- El tratamiento de uniones de madera estructural en cortadura doble simétrica, según el Apartado 3.2 "Elementos que mejoran el diseño en uniones con clavija".
- El uso de madera certificada, en concreto de calidades QL24h y GL24h, según el Apartado 3.4 "Caracterización de la madera objeto de estudio".
- Aceros comerciales, característicos en la construcción, utilizados para el elemento clavija, visto en el Apartado 3.5 "Caracterización de las clavijas objeto de estudio".
- Otros elementos de refuerzo a la clavija, como pueden ser el adhesivo, definido en el Apartado 3.6 "Refuerzo con adhesivos".

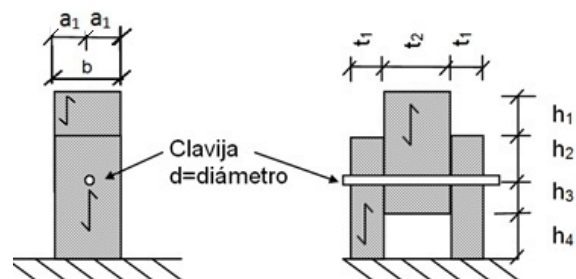


Figura 4-1. Dimensiones y geometría de las uniones.

4.2.2 Implementación secuencial de las ecuaciones de dimensionado analítico

Para el cálculo de la unión de un modo numérico, aparte de utilizar el método de los elementos finitos, se va a plantear un procedimiento de cálculo secuencial y paramétrico, a partir de las distintas variables que intervienen en la unión y de las bases de referencia normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). El objetivo es disponer de un procedimiento sistemático que permita obtener resultados variando distintos parámetros para posteriormente compararlos con los determinados mediante elementos finitos y los ensayos experimentales.

4.2.2.1 Datos de modelo de cálculo

Partimos de los datos expuestos en el Capítulo 3 y resumidos en la Tabla 4-1, que constituyen las variables de referencia, a partir de las cuales se añaden modificaciones para estudiar la sensibilidad de los resultados frente a los distintos factores.

Tabla 4-1. Datos de partida para el modelo de cálculo analítico de la unión.

Composición de nudo madera-madera con simetría y cortadura doble (Figura 4-1).	
• Clase resistente de madera según Tabla 3-1 de la norma [(DB SE M, 2009) Tabla E.3] y (UNE-EN 1194, 1999).	GL24 h, conífera
• Densidad característica.	$\rho_{g,k} = 380 \text{ kg/m}^3$
Geometría según escuadrías disponibles del fabricante, según Tabla 3-4.	
o Espesor de piezas laterales.	$t_1 = 80 \text{ mm}$
o Espesor de pieza central.	$t_2 = 160 \text{ mm}$
• Coeficiente parcial de seguridad para la resistencia de aplastamiento en la madera (Argüelles et al., 2003).	$\gamma_m = 1,3$
• Ángulo que forman las direcciones de la fibra de madera entre las dos piezas.	$\alpha = 0^\circ$
• Factor de deformación, según Tabla 2-22.	$k_{def} = 0,8$
Clavija.	
• Acero según la norma UNE-EN ISO 898-1 (Tabla 3-21).	calidad 5.6
• Diámetro de clavija.	$d = 10 \text{ mm}$
• Tensión de fluencia en el acero.	$f_{y,k} = 300 \text{ N/mm}^2$
• Tensión última del acero.	$f_{u,k} = 500 \text{ N/mm}^2$
• Coeficiente parcial de seguridad para el acero (Argüelles et al., 2003).	$\gamma_a = 1,1$
Estado de carga.	
• Clase de servicio 1 con madera laminada y duración de carga media, según Tabla 2-17.	$k_{mod} = 0,8$
Efecto sogá por elementos de refuerzo.	
• Pernos de varilla roscada con tuerca-arandela en sus extremos.	No
• Clavija pegada con adhesivo.	No
Fricción en zonas de contacto.	
• Fricción en la superficie madera-clavija.	$\mu_{m-a} = 0$
• Refuerzos en la superficie de las intercaras de madera por la superposición de elementos (placas clavo, conectores o similares).	No
• Fricción en la superficie de las intercaras de la madera.	$\mu_{m-m} = 0$

4.2.2.2 Resistencias de cálculo

4.2.2.2.1 En las piezas de madera laterales

La resistencia característica de aplastamiento en dirección paralela a la fibra para pernos en madera con diámetro no superior a 30 mm se extrae de la Tabla 2-15, según la Ecuación 2-66.

$$f_{h,0,k} = 0,82 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k = 0,82 \cdot (1 - 0,01 \cdot 10) \cdot 380 = 28,044 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ecuación 4-1

El coeficiente k_{90} , depende de la clase de madera para coníferas según la Ecuación 2-67.

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,35 + 0,015 \cdot 10 = 1,5$$

Ecuación 4-2

Con dicho factor de corrección, se obtiene la resistencia para direcciones distintas de la fibra (aunque en este modelo se toma $\alpha = 0^\circ$), según la Ecuación 2-65.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{28,044}{1,5 \cdot \sin^2 0^\circ + \cos^2 0^\circ} = 28,044 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ecuación 4-3

En la resistencia de cálculo al aplastamiento, según la Ecuación 2-71, se considera un factor de modificación $k_{\text{mod}} = 0,8$ (Tabla 2-17) y un coeficiente de seguridad parcial de $\gamma_m = 1,3$. El coeficiente de seguridad se toma independientemente del tipo de madera según (Argüelles et al., 2003). Si atendemos a la Tabla 2-16, extraída de normativa (DB SE M, 2009), se distingue entre un valor de 1,25 para madera laminada encolada (GL24h) y 1,3 la madera aserrada (QL24h), pero puesto que la diferencia es solo de un 5% (dejando la madera laminada encolada del lado de la seguridad) se fija $\gamma_m = 1,3$. Al aplicar los valores numéricos, se obtiene el resultado desarrollado en la Ecuación 4-4.

$$f_{h1,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{h,k}}{\gamma_m} = 0,8 \frac{28,044}{1,3} = 17,26 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ecuación 4-4

4.2.2.2 En la pieza de madera central

La resistencia característica de aplastamiento para la pieza central de madera será igual, dado que se consideran materiales análogos en las dos piezas de madera. La relación de aplastamiento viene dada por la Ecuación 2-17.

$$\beta = \frac{f_{h2,d}}{f_{h1,d}} = \frac{17,26}{17,26} = 1$$

Ecuación 4-5

4.2.2.3 En la clavija

El cálculo del momento plástico de la clavija, para pernos y pasadores, para uniones en madera con diámetro no superior a 30 mm, se realiza empleando la Tabla 2-18, de la que se extrae la Ecuación 4-6

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 500 \cdot 10^{2,6} = 59.719,08 \text{N} \cdot \text{mm}$$

Ecuación 4-6

El momento plástico de diseño se obtiene a partir del característico, mediante la Ecuación 2-73 aplicada al modelo expuesto según la Ecuación 4-7.

$$M_{y,d} = \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_a} = \frac{59.720}{1,1} = 54.287,34 \text{N} \cdot \text{mm}$$

Ecuación 4-7

4.2.2.3 Cálculo de la capacidad de carga

Como se ha indicado previamente, en uniones madera-madera con clavija metálica en cortadura doble, existen cuatro posibles modos de fallo. Cada uno de ellos se alcanza para un valor de la carga definido por una ecuación en la que intervienen variables de las resistencias de los materiales y geométricas. La capacidad de carga de la unión corresponderá al menor de todos estos valores. A continuación se indican las ecuaciones que definen las cargas para cada uno de los modos de fallo.

Modo 1) Aplastamiento de la pieza de espesor t_1 , según la Ecuación 2-56.

$$F_{v,Rk1} = f_{h1,d} \cdot t_1 \cdot d = 17,258 \cdot 80 \cdot 10 = 13.806,28 \text{N}$$

Ecuación 4-8

Modo 2) Aplastamiento de la pieza de espesor t_2 según la Ecuación 2-57, desarrollada en la Ecuación 4-9.

$$F_{v,Rk2} = 0,5 \cdot f_{h2,d} \cdot t_2 \cdot d = 0,5 \cdot 17,258 \cdot 160 \cdot 10 = 13.806,28\text{N}$$

Ecuación 4-9

Modo 3) Aplastamiento local en las piezas de madera más fallo debido a flexión en el centro de la clavija, según la Ecuación 2-58.

$$F_{v,Rk3} = 1,05 \cdot \frac{f_{h1,d} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4,5 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rd}}{f_{h1,d} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] =$$

$$1,05 \cdot \frac{17,258 \cdot 80 \cdot 10}{2 + 1} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot 1 \cdot (1 + 1) + \frac{4,5 \cdot 1 \cdot (2 + 1) \cdot 54,290}{f_{h1,k} \cdot 10 \cdot 80^2}} - \beta \right] = 5.520,23\text{N}$$

Ecuación 4-10

Modo 4) Aplastamiento local en las piezas de madera más fallo por flexión en el centro y extremos de la clavija, según la Ecuación 2-59.

$$F_{v,Rk4} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rd} \cdot f_{h1,d} \cdot d} = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1 + 1}} \cdot \sqrt{2 \cdot 54,290 \cdot 17,258 \cdot 10} = 4.978,01\text{N}$$

Ecuación 4-11

En el caso concreto estudiado, se puede ver que el valor mínimo se da en el modo de fallo 4. El valor de $F_{v,Rk} = 4.978\text{N}$ se debe multiplicar por dos para obtener la magnitud que lleva al fallo del nudo (con un valor de $2 \cdot F_{v,Rk} = 9.956\text{N}$), dada la aplicación de la condición de simetría empleada en el modelo.

4.2.2.4 Elementos de refuerzo

En las siguientes líneas se indica el incremento de la capacidad de carga de la unión que implica el empleo de diversos métodos de refuerzo.

Efecto sogá por el empleo de tuerca y arandela en los extremos de la clavija.

El empleo de pernos con tuerca-arandela en sus extremos supone que se debe sumar una componente del 25 % como máximo a la capacidad de carga de la unión, debido a la aparición de una fuerza axial (F_{axil}) relacionada con la capacidad de carga a la extracción del elemento de fijación ($F_{ax,Rk}$), según se indica en el Apartado 2.7.6.1.

Se considera que la resistencia de arranque en cabeza se determina según la Ecuación 2-76, desarrollada en este caso en la Ecuación 4-12,

$$f_{ax,k} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 380^2 = 7,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ecuación 4-12

y que la resistencia de punzonamiento en la cabeza del clavo se determina según la Ecuación 2-77,

$$f_{head,k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 = 70 \cdot 10^{-6} \cdot 380^2 = 0,027 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ecuación 4-13

La capacidad de carga a la extracción del elemento de fijación ($F_{ax,Rk}$) se calcula según la Ecuación 4-14 y se aplica para el sumando del efecto sogá definido a partir de clavos de fuste no liso, como describe la norma (Eurocódigo 5.

UNE EN 1995, 2010). El fuste se considera roscado y continuo a lo largo de toda la longitud de la clavija, especialmente para las uniones de gran grosor, donde puede haber limitaciones en el empleo de tornillos con fuste liso tan largos (hay que recordar que en el modelo el espesor de la unión es de $2 \cdot t_1 + t_2 = 320$ mm), junto con la necesidad de fijar tuerca (y arandela) en ambos extremos de la clavija.

Para definir el diámetro de “cabeza de clavo” (d_h), se asume que es igual al diámetro exterior de la arandela cuando ésta se intercala entre la madera y la cabeza del clavo o del perno. Por recomendaciones de la misma norma, el diámetro de arandela debe ser tres veces el diámetro nominal de la espiga (d), y puede ser determinado a partir del modelo ($d_h = 3 \cdot d = 3 \cdot 10 = 30$ mm) para relacionarse con la resistencia al hundimiento de la cabeza del clavo ($f_{head,k}$), siempre según norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009).

A efectos de un posible cálculo al arranque se debe fijar la longitud de penetración en la pieza de punta (t_{pen}), que se toma igual al ancho de la pieza de madera más desfavorable (en este caso t_1), resultando una longitud $t_{pen} = 80$ mm. Pero el cálculo de la carga de extracción por arranque carece de sentido en esta configuración de unión en cortadura doble, porque ambos extremos de la clavija están fijados con tuerca-arandela y, por lo tanto, solo están expuestos a hundimiento.

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} = 7,6 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 80 = 6,08N \\ f_{head,k} \cdot d^2_h = 0,027 \cdot 30^2 = 24,3N \end{cases}$$

Ecuación 4-14

Así pues, al valor de la capacidad de carga calculado previamente, $F_{v,Rk} = 4.978N$, se le debe añadir $F_{ax,Rk} \cdot 0,25 = 6,1N$, debido al efecto sogá derivado del hundimiento en el extremo exterior, siempre según las ecuaciones analíticas, pasando a ser $F_{v,Rk} = 4.984,1N$.

Efecto sogá por empleo de adhesivos epoxi en la clavija.

Se puede inducir el esfuerzo axil en la clavija derivado de la adherencia del adhesivo, según se vio en el Apartado 3.6.5.1.1 en la Ecuación 3-4 descrita por (Riberholt, 1988), considerando en el modelo que la longitud de clavija encolada (l_g) sería una función del espesor de las piezas de madera laterales (t_1). Sobre este valor habría que corregir las zonas donde el adhesivo se despegas tras la formación de las rótulas plásticas, y por lo tanto debe ser descontado el ancho en que se propague la plastificación de la madera (b_1), para el caso en que $l_g < 200$ mm. Considerando todo lo anterior, la fuerza axil en el perno generada por la presencia del adhesivo se calcula con la Ecuación 4-15.

$$F_{ax,k_Adhesivo} = f_{wl} \cdot \rho_k \cdot d \cdot l_g = 0,037 \cdot 380 \cdot 10 \cdot 56 = 7.873,6N$$

Ecuación 4-15

Siendo:

- f_{wl} parámetro de resistencia. De valor $0,037$ N/mm² para adhesivos frágiles, como el fenol-resorcinol y las resinas epoxi.
- l_g longitud encolada, en mm. En el inicio de la carga sobre la unión se corresponde a todo el ancho, pero con la formación de la rótula plástica en la clavija se corrige por el lado de la seguridad según lo indicado en la Ecuación 4-16.

$$l_g = t_1 - b_1 = t_1 - \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot M_{vd}}{f_{h1,k} \cdot d}} = 80mm - 24mm = 56mm$$

Ecuación 4-16

Refuerzo mediante el empleo de conectores.

Otro elemento considerado para reforzar las uniones clavija son los conectores. En el estudio se ha empleado un modelo de tipo C1 de doble dentado con los menores tamaños posibles, con la intención de mantener el foco de la investigación en el refuerzo de la clavija, más que en otro tipo de fijaciones. De esta forma, al sumar las capacidades de carga de clavija y conector, la unión no se verá excesivamente afectada por la mayor rigidez del segundo. Teniendo en cuenta que la geometría elegida tiene un diámetro de conector dentado ($d_c = 45 \text{ mm}$), altura de dientes ($h_e = 5 \text{ mm}$) y teniendo en cuenta el diámetro de clavija ($d = 10 \text{ mm}$), se aplica la Ecuación 4-17.

$$F_{v,Rk,Conec} = 25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot d_c^{1,5} = 25 \cdot 0,53 \cdot 1 \cdot 1,09 \cdot 45^{1,5} = 4.360 \text{ N}$$

Ecuación 4-17

Siendo k_1 , k_2 y k_3 , coeficientes que dependen de las variables geométricas y de la densidad de la carga, y que se calculan con las ecuaciones siguientes:

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \frac{t_1}{3 \cdot h_e} = 0,53 \\ \frac{t_2}{5 \cdot h_e} = 0,64 \end{array} \right\} = 0,53$$

Ecuación 4-18

Siendo:

- t_1 y t_2 espesores de las piezas de madera.
- h_e altura de dientes.

El factor k_2 depende de la distancia a la testa, según la Ecuación 3-14.

$$k_2 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \frac{a_{3,t}}{1,5 \cdot d_c} = 1,19 \end{array} \right\} = 1$$

Ecuación 4-19

Siendo $a_{3,t}$ determinado por la Ecuación 3-15 y el diámetro exterior del conector ($d_c = 45 \text{ mm}$).

$$a_{3,t} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot d_c = 67,5 \\ 7 \cdot d = 70 \\ 80 \text{ mm} \end{array} \right\} = 80$$

Ecuación 4-20

El factor k_3 depende de la densidad de la madera, según la Ecuación 3-16.

$$k_3 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \\ \frac{\rho_k}{350} = 1,09 \end{array} \right\} = 1,09$$

Ecuación 4-21

4.2.2.5 Deslizamiento de la unión

Para calcular el deslizamiento de la unión, previamente se debe definir el módulo de deslizamiento (K_{ser}), que toma el siguiente valor para pernos sin holgura (según la Tabla 2-23), tal y como se describe en la Ecuación 4-22,

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \cdot \frac{d}{23} = 380^{1,5} \cdot \frac{10}{23} = 3.220,68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ecuación 4-22

Con ello se determina el deslizamiento instantáneo, teniendo en cuenta que se trata de una unión en disposición simétrica y, por lo tanto, tiene dos planos cortantes, según la Ecuación 4-23.

$$u_{ins} = \frac{2 \cdot F_{v,Rk}}{K_{ser}} = \frac{2 \cdot 4.978}{3.220,68} = \frac{9.956}{3.220,68} = 3,09\text{mm}$$

Ecuación 4-23

El deslizamiento final se determina según la Ecuación 4-24, teniendo en cuenta los factores de deformación ($k_{def,i}$) que corresponden a piezas lateral ($i = 1$) y central ($i = 2$) de madera. Estos coeficientes deben ser iguales en madera de la misma clase resistente y de valor 0,6 (según la Tabla 2-22) para este caso.

$$u_{final} = u_{holgura} + u_{ins} \cdot \sqrt{(1+k_{def,1}) \cdot (1+k_{def,2})} = 0,3 + 3,09 \cdot \sqrt{(1+0,6)^2} = 5,25\text{mm}$$

Ecuación 4-24

Deslizamiento en caso de la integración de conectores.

Al plantear la integración de conectores dentados de doble cara en las intercaras de madera, la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) establece que se puede calcular el módulo de deslizamiento (K_{ser}) según la Ecuación 3-17, cuyos resultados se muestran para el modelo en la Ecuación 4-25.

$$K_{ser} = 1,5 \cdot \rho_m \cdot \frac{d_c}{4} = 1,5 \cdot 380 \cdot \frac{45}{4} = 6.412 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Ecuación 4-25

4.2.3 Herramienta de apoyo al cálculo numérico. Modelo de hoja de trabajo Mathcad®

La secuencia de cálculo mostrada en el apartado anterior se ha integrado en una aplicación informática, Mathcad®, para automatizar el cálculo de las ecuaciones mostradas. Se trata de un entorno de documentación técnica, con prestaciones de cálculo numérico y simbólico, que permite explorar problemas, formular ideas, analizar datos, modelar y chequear escenarios, determinar la mejor solución y, así mismo, documentar, presentar y comunicar los resultados. Se encuentra organizado como una hoja de trabajo, en la que las ecuaciones y expresiones se muestran gráficamente, no como simple texto.

Ha sido elegida esta plataforma porque despliega los resultados en forma de hojas de cálculo que se pueden presentar de forma análoga a como se haría en papel, frente a los programas que exponen resultados terminales. Es muy visual, por lo que ha permitido el desarrollo de plantillas de funciones, en las que sólo es necesario asignar las variables de entrada (resaltadas en amarillo en la Figura 4-2), para obtener las salidas de interés (remarcadas en verde), y desarrollar las gráficas de funciones relacionadas.

DEFINICIÓN DE LOS VALORES INICIALES.

Unidades en S.I.

PARA VARIACION DE d

Densidad de madera
 Densidad característica [71] p 109 DBSE M

Clase de servicio 1
 Media: madera maciza $K_{mod} := 0.8$ $\gamma_m := 1.3$
 Media: madera laminada $K_{mod} := 0.8$ $\gamma_m := 1.25$

Factor de modificación según la clase de servicio [71] p 5 y p 6 DBSE M Tablas 2.3 y 2.4

Contera GL24 $\rho_k := 380$

Pieza lateral t1 (mm) $t_1 := 80$ $\rho_1 := \rho_k$

Pieza central t2 (mm) $t_2 := 160$ $\rho_2 := 1\rho_k$ $\rho_2 := 380$

Perno d (mm) $d := 10$
 $d := 8, 10, \dots, 20$

Resistencia a aplastamiento fibra paralela (N/mm2) Pemos diam <30mm
 $f_{h0k1}(d) := 0.082(1 - 0.01 \cdot d)\rho_1$

Resistencia a aplastamiento fibra paralela (N/mm2) Pemos diam <30mm
 $f_{h0k2}(d) := 0.082(1 - 0.01 \cdot d)\rho_2$

Resistencia a tracción característica para el acero (N/mm2) $f_{yk} := 300$
 $f_{uk} := 500$

Factor de seguridad a aplastamiento Tabla 2.3 de DBSE M: $\gamma_{m1} := \gamma_m$ $\gamma_{m1} = 1.3$

Factor de seguridad a aplastamiento: $\gamma_{m2} := \gamma_m$ $\alpha_2 := 0$

Factor de seguridad del perno metálico: $\gamma_{Ma} := 1.1$

Giro en la fibra respecto a la cara exterior (rad) $\alpha_1 := 0$

Giro en la fibra respecto a la cara exterior (rad) $\alpha_2 := \frac{\pi}{2} \cdot \frac{0}{90}$

Factor de madera

k90 dependiendo para contera $k_{1,90}(d) := 1.35 + 0.015 \cdot d$

k90 dependiendo para frondosa $kk_{1,90}(d) := 0.90 + 0.015 \cdot d$

k90 dependiendo para contera $k_{2,90}(d) := 1.35 + 0.015 \cdot d$

k90 dependiendo para frondosa $kk_{2,90}(d) := 0.90 + 0.015 \cdot d$

Momento plástico en pernos N*mm (Argüelles)
 $M_{yk,Argü}(d) := 0.8 \cdot f_{uk} \cdot \frac{d^3}{6}$

Momento plástico en pernos N*mm (Argüelles)
 $M_{yk}(d) := 0.3 \cdot f_{yk} \cdot d^{2.6}$

Resistencia a aplastamiento piezas (N/mm2) [108] p 13 si se enciela el agujero multiplicar por 1,2

Resistencia a aplastamiento piezas (N/mm2)

$f_{h01k}(d) := \frac{f_{h0k1}(d)}{k_{1,90}(d) \cdot \sin(\alpha_1)^2 + \cos(\alpha_1)^2}$

$f_{h02k}(d) := \frac{f_{h0k2}(d)}{k_{2,90}(d) \cdot \sin(\alpha_2)^2 + \cos(\alpha_2)^2}$

$f_{h10k}(d) := K_{mod} \cdot \frac{f_{h01k}(d)}{\gamma_{m1}}$

$f_{h20k}(d) := K_{mod} \cdot \frac{f_{h02k}(d)}{\gamma_{m2}}$

Momento de cálculo $M_{yd}(d) := \frac{M_{yk}(d)}{\gamma_{Ma}}$

Coefficiente de resistencia a aplastamiento $\beta(d) := \frac{f_{h10k}(d)}{f_{h20k}(d)}$

$K_{mod} = 0.62$

$f_{h0k1}(d) =$	$k_{1,90}(d) =$	$f_{h01k}(d) =$	$f_{h10k}(d) =$	$\beta(d) =$	$f_{h0k2}(d) =$	$k_{2,90}(d) =$	$f_{h20k}(d) =$	$M_{yk}(d) =$	$M_{yd}(d) =$
28.67	1.47	28.67	17.64	1	28.67	1.47	17.64	33429.14	30390.13
28.04	1.5	28.04	17.26	1	28.04	1.5	17.26	59716.08	54287.34
27.42	1.53	27.42	16.87	1	27.42	1.53	16.87	95931.78	87210.71
26.8	1.56	26.8	16.49	1	26.8	1.56	16.49	143226.75	130206.14
26.17	1.59	26.17	16.11	1	26.17	1.59	16.11	202676.42	184251.29
25.55	1.62	25.55	15.72	1	25.55	1.62	15.72	275295.92	250269.02
24.93	1.65	24.93	15.34	1	24.93	1.65	15.34	362050.58	329136.89

1.- Plástific. madera lateral 1 (N).

$F_{VRk1}(d) := f_{h10k}(d) \cdot t_1 \cdot d$

$F_{VRk1}(d) =$

11290.47
13806.28
16199.36
18469.73
20617.37
22642.29
24544.49

3.- Plástificación simultánea en madera doblándose el perno en el medio (N).

Segun Argüelles [108] p 262

$F_{VRk3arg}(d) := \frac{f_{h10k}(d) \cdot d \cdot t_1}{2 + \beta(d)} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta(d) \cdot (1 + \beta(d)) + \frac{4 \cdot \beta(d) \cdot (2 + \beta(d)) M_{yd}(d)}{f_{h10k}(d) \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta(d) \right]$

Segun p 69 [73] ECS

$F_{VRk3EC}(d) := \frac{1.05 f_{h10k}(d) \cdot d \cdot t_1}{2 + \beta(d)} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta(d) \cdot (1 + \beta(d)) + \frac{4 \cdot \beta(d) \cdot (2 + \beta(d)) M_{yd}(d)}{f_{h10k}(d) \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta(d) \right] + \frac{F_{axrk}(d)}{4}$

Segun p 45 [71] DBSE M

$F_{VRk3SEM}(d) := \frac{1.05 f_{h10k}(d) \cdot d \cdot t_1}{2 + \beta(d)} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta(d) \cdot (1 + \beta(d)) + \frac{4 \cdot \beta(d) \cdot (2 + \beta(d)) M_{yd}(d)}{f_{h10k}(d) \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta(d) \right]$

$F_{VRk3SEM}(d) =$

4340.95
5520.23
6761.83
8073.26
9459.94
10925.53
12472.05

2.- Plástific. madera central 2 (N).

$F_{VRk2}(d) := 0.5 f_{h10k}(d) \cdot t_2 \cdot d \cdot \beta(d)$

$F_{VRk2}(d) =$

11290.47
13806.28
16199.36
18469.73
20617.37
22642.29
24544.49

4.- Plástificación simultánea en madera doblándose en perno en medio y lados (N).

Segun Argüelles [108] p 262 sin coefi OJO modificado con p 685 para normalizar con ECS

$F_{VRk4arg}(d) := \sqrt{\frac{2 \cdot \beta(d)}{1 + \beta(d)}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{yd}(d) \cdot f_{h10k}(d) \cdot d}$

Segun p 69 [73] ECS

$F_{VRk4EC}(d) := 1.15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta(d)}{1 + \beta(d)}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{yd}(d) \cdot f_{h10k}(d) \cdot d} + \frac{F_{axrk}(d)}{4}$

Segun p 45 [71] DBSE M

$F_{VRk4SEM}(d) := 1.15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta(d)}{1 + \beta(d)}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{yd}(d) \cdot f_{h10k}(d) \cdot d}$

$F_{VRk4SEM}(d) =$

3368.14
4978.01
6834.42
8916.9
11207.01
13687.74
16343.05

$2 \cdot F_{VRk4SEM}(d) =$

6736.28
9956.01
13668.84
17833.8
22414.02
27375.47
32686.1

Carga de fallo en pieza $F_{VRkmin}(d) := \min(F_{VRk1}(d), F_{VRk2}(d), F_{VRk3SEM}(d), F_{VRk4SEM}(d))$

Figura 4-2. Hoja de trabajo de Mathcad®, con la implementación de las ecuaciones para el cálculo de uniones tipo clavija.

Para hacer el cálculo de los distintos casos, inicialmente se implementan las ecuaciones en Mathcad®, como recoge el Anexo A y el archivo *Anexo A Hoja de trabajo para cálculo de uniones con clavijaV4_11.xmcd* facilitado en soporte digital. Mediante él, es rápida la modificación de variables geométricas, como los espesores de madera (t1, t2) y el diámetro de clavija (d), dando lugar a las gráficas que se adjuntan en el Capítulo 6 “Resultados”. Se calculan los valores obtenidos de las ecuaciones de Johansen, donde Fv,Rk es la capacidad de carga en el plano cortante de la unión. Los valores de propiedades mecánicas de la madera se reflejan en la Tabla 3-3 y en la Tabla 3-6. Estos valores

darán lugar a la capacidad de carga de cálculo, no debiendo ser superados bajo criterios tomados a partir de la teoría del rendimiento (Johansen, 1949) y reconocidos en distintas referencias (Argüelles, 1993), (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009). La hoja de trabajo también facilita la comparación entre las ecuaciones base y las ampliaciones a las mismas, como la aplicación de coeficientes y sumandos por efecto sogá o la conexión con los resultados de los ensayos experimentales y otros procedimientos de cálculo alternativos.

Entre las ventajas de este *software* está el trabajo con funciones y su conectividad con otras fuentes de datos, como hojas de cálculo (con las que se integrarán los resultados obtenidos tras la exportación de los datos resultantes de los ensayos experimentales), lo que permite evaluar, de una forma ágil, la variación de parámetros, como la mejora de la capacidad de carga en función de las variables de entrada del modelo analítico (por ejemplo, el diámetro de la clavija que se muestra en la Figura 4-3), que serán analizados en capítulos posteriores.

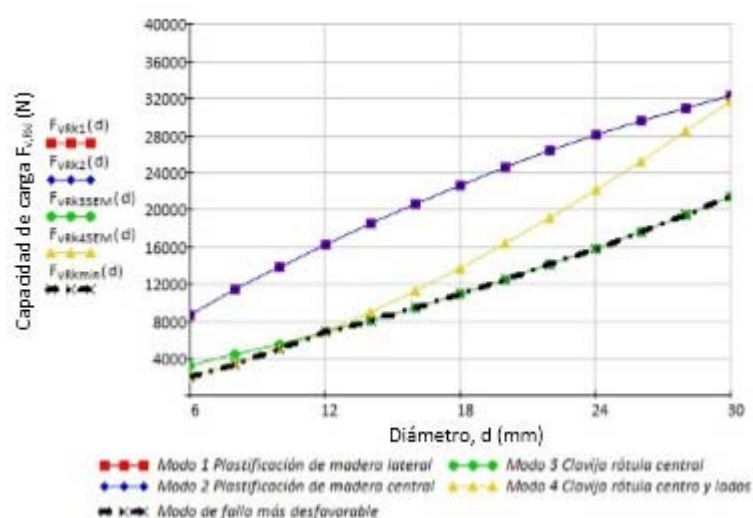


Figura 4-3. Capacidad de carga para la unión en los cuatro modos de fallo ante variación de diámetro de clavija.

4.2.4 Extensión del desarrollo analítico a hojas y libros de cálculo

La hoja de trabajo mostrada anteriormente (Figura 4-2) permite ver las ecuaciones y los resultados cuando se modifica alguna de sus variables, pero presenta limitaciones si se quiere condensar más información y trabajar con resultados y datos que se puedan relacionar con distintas tablas. Esto ha dado lugar a otra herramienta de trabajo (desarrollada en hojas de cálculo), donde las ecuaciones quedan anidadas dentro de celdas y cada línea representa un modelo o tipo de unión. Con ello se logran varios beneficios:

- Se dispone de un sistema redundante frente a fallos, que permite comprobar los resultados de salida de los archivos de Mathcad®.
- Se pueden reflejar de forma simultánea los datos de distintos modelos de unión y sus características de una forma más estructurada.
- Permite relacionar, en cada modelo de unión, hojas destinadas a otros fines (como los ensayos o la información relacionada con éstos) con datos de referencia comunes (para el mismo tipo de unión), haciendo uso de la composición en un solo archivo a modo de libro de cálculo.
- Como consecuencia de lo anterior, se mantiene una estructura de tablas que permite la vinculación con una base de datos de tipo relacional (Figura 4-4), donde los resultados se pueden componer de una forma mucho más flexible para el tratamiento de consultas y la generación de informes de resultados. Este aspecto se muestra más adelante en el Apartado 5.3.4.2.2.

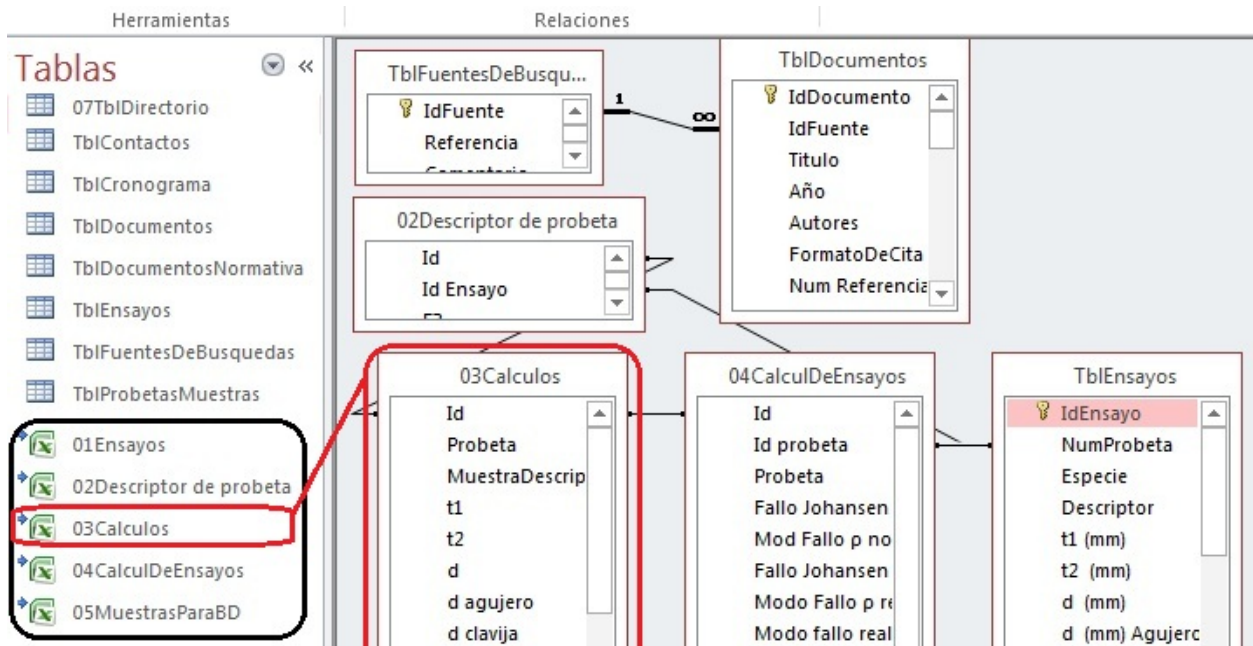


Figura 4-4. Vinculación de las hojas de cálculo con otras tablas.

El desarrollo de las hojas y el libro de cálculo se ha hecho con MS Excel®, aunque se podría exportar a cualquier paquete ofimático semejante. Dado el tamaño y la cantidad de información, se facilita en soporte digital como *Anexo C Libros de cálculo analítico.xls*. La hoja etiquetada como “Cálculos” tiene la información con las ecuaciones anidadas y sus resultados, pero este anexo también contiene hojas con información sobre las probetas, los ensayos (que se desarrollan en el Capítulo 5) y su trazabilidad, por ejemplo, las condiciones ambientales o las variables de cálculo para la ejecución de los propios ensayos. Los resultados y gráficos sintetizados de este anexo se desarrollan en el Capítulo 6.

4.3 Aproximación a los modelos de elementos finitos

La mayor parte de las estructuras de ingeniería son de naturaleza continua, y el estudio riguroso de su comportamiento precisa de la integración de las ecuaciones diferenciales que lo definen. Éstas expresan el equilibrio entre las diferentes variables que definen el comportamiento en el dominio. Sin embargo, esta operación es muchas veces muy complicada e incluso, en ocasiones, si las ecuaciones diferenciales son muy difíciles, debido a la geometría de la estructura, las características de los materiales, las condiciones de contorno en los apoyos o el tipo de cargas, directamente no existen procedimientos matemáticos para realizarla. Tal es el caso del presente trabajo, en el que las dificultades vienen dadas por la discontinuidad en la variación de geometría que supone la clavija y por el comportamiento no isótropo de la madera.

En consecuencia, como la resolución exacta de las ecuaciones diferenciales se hace imposible, es necesario recurrir a métodos simplificados que permitan dar un resultado aproximado. El método de los elementos finitos (MEF) se basa en discretizar el sistema estructural continuo en porciones que no se intersecan entre sí (Figura 4-5). Estas pequeñas partes del modelo global, llamadas elementos finitos, están interconectadas a través de un determinado número de puntos, llamados nodos (Argüelles R. , 1993). En un estudio estructural mediante elementos finitos, las variables de cálculo son los desplazamientos de cada uno de los nodos bajo la aplicación de la carga externa, y a partir de ellos se determinan los demás resultados: deformaciones y tensiones dentro de cada elemento (Chen et al., 2003).

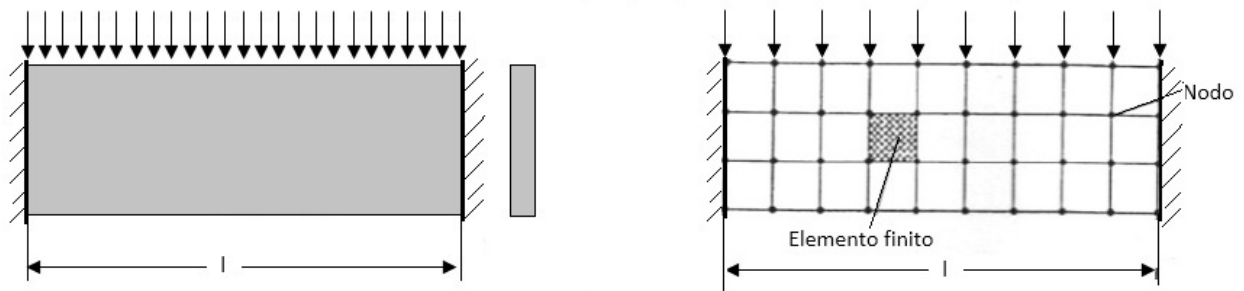


Figura 4-5. Sistema continuo de laja plana sometida a carga uniforme discretizada por elementos finitos.

El desarrollo de un modelo de elementos finitos supone muchas simplificaciones y aproximaciones del caso real. Todas ellas deben diseñarse de modo que la pérdida de exactitud sea la menor posible. La ventaja que tiene su empleo, en un caso de estudio como el que nos ocupa, donde hay tantas posibles combinaciones del modelo real por variación de materiales, cargas y geometrías, es que el modelo puede rehacerse con pequeños cambios y procederse de nuevo a su cálculo. Esta opción resulta mucho más cara en los procedimientos experimentales.

El uso de este método se extendió rápidamente a partir de 1960, con la aparición de ordenadores que permitieron resolver rápidamente grandes sistemas de ecuaciones lineales. El grado de precisión de los resultados aumenta con el número de elementos en que se divide la estructura, pero esto exige resolver sistemas lineales con mayor número de ecuaciones. El método posee gran versatilidad, aplicándose fácilmente a cualquier estructura por complicadas que sean su geometría o las condiciones de contorno en los apoyos o de carga (Argüelles, 1993).

Existen muchos programas informáticos que aplican el MEF a la resolución de problemas mecánicos, térmicos, de fluidos, electromagnéticos, etc. (como Abaqus®, ANSYS®, Cosmos® o Nastran®), y otros que cuentan con módulos de esta metodología (como CATIA®, SolidWorks® o Robot Structural®). Cada vez disponen de interfaces gráficas más completas e intuitivas que facilitan la definición del modelo (geometría, malla de elementos finitos, apoyos y cargas) y la visualización de todo tipo de resultados, lo que motiva a plantear modelos que puedan ser ampliados y mejorados, a la vez que se identifican carencias en los anteriores. Asimismo, cuentan con una extensa librería de elementos finitos adaptados a sólidos tridimensionales, de revolución, láminas, vigas, etc., que describen diferentes comportamientos (elástico, lineal, plástico, etc.).

Al valorar este tipo de herramientas, es posible identificar una serie de ventajas ampliamente reconocidas:

1. El MEF permite identificar fallos debidos a tensiones desconocidas o evidenciar los problemas de distribución de las mismas.
2. Es interesante frente al método de ensayo y error con procedimientos experimentales, porque se reducen de manera significativa los costes.
3. El cálculo mediante técnicas de MEF permite gran número de variaciones en su resolución; en ocasiones, inabordable mediante el cálculo manual.
4. Se reducen los errores de operación y montaje a límites despreciables.

En cualquier caso, no debemos olvidar también las limitaciones (Wikipedia MEF, 2015):

1. El MEF facilita una solución, pero con un margen de error que es desconocido generalmente. Aunque hay algunos tipos de problemas que permiten acotar el error de la solución, a causa a los distintos tipos de aproximaciones que usa el método, en general los problemas dependientes de tiempo no lineales no permiten conocer ese el error.

2. En el MEF, gran parte de las aplicaciones requieren bastante tiempo para ajustar los detalles de la geometría, y pueden tener problemas por el mal condicionamiento de las mallas, un grado distinto de convergencia entre la solución aproximada y la exacta en diferentes puntos, etc. Las simulaciones requieren del uso de:
 - Numerosas pruebas y ensayos.
 - Planteamientos con geometrías e hipótesis simplificadas.
 - Casos menos generales que el que finalmente pretende simularse, antes de empezar a lograr resultados satisfactorios.

4.3.1 Estructura del método de elementos finitos

Una vez que se han introducido unas nociones básicas del MEF e indicadas las ventajas e inconvenientes de su empleo, se van a exponer más detalladamente los conceptos básicos de esta metodología. Como ya se adelantó, el objetivo del método es obtener una solución numérica aproximada de las variables mecánicas que existen sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo), resolviendo las ecuaciones diferenciales que rigen su comportamiento en cada uno de estos campos. Para ello, el dominio se divide en un número elevado de subdominios, no intersectantes entre sí, denominados “elementos finitos”. El conjunto de elementos finitos también denominada discretización.

Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos o nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos, considerando sus relaciones de adyacencia, conforma lo que se denomina la malla del modelo.

En problemas de carácter mecánico, las variables que utiliza el MEF son las variables cinemáticas de los nodos. Las magnitudes continuas que caracterizan el comportamiento mecánico de cada elemento finito (por ejemplo: en un caso de estática, los campos de desplazamientos, deformaciones y tensiones) se expresan en función de los desplazamientos de los nodos de dicho elemento, mediante funciones de interpolación o de forma (que dependen del número de nodos del elemento) y de las leyes de comportamiento del material. La exigencia de equilibrio del elemento lleva a una relación entre las fuerzas que actúan sobre los nodos y los desplazamientos de los mismos, a través de coeficientes, que se agrupan en la denominada matriz de rigidez del elemento. Las ecuaciones que se establecen parten de la aplicación del teorema de los trabajos virtuales. Entre otras muchas operaciones matemáticas a realizar, es necesario proceder a una integración sobre el elemento, que normalmente se lleva a cabo de manera numérica mediante la cuadratura de Gauss, sumando los valores del integrando en ciertos puntos de integración corregidos con determinados pesos.

A las ecuaciones que se establecen dentro de cada elemento se suman aquellas que se plantean para toda la estructura. Las condiciones de equilibrio y de compatibilidad de desplazamientos en los nodos se establecen mediante el proceso de ensamblaje de las matrices de rigidez de los distintos elementos, dando lugar a un sistema algebraico de ecuaciones lineales para los desplazamientos libres de los nodos. La resolución de este sistema de ecuaciones permite hallar los desplazamientos de todos los nodos de la estructura. A partir de ellos, utilizando leyes de interpolación, se obtienen los campos de desplazamientos, deformaciones y tensiones en todos los puntos de la estructura.

La estructura de trabajo habitual en los programas MEF comerciales se divide en varias fases independientes, cada una con una función distinta. Las tres más importantes y que siempre existen son las siguientes:

- I. Preproceso. Durante esta fase se procede a la definición de geometría, generación de la malla, establecimiento de las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales. En ocasiones,

se realizan operaciones de regularización de la malla y acondicionamiento, para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.

- II. Proceso. En un problema lineal independiente del tiempo se generan un conjunto de ecuaciones e incógnitas, que puede ser abordadas por algoritmos para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no-lineal, o dependiente del tiempo, el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de ecuaciones e incógnitas, que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.
- III. Pos-proceso. El cálculo proporciona los valores de un conjunto de variables en los nodos de la malla definida en el pre-proceso. A partir de ellos, en el pos-proceso se calculan sus valores y los de otras magnitudes en todos los puntos de los elementos. En ocasiones, se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

En este trabajo se ha optado por afrontar el problema con dos modelos distintos y diferentes niveles de complejidad:

- 1) Una primera aproximación con un grado de simplificación, que permita diseñar todo el algoritmo de cálculo y ratificarlo de forma directa con las ecuaciones de la Resistencia de Materiales. Se ha optado por una programación en Matlab®, porque es un entorno de desarrollo integrado, especializado en matrices, que no requiere compilación y se ejecuta de forma secuencial, por lo que permite ver en todo momento el estado del algoritmo de cálculo.
- 2) Un modelo en tres dimensiones más completo, que modela la clavija de forma cilíndrica. Se hace uso de un paquete de elementos finitos comercial (Abaqus®) por su fiabilidad, precisión y el empleo de este software en otros trabajos de investigación sobre madera realizados por diversos investigadores (Serrano, 2001 A), (André, 2007), (Stehn & Börjes, 2004) y (Guan & Rodd, 2001), lo que facilita las hipótesis de diseño.

De las dos estrategias, será en la última donde trataremos los datos más detalladamente, dado que es de esperar mayor grado de aproximación a los sistemas reales.

4.3.2 Aproximación al Método de los Elementos Finitos. Análisis del algoritmo de cálculo

Los programas comerciales de elementos finitos se han convertido en auténticas “cajas negras”, que no permiten seguir el desarrollo del proceso de cálculo, limitándose la acción a introducir las variables de entrada y extraer el resultado de las operaciones, siendo por tanto muy limitada la capacidad de interpretación en pasos intermedios (Domínguez et al., 2013). Por ello, en este apartado se presenta un ejemplo sencillo, que presenta similitud con una unión de tipo clavija, con objeto de exponer con detalle los pasos que se realizan en un cálculo mediante elementos finitos.

En los trabajos previos realizados para la obtención de la suficiencia investigadora, se implementaron modelos de análisis por elementos finitos más simples, con objeto de definir una estructura de desarrollo. Esta aproximación muestra un algoritmo para la resolución de problemas de forma secuencial (de modo que se podía interrumpir el proceso en cualquier punto del cálculo).

Se desarrolló un diagrama de flujo completo, con elementos finitos de Turner de tipo triangular (donde cada nodo tiene dos grados de libertad de traslación, para deformación plana), tratando de asumir la simplificación de laja de madera de espesor igual al diámetro de la clavija expuesta en el Apartado 2.7.3, que recoge también hipótesis de las ecuaciones analíticas (Figura 4-6).

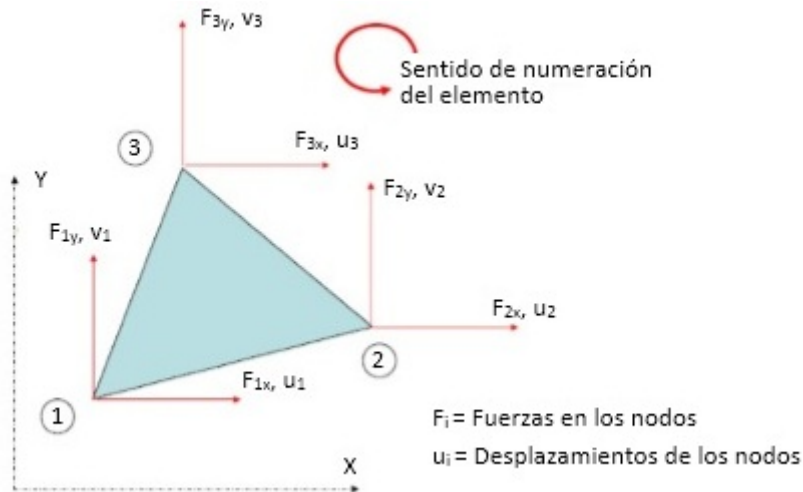


Figura 4-6. Elemento triangular de Turner.

Dicho formalismo se aplicó al problema de una viga biempotrada sometida a una carga concentrada (Figura 4-7), de la cual la Resistencia de Materiales proporciona la solución analítica (Ecuación 4-26). Se puede simplificar lo máximo posible el problema considerando la carga puntual centrada, que presenta similitud en resultados de deformación con el conjunto de clavija con tuerca y arandela con modo de fallo con doble rótula de la madera y restricciones de desplazamiento axial (modo de fallo 4).

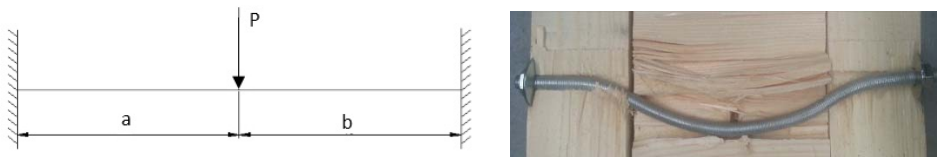


Figura 4-7. Modelo discreto.

$$\Delta y = \frac{P \cdot a^3 \cdot b^3}{3 \cdot E \cdot I_z \cdot (a + b)^3}$$

Ecuación 4-26

El conjunto se modela con tan solo cuatro elementos finitos, disponiendo de simetría respecto al eje vertical, lo que permite fijar como restricciones el anular los desplazamientos horizontales en los puntos A y B (Figura 4-8).

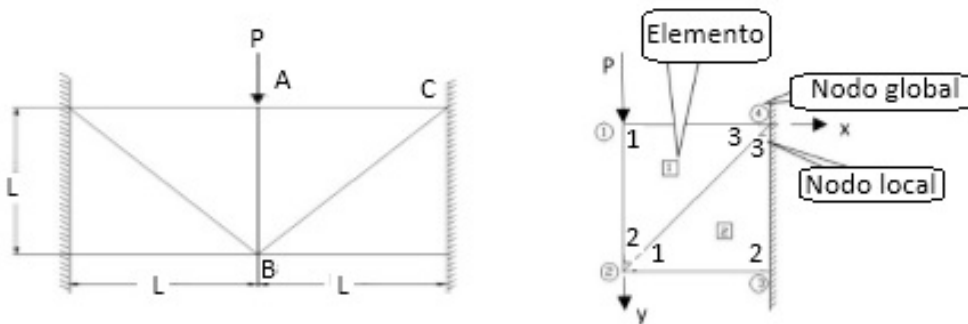


Figura 4-8. Sistema modernizado con elementos triangulares.

Los pasos a dar dentro del programa pretenden servir como guía y algoritmo de cálculo para componer las variables de referencia. Las matrices con elementos triangulares de Turner se combinan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$[F] = [K^e] \cdot [U]$$

Ecuación 4-27

Siendo:

- [F] vector de fuerzas en los nodos.
- [U] vector de desplazamiento en los nodos.
- [K^e] matriz de rigidez del elemento (6x6).

La idea básica del método es interpolar el campo de desplazamientos en el interior del elemento a partir de los desplazamientos en los nodos (Ecuación 4-28).

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y = \frac{1}{2 \cdot a} [a_1 + b_1 \cdot x + c_1 \cdot y] \cdot u_1 + \frac{1}{2 \cdot a} [a_2 + b_2 \cdot x + c_2 \cdot y] \cdot u_2 + \frac{1}{2 \cdot a} [a_3 + b_3 \cdot x + c_3 \cdot y] \cdot u_3$$

$$v = \alpha_4 + \alpha_5 \cdot x + \alpha_6 \cdot y = \frac{1}{2 \cdot a} [a_1 + b_1 \cdot x + c_1 \cdot y] \cdot v_1 + \frac{1}{2 \cdot a} [a_2 + b_2 \cdot x + c_2 \cdot y] \cdot v_2 + \frac{1}{2 \cdot a} [a_3 + b_3 \cdot x + c_3 \cdot y] \cdot v_3$$

Ecuación 4-28

Obteniéndose que la función de forma del i-ésimo elemento responde a Ecuación 4-29

$$N_i = N_i(x, y) = \frac{1}{2 \cdot a} [a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y]$$

Ecuación 4-29

Mediante las funciones de forma, la Ecuación 4-28 se expresa:

$$u = N_1(x, y) \cdot u_1 + N_2(x, y) \cdot u_2 + N_3(x, y) \cdot u_3$$

$$v = N_1(x, y) \cdot v_1 + N_2(x, y) \cdot v_2 + N_3(x, y) \cdot v_3$$

Ecuación 4-30

Supone dos tipos de numeraciones: una local (1, 2 y 3) y otra global (i, j, y k), ambos en sentido horario cuya correspondencia se muestra en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Relación de coordenadas en el nodo.

Elemento (e)	Nodo		Variables nodales		Coordenadas	
	Local	Global	Locales	Globales	Locales	Globales
Área = A _e	1	i	u ₁ , v ₁	u _i , v _i	x ₁ , y ₁	x ₁ , y ₁
	2	j	u ₂ , v ₂	u _j , v _j	x ₂ , y ₂	x ₂ , y ₂
	3	k	u ₃ , v ₃	u _k , v _k	x ₃ , y ₃	x ₃ , y ₃

Las funciones de deformación de un elemento se pueden definir según la Ecuación 4-31.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} = [B] \cdot [U]$$

Ecuación 4-31

Siendo:

- [B] matriz de deformación de valor constante cuyos elementos dependen de las coordenadas cartesianas de los nodos del elemento.
- [U] vector de desplazamiento en los nodos.

Una vez definidas las deformaciones, se pueden analizar las tensiones para el elemento con dos hipótesis distintas:

- Tensión plana, Ecuación 4-32.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{\nu \cdot E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu \cdot E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [D] \cdot [\varepsilon]$$

Ecuación 4-32

- Deformación plana, Ecuación 4-33.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2 \cdot \nu}{2 \cdot (1-\nu)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [D] \cdot [\varepsilon]$$

Ecuación 4-33

En definitiva, se puede establecer una relación matricial según la Ecuación 4-34.

$$[\sigma] = [D] \cdot [B] \cdot [U]$$

Ecuación 4-34

Siendo:

- [σ] vector tensión en el elemento.
- [D] matriz que depende de las propiedades elásticas del material.
- [B] matriz de deformación de valor constante cuyos elementos dependen de las coordenadas cartesianas de los nodos del elemento.
- [U] vector de desplazamiento en los nodos.

Aplicando el Teorema de los Trabajos Virtuales al elemento, se obtiene la Ecuación 4-35.

$$[F]^T = [u]^T \cdot \left(\int [B]^T \cdot [D]^T \cdot [B] \cdot d(\text{Vol}) \right)$$

Ecuación 4-35

Que trasponiendo da lugar a la Ecuación 4-36.

$$[F] = \left([B]^T \cdot [D]^T \cdot [B] \cdot \text{Vol} \right) \cdot [U] = [K^e] \cdot [U]$$

Ecuación 4-36

Siendo:

- $[K^e]$ matriz de rigidez del elemento.
- $[F]$ vector de fuerzas sobre los nodos.

La Ecuación 6-36 de los diferentes nodos se deben ensamblar para establecer una relación similar para la malla global. Dadas las fuerzas sobre los nodos, la resolución de dicho sistema de ecuaciones proporciona los desplazamientos de los nodos, que son las variables esenciales del problema. Se implementó la programación en Matlab® Versión 6.5 según el algoritmo expuesto en la Figura 4-9, sintetizando el problema hasta el punto de poder ratificarlo con ecuaciones tradicionales de la teoría de la Resistencia de Materiales. En el anexo B se encuentra el fichero ejecutable sobre Matlab®, facilitado en soporte digital y llamado *Anexo B1 Programa MEF MatLabV3_0.m*. Consta de los siguientes módulos:

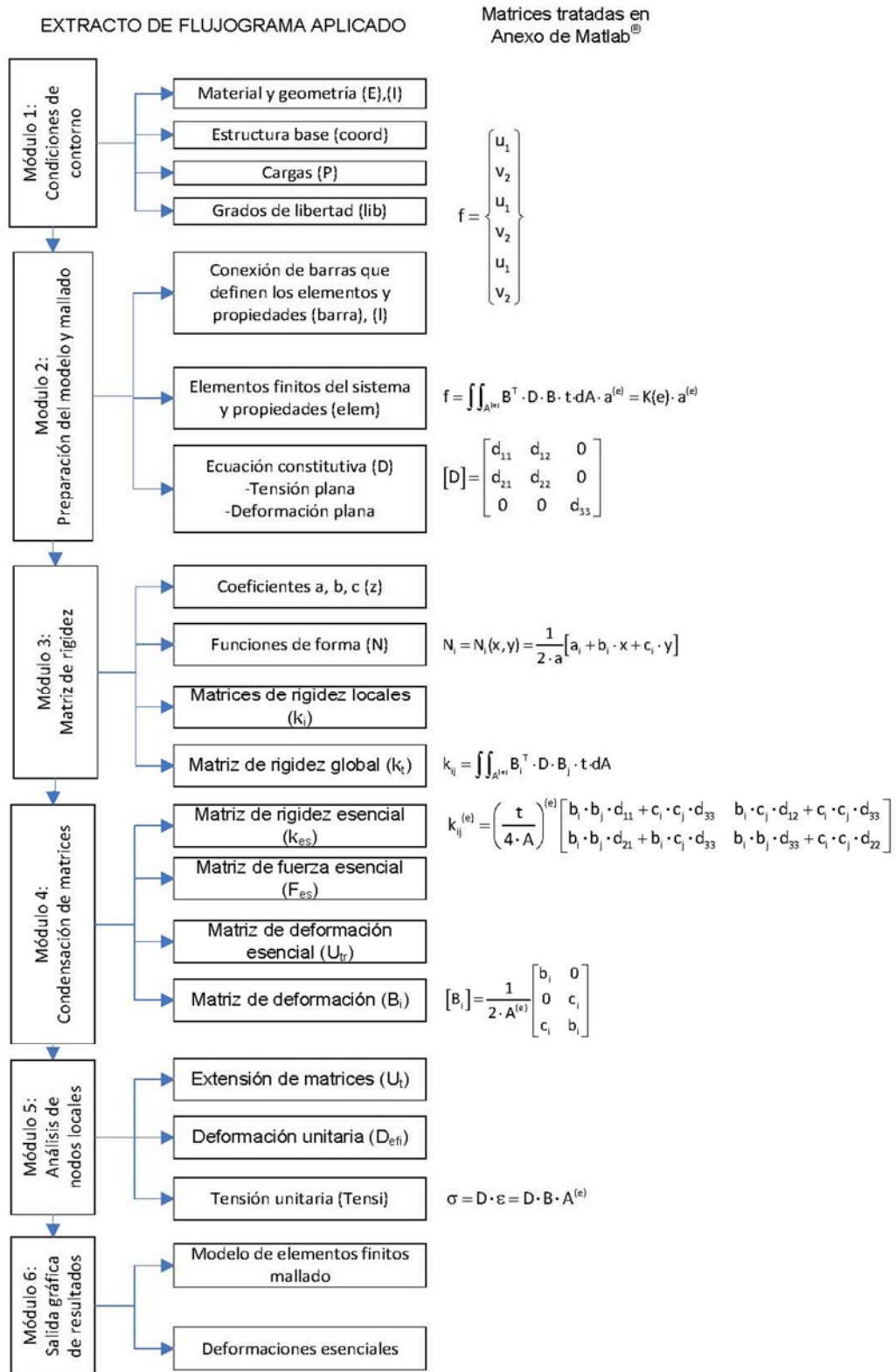


Figura 4-9. Extracto del flujograma de MEF con Matlab®, con elementos triangulares.

- 1) Módulo 1: Geometría, materiales y condiciones de contorno.
 - a. Propiedades del material, módulo de Young y de Poisson.
 - b. Posición de coordenadas de nodos.
 - c. Matriz de cargas aplicadas a la estructura.
 - d. Grados de libertad, restricciones que tendremos en los distintos nodos para los desplazamientos.
- 2) Módulo 2: Preparación del modelo y mallado.
 - a. Conexión de nodos, una vez definidos los elementos.
 - b. Propiedades de los elementos, área de los mismos y relación de nodos locales con nodos globales.
 - c. Matriz de relaciones constitutivas (tensión plana y deformación plana).
- 3) Módulo 3: Matriz de rigidez (K).
 - a. Definición de coeficientes b y c , constitutivos de las funciones de forma (N).
 - b. Composición a partir de las funciones de forma.
 - c. Matrices de rigidez locales.
 - d. Matriz de rigidez global.
- 4) Módulo 4: Condensación de matrices.
 - a. Simplificación de la matriz de rigidez.
 - b. Matriz de carga en función de los grados de libertad.
 - c. Producto de la matriz inversa de la matriz de rigidez por la matriz de fuerzas.
 - d. Composición de matriz de deformación.
- 5) Módulo 5: Análisis de nodos locales.
 - a. Matriz de deformación del nodo.
 - b. Deformación unitaria en el elemento.
 - c. Tensiones en los nodos locales del elemento.
- 6) Módulo 6: Salida gráfica de resultados.
 - a. Representación de elementos y desplazamientos totales.

El modelo descrito en la Figura 4-8 se tomó como base de referencia, considerando una laja de espesor unitario, empotrada en ambos extremos, con una carga vertical de $P = 2 \cdot 10^6$ N y un valor de 1 m de alto y 2 m de largo.

Bajo un modelo de elementos finitos de tres nodos en cada elemento, se determinaron los desplazamientos en los nodos de la malla y la tensión en el centro de gravedad del triángulo ABC, considerando un estado de deformación plana con $E = 50.000$ MPa, y un coeficiente de Poisson $\nu = 0,28$.

Dado que el problema presenta simetría, podemos simplificarlo (imagen derecha de la Figura 4-8):

- Se analizan los elementos que quedan a la derecha de los puntos A y B.
- Se define la carga aplicada como $P = 10^6$ N.
- Se restringen también los desplazamientos horizontales en A y B.

Como resultado, la Figura 4-10 muestra la salida gráfica de resultados.

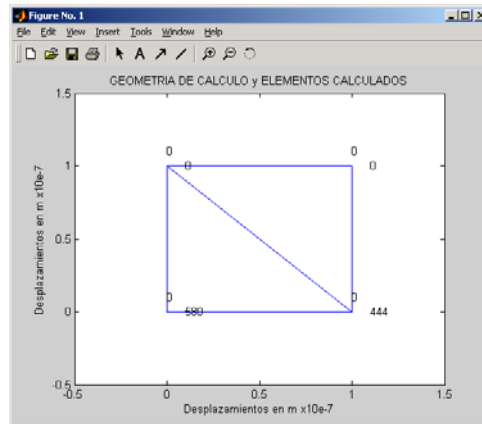


Figura 4-10. Salida de resultados de Matlab®.

Para el ejercicio propuesto se puede hacer uso de la Resistencia de Materiales clásica, bajo las simplificaciones propias de ésta. No siempre es así, pero es muy aconsejable identificar medios que ratifiquen el modelo MEF, ya sea ecuaciones clásicas, como en este primer modelo de aproximación, y/o ensayos empíricos.

Es de reseñar que los valores de ancho y alto son similares, en relación con la longitud. Por lo que el prisma mecánico, y su tratamiento de eje axial como magnitud más significativa, es una desviación que se podría acercar más al modelo de placas, donde las componentes de flexión no son las únicas significativas.

Considerando que el momento de inercia es el de un rectángulo de espesor unitario, según la Ecuación 4-37.

$$I_{zz} = \frac{L^3 \cdot e}{12} = \frac{1}{12} m^4$$

Ecuación 4-37

Siendo:

- L alto de la viga.
- e espesor de la viga.

En el caso de una viga hiperestática, con la carga aplicada en el centro, da lugar a los resultados de la Ecuación 4-38:

$$\Delta y = \frac{P \cdot a^3 \cdot b^3}{3 \cdot E \cdot I_z \cdot (a+b)^3} = \frac{2 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}^6}{3 \cdot 5 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{1}{12} \text{ m}^4 \cdot 1 \text{ m}^3} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Ecuación 4-38

Las deformaciones tratadas por MEF arrojan valores de $-1,36 \cdot 10^{-5}$ y $-5,80 \cdot 10^{-5}$ en los nodos A y B respectivamente, debiendo considerar que las funciones de forma definidas para la deformación en el elemento son constantes y el número de elementos es muy reducido. De los valores numéricos anteriores se identifican desviaciones en los resultados de deformaciones, incluso en el orden de magnitud de los resultados, destacando que:

- Sólo se han tomado cuatro elementos finitos para modelizar toda la estructura.
- A los nodos del elemento sólo se les ha posibilitado moverse en su plano, con lo cual el método es muy limitado para el comportamiento a flexión.
- El estado de elasticidad plana puede ser aplicado al tratarse el modelo como un prisma recto.
- Las fuerzas existentes son ejercidas sobre cada plano perpendicular al eje prisma recto, paralelas a dicho plano e idénticas sobre todos los planos perpendiculares, con lo que se hace uso de estados de tensión planos.

- Para los modelos de trabajo más precisos tenemos que introducir los dos materiales (madera y acero), con sus particularidades y una transmisión de carga propagada desde la madera.

Con este ejemplo de aplicación se ha pretendido abordar la secuencia de desarrollo por MEF como una somera aproximación a los modelos MEF. Hay que resalta la necesidad de tener especial cuidado con la discretización y las hipótesis simplificativas, que deben ser ratificadas en todo caso por otras técnicas. A continuación, se pasa directamente a estudiar modelos con programas comerciales que puedan incrementar el grado de precisión.

4.4 Modelo de elementos finitos en tres dimensiones

Un modelo numérico en tres dimensiones puede considerar todo el volumen de madera y una clavija de geometría cilíndrica, por lo que se aproxima más al caso real. El paquete de simulación Abaqus® (Dassault Co., 2013) ha sido empleado en el estudio de estructuras de madera, y en concreto para modelizaciones de uniones con clavija en varios trabajos científicos (Serrano, 2001 A), (André, 2007), (Stehn & Börjes, 2004) y (Guan & Rodd, 2001), que han servido de referencia en el diseño del modelo.

El programa de elementos finitos Abaqus®, desarrollado por Dassault Systèmes Simulia (Providence, RI, USA), se compone principalmente de tres módulos (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013):

- Abaqus/CAE: Se trata de una interfaz gráfica que permite definir el modelo estructural y la visualización gráfica de resultados a través de ventanas.
- Abaqus/Standard: Se encarga de resolver los sistemas de ecuaciones lineales, utilizándose con carácter general en un amplio rango de problemas lineales y no lineales.
- Abaqus/Explicit: Permite resolver las ecuaciones en problemas más complejos (dinámicos, de impacto, altamente no lineales o para condiciones de contorno variables).

Esta parte del trabajo se inició con la versión 6.08 de Abaqus® y ha sido completado con la versión 6.13 con licencia AILA (*Academic Institution License Agreement*), del año 2014. Dispone de cinco créditos para programas de análisis y un puesto de trabajo Pre-Post Procesador Abaqus®/CAE, no habiendo sido necesario utilizar el módulo Abaqus/Explicit.

4.4.1 Estructura del trabajo con Abaqus®

El procedimiento de análisis consta de los tres bloques que ya se describieron en el Apartado 4.3.1, y que aquí se relacionan con los archivos específicos de este programa:

- Preproceso: En él se define el modelo de elementos finitos (geometría, propiedades de los materiales, apoyos, cargas y malla de elementos finitos) y se especifica el tipo de cálculo que se va seguir. Normalmente se trabaja con la interfaz gráfica Abaqus/CAE, aunque el programa crea un archivo de extensión **.inp* que puede verse con un editor de textos.
- Proceso: Resuelve los cálculos numéricos que generó el modelo **.inp*, utilizando la aplicación a la que se ha enviado (Abaqus/Standard o Abaqus/Explicit). Los resultados (desplazamientos, deformaciones, tensiones, etc.) se guardan en diversos archivos de datos (**.odb*, **.dat*, **.res*, **.fil*, **.msg* y **.rpt*).
- Pos-proceso: Muestra los resultados obtenidos tras realizar el cálculo a partir de los archivos de datos generados. Normalmente se realiza mediante la interfaz gráfica Abaqus/CAE, que permite visualizar la estructura deformada y gráficos con escalas de color una vez seleccionado el archivo **.odb*, que contiene los resultados para el análisis de desplazamientos, deformaciones, tensiones, etc.

Las órdenes dadas al programa, mediante menús desplegables o comandos de tipo icono, se guardan en el archivo *abaqus.rpy*, escrito en el lenguaje de programación interpretado Python®, que puede editarse, modificarse y

volverse a ejecutar. Es de gran utilidad porque contiene toda la información del modelo y las instrucciones del cálculo que se han indicado en el proceso.

La interfaz gráfica Abaqus/CAE (Figura 4-11) se encuentra organizada en módulos, conteniendo cada uno de ellos las herramientas correspondientes a una etapa del proceso de modelado:

1. *Part*. Permite dibujar la geometría de cada parte del modelo.
2. *Property*. Para definir las propiedades del material, crear la sección y asignarla a cada parte.
3. *Assembly*. Para crear un conjunto (montaje o *assembly*) a partir de las partes.
4. *Step*. Donde se concretan las etapas o los pasos del análisis en que las interacciones se activan o desactivan.
5. *Interaction*. Define el comportamiento de las superficies de las distintas piezas cuando entran en contacto
6. *Load*. Este módulo permite especificar las cargas y las condiciones de contorno, así como las etapas en que están activas.
7. *Mesh*. Contiene las herramientas para generar la malla de elementos finitos de cada parte.
8. *Job*. Para definir el tipo de cálculo, iniciar su ejecución y realizar un seguimiento del progreso.
9. *Visualization*. Permite visualizar gráficamente los resultados obtenidos.
10. *Sketch*: Para manejar los perfiles bidimensionales que se utilizan al definir la geometría de una parte.

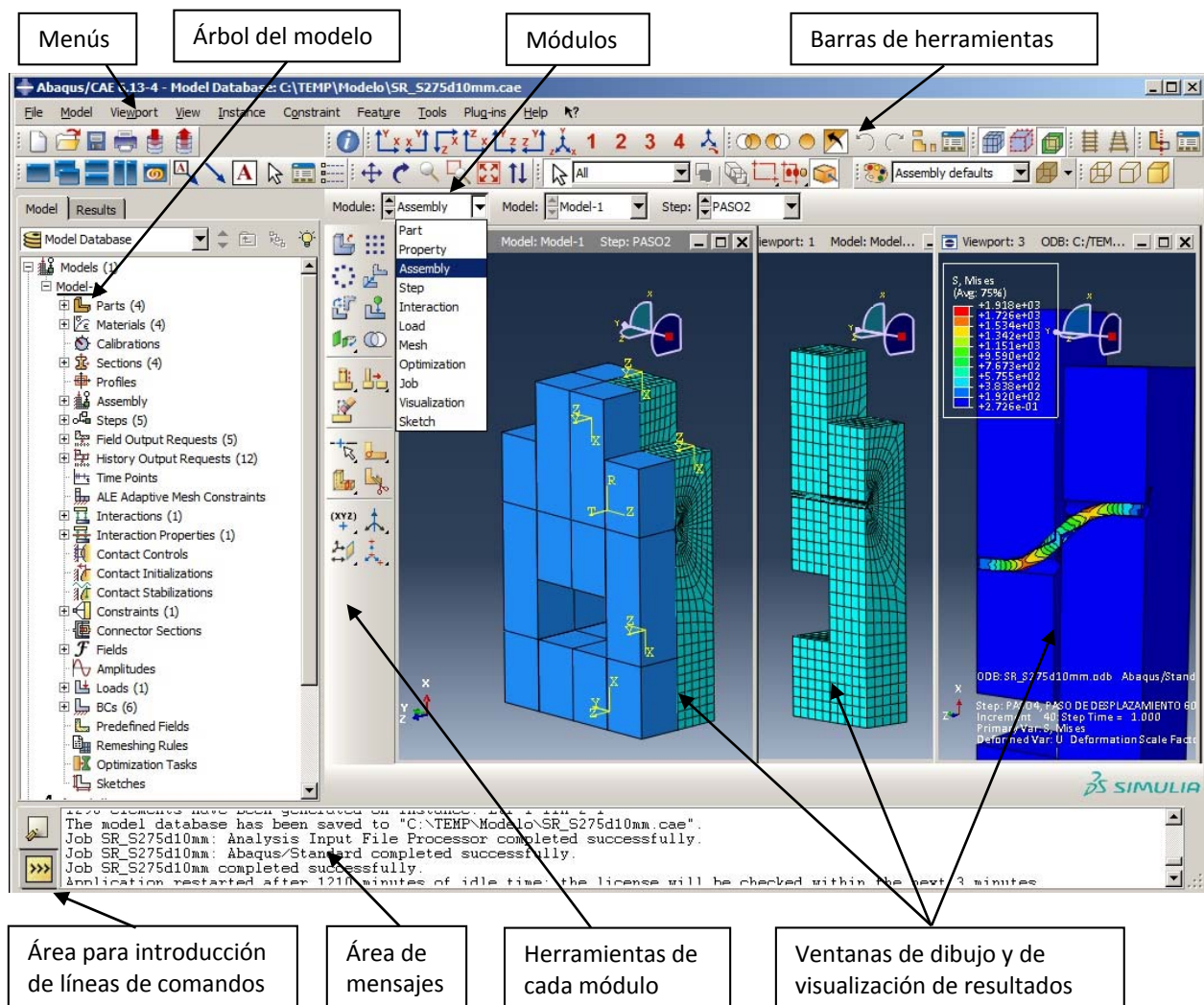


Figura 4-11. Ventana principal de Abaqus/CAE.

El orden en que se presentan los módulos corresponde a la secuencia lógica del procedimiento de creación del modelo. El contenido de la ventana principal (menús y barras de herramientas) varía al cambiar de módulo.

A la izquierda de la ventana principal, se encuentra el árbol del modelo (*model tree*), que proporciona una visión gráfica general de los objetos que contiene (partes, materiales, pasos, cargas, condiciones de contorno, definición del trabajo, etc.) (Figura 4-11). Al desplegarse, permite acceder de una manera rápida a cada una de estas características. La disposición de los contenedores y elementos refleja el orden lógico para la definición del modelo. En la etapa de pos-proceso, este espacio está ocupado por el árbol de resultados (*results tree*), que contiene los objetos específicamente definidos para estudiar los resultados, como gráficas de variables, grupos de partes, nodos, elementos, etc.

El programa Abaqus® se puede considerar como uno de los más potentes del mercado, porque cuenta con una extensa biblioteca de elementos finitos y permite al usuario definir comportamientos mecánicos particulares para cada material.

4.4.2 Construcción del modelo de unión con clavija en cortadura doble

En este apartado se describen brevemente los pasos que se han dado para construir el modelo de unión con clavija correspondiente al problema planteado en la Tabla 4-1. Para ello se describen las operaciones definidas en cada uno de los módulos en el mismo orden en el que se presentan en la aplicación, aunque debe de tenerse presente que, en ocasiones, para completar la definición de alguno de los módulos es preciso la intervención de otros módulos que se describen en apartados posteriores. Por ejemplo, el módulo *Step* requiere las definiciones hechas en el módulo *Load* que se expone después.

4.4.2.1 Creación de piezas: módulo *Part*

Uno de los primeros pasos es definir el conjunto de objetos con los cuales se construirá la unión. Cada una de las piezas o partes necesarias para componer el conjunto de la unión se puede obtener por extrusión longitudinal a partir de una sección plana haciendo uso del módulo *Parts*. Este módulo contiene información sobre la geometría de estas partes, para lo que se crean piezas de tipo tridimensional asociadas a un sistema de referencia local que se fija con la definición de cada pieza. Durante esta fase de creación del modelo, se define para cada parte si ésta va a ser de tipo sólido deformable o rígido.

La opción *Sketch* facilita el desarrollo geométrico, marcando los vértices que darán lugar a las piezas de madera, o el centro y el radio para generar un cilindro extruido que será asociado con el elemento clavija. En el entorno de *Sketch* se puede trabajar con la asignación de cotas y modificar las geometrías para la definición completa de las distintas partes. Sus dimensiones se describen en la Tabla 4-3 y corresponden con el montaje de la unión de la Figura 4-1, donde se observan las variables con las cotas correspondientes, así como su disposición.

Tabla 4-3. Valores geométricos iniciales asignados a cada pieza o parte que compondrá la unión.

Pieza central	Pieza lateral	Clavija	Taco
$t_2 = 160,0 \text{ mm}$	$t_1 = 80,0 \text{ mm}$	$d = 10,0 \text{ mm}$	$t_3 = 160,0 \text{ mm}$
$L_2 = 330,0 \text{ mm}$	$L_1 = 450,0 \text{ mm}$	$L = 328 \text{ mm}$	$L_1 = 15,0 \text{ mm}$
$h_2 = 160,0 \text{ mm}$	$h_1 = 160,0 \text{ mm}$		$h_1 = 160,0 \text{ mm}$

Inicialmente se crean las cuatro piezas o *Parts*, que se muestran de forma independiente en la Figura 4-12. Las piezas creadas son: un paralelepípedo etiquetado como “Ctr” de espesor t_2 , que se corresponde a la pieza central de madera en la unión, otro llamado “Ltr” de espesor t_1 , que dará lugar a las dos piezas laterales de madera, un cilindro llamado “Perno”, que se asociará a la clavija de acero y, por último, otro paralelepípedo llamado “Taco” cuya función es conectar las dos piezas laterales de madera.

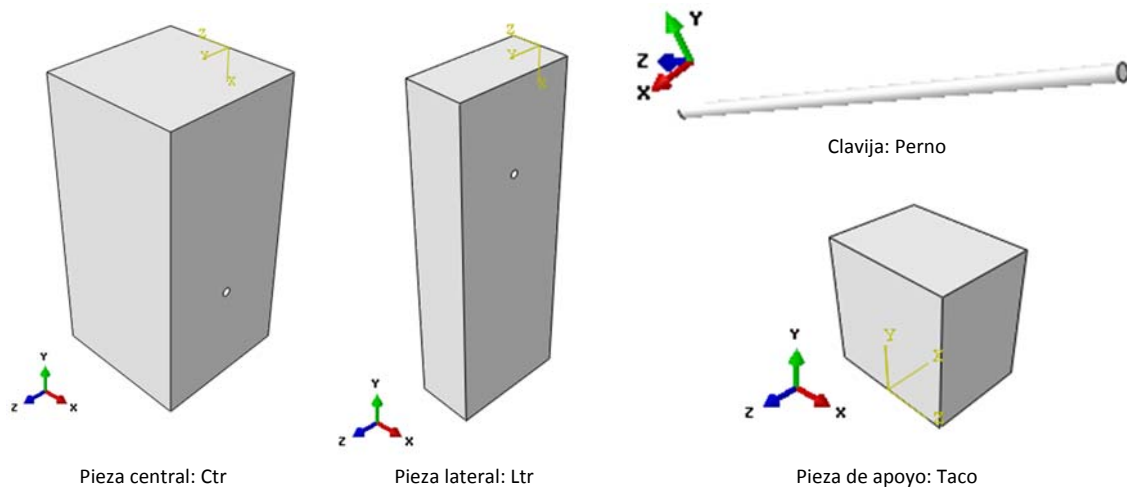


Figura 4-12. Piezas definidas para la construcción de la unión con clavija.

A los dos primeros paralelepípedos (“Ctr” y “Ltr”) se les ha practicado un agujero por extrusión destinado a la inserción de la pieza “Perno”. La pieza llamada “Perno” tiene una longitud (L) ligeramente mayor a las piezas que va a unir. Dicha longitud se calcula como la suma del ancho de las piezas que debe atravesar, más tres milímetros adicionales en cada extremo, más un juego de un milímetro que se toma inicialmente entre las intercaras de madera, para facilitar las relaciones de contacto entre éstas en los primeros pasos de montaje y carga. Es decir, la longitud total de la clavija del modelo base es de 328 mm ($L = 2 \cdot 3 + 2 \cdot t_1 + 2 \cdot 1 + t_2$), que permite considerar la deformación que puede sufrir y las holguras de montaje entre las intercaras de las piezas de madera a unir.

4.4.2.2 Definición de los materiales y asignación a las piezas del modelo: módulo *Property*

En necesario establecer el comportamiento mecánico de los materiales que intervienen en la unión por lo que hay que definir las propiedades que caracterizan su resistencia y relacionarlas con cada pieza. Se hace uso del módulo *Property* en la interfaz gráfica Abaqus/CAE y, dentro de éste, los comandos *Material* y *Section* para realizar esta operación. Primero, desde la opción *Materials*, se definen las características mecánicas del acero y de la madera. Después, con la opción *Section* se fija la orientación que tendrá cada pieza, lo cual es fundamental en el caso de la madera por su comportamiento ortótropo. Finalmente, cada pieza o *Part* debe relacionarse con una sección para establecer el comportamiento del material en la misma.

En la Figura 4-13 se muestra la secuencia de ventanas que permite definir un material. En el menú de árbol situado en la izquierda se puede crear un nuevo material y, dentro de la ventana emergente, se define el comportamiento mecánico fijando la opción “Mechanical” y, posteriormente, se elige el tipo (por ejemplo: elástico o plástico, entre otros). En el modelo de unión con clavija se han creado dos materiales: el acero etiquetado como “Acerop”, que estará relacionado con la clavija, y la madera llamada “MaderaHilltcAHARD”, que será aplicada al resto de piezas.

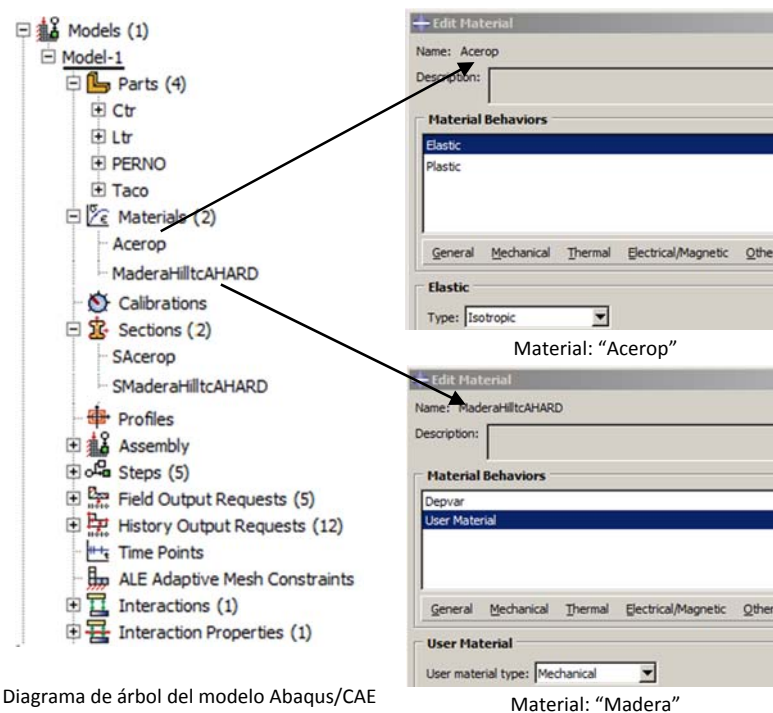


Diagrama de árbol del modelo Abaqus/CAE

Figura 4-13. Definición de materiales.

El acero se modela mediante un comportamiento elasto-plástico isotrópico (Fueyo et al., 2009, B). Este material (“Acerop”) se asociará posteriormente a la clavija. Para concretar sus propiedades mecánicas se ha supuesto que se trata de un acero para la construcción (S275), tal y como ha quedado caracterizado en el Apartado 3.5. El comportamiento elástico simplificado evoluciona de forma lineal según la ley de Hooke y queda descrito por el módulo de Young ($E_a = 210.000 \text{ N/mm}^2$) y el coeficiente de Poisson ($\nu_a = 0,3$). Una vez superado el límite de fluencia del acero ($f_y = 275 \text{ N/mm}^2$), según la Tabla 3-15, pasa a un comportamiento de tipo plástico también con una evolución lineal simplificada, donde se fija una pendiente ($E_a/20$) más reducida para caracterizar el endurecimiento del acero (Fueyo et al., 2009, B).

El material de las piezas de madera resulta más complejo debido a su comportamiento ortótropo, descrito en el Capítulo 2. Algunos autores (Holmberg & Persson, 1999), (Blanchet, 2004) lo aproximan por medio de un comportamiento ortótropo de tipo elasto-plástico en compresión. Para el comportamiento en la tracción, tanto en dirección paralela como perpendicular a la dirección de la fibra, se puede modelar empleando otra distribución distinta, también elasto-plástica y de tipo ortótropo (Guan & Rodd, 2001). El tipo de madera elegido para el estudio ha sido el denominado GL24h, cuya caracterización se expuso en el Apartado 3.2.2, teniendo especial atención en la disposición de las piezas en el conjunto de la unión y en la asignación de los sistemas de referencia locales, para establecer las direcciones de ortotropía. La orientación de las fibras en dirección del eje “X” global ($\alpha = 0^\circ$). Los sistemas de referencia quedan fijados para el modelo de unión según se indica en la Figura 4-14, donde también se pueden ver las intersecciones con los planos, que posteriormente serán empleados para simplificar el modelo de unión haciendo uso de condiciones de simetría.

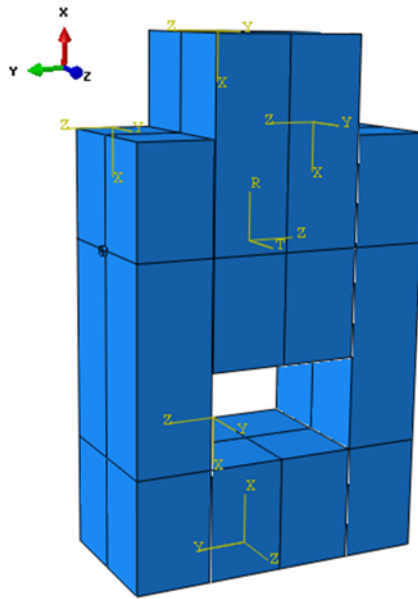
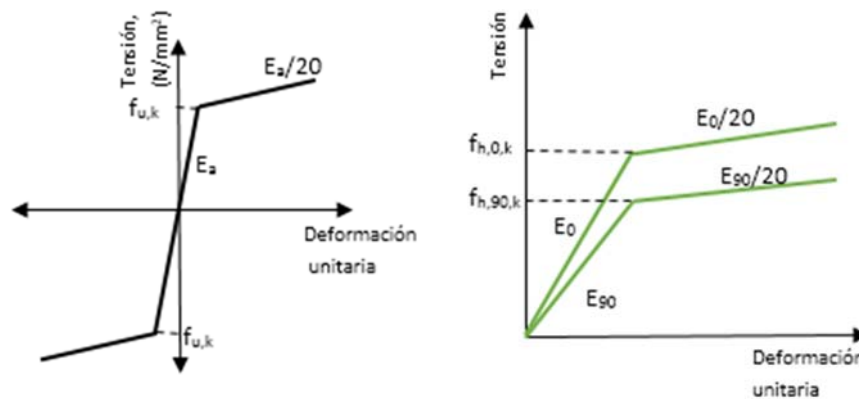


Figura 4-14. Sistemas de referencia y direcciones para caracterizar la ortotropía en las piezas de madera.

En la Figura 4-15 se muestra gráficamente el modelo de comportamiento mecánico unidimensional para el acero en tracción y compresión, y para la madera en compresión.



Comportamiento tracción y compresión en el acero Comportamiento a compresión en la madera

Figura 4-15. Modelo de comportamiento de material para acero y madera simplificado a una dirección.

Al pasar de una a tres dimensiones, la definición matemática del modelo de comportamiento mecánico del material resulta más compleja, especialmente para la madera, lo que ha provocado la necesidad del uso de subrutinas específicas de tipo UMAT, que se pueden programar en FORTRAN, y conectar con el módulo de material de Abaqus® (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013), dado que no existe un modelo de material incluido en las librerías de Abaqus® que se ajuste bien al comportamiento real de la madera, especialmente debido a sus diferencias de comportamiento entre tracción y compresión.

4.4.2.3 Ensamblaje del conjunto de la unión: módulo *Assembly*

El módulo *Assembly* crea instancias, que son copias de las partes cuya geometría se definió en el módulo *Part* y sirven para realizar con ellas el “ensamblaje” (*Assembly*) de la unión, situándolas adecuadamente respecto a un sistema de referencia global.

El resultado final del ensamblaje es el mostrado en la Figura 4-16, donde se identifica el sistema de referencia global con los vectores X, Y y Z coloreados en la parte inferior izquierda del modelo, frente a los sistemas de referencia

locales, que se representan de forma solidaria a cada instancia. El proceso de ensamblaje del modelo requiere traslaciones (*translate*) y giros (*rotate*) de las instancias, pero también permite otras opciones como la unión entre instancias (*merge*), el corte (*cut*) o la definición de patrones y matrices (*pattern*) entre otros. Para las traslaciones y giros se debe tener presente las notaciones asociadas a éstos. En el caso de movimientos lineales se definen con U1 U2 o U3 y en el de giros con RU1, RU2 o RU3 para los ejes X, Y o Z, respectivamente.

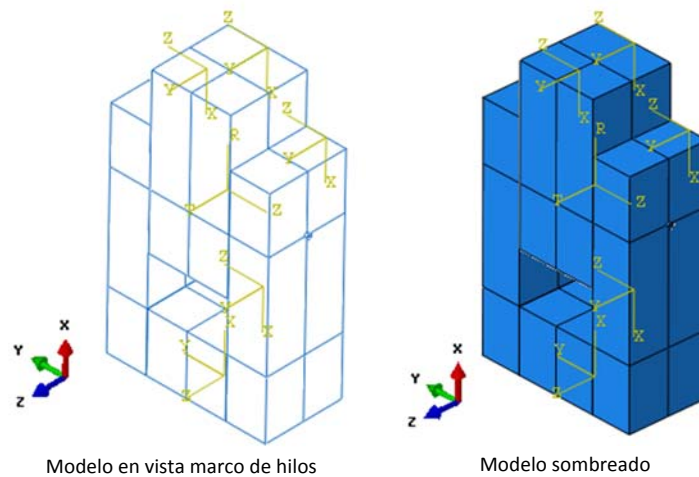


Figura 4-16. Conjunto de instancias ensambladas.

Para llegar al resultado final del ensamblaje, hay que colocar en el sitio adecuado las distintas instancias. Debido a la existencia de dos planos de simetría perpendiculares, es suficiente con modelizar un cuarto de la unión, como muestra la Figura 4-17. Se han creado las instancias correspondientes a:

- La pieza central de madera con espesor t_2 , etiquetada como "Ctr-1", de la que se puede ver una cuarta parte señalada con sus aristas en rojo.
- La clavija, etiquetada como "Perno-1", de la que también se puede ver la cuarta parte.
- La pieza lateral derecha de madera de espesor t_1 , etiquetada como "Ltr-1-lin-2-1" de la que se muestra la mitad posterior.
- El taco que sirve de apoyo entre las dos piezas laterales, etiquetado como "Taco-1", del que se puede ver también la cuarta parte.
- La pieza lateral izquierda de madera con espesor t_1 , etiquetada como "Ltr-1", que corresponde al lado derecho del plano de simetría perpendicular al eje de la clavija (por lo tanto, esta instancia queda oculta en la Figura 4-17).

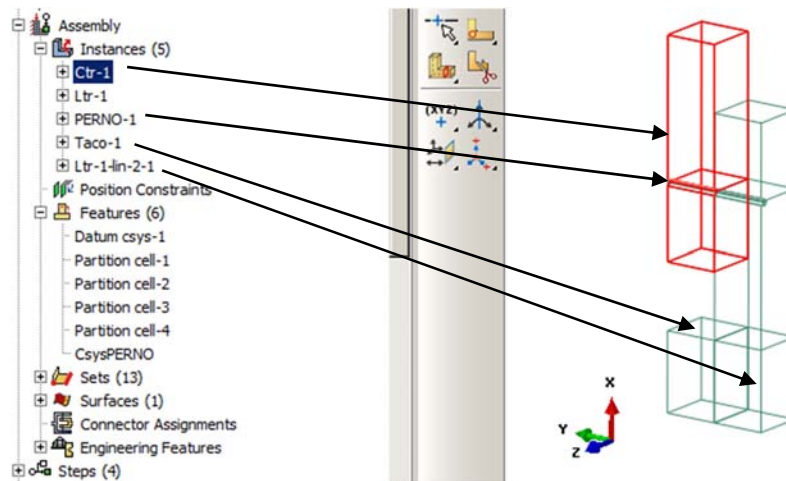


Figura 4-17. Partes de las instancias ensambladas para la modelización.

Para el montaje y la colocación de las distintas instancias se debe establecer un sistema de referencia “Datum csys-1”, y fijar los planos de simetría que permiten simplificar el modelo haciendo una serie de particiones (Figura 4-18) que se describen a continuación:

1. Partición XZ (etiquetada como Partition cell-1): permite fijar uno de los planos de simetría perpendicular al eje Y y a la clavija en su punto medio.
2. Partición XY (etiquetada como Partition cell-2): establece otro plano de simetría vertical perpendicular al eje Z y a lo largo del eje de la clavija.
3. Partición YZ (etiquetada como Partition cell-3): se sitúa en el plano horizontal a la altura del eje de la clavija, para facilitar la selección de elementos finitos en la región de trabajo más interesante de la madera.
4. Partición YZ (etiquetada como Partition cell-4): se sitúa en el plano horizontal a la altura del taco, para facilitar las restricciones en los grados de libertad que existen al juntar taco y pieza lateral de madera.

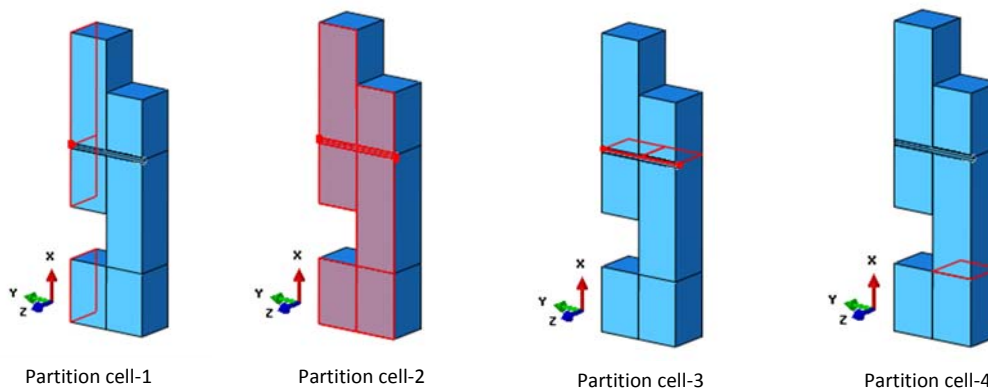


Figura 4-18. Planos para la partición de la unión orientados a simplificar el tratamiento del modelo MEF.

En el módulo de ensamblaje también se pueden definir juegos o Sets, que son referencias empleadas en distintas operaciones. En el modelo se han preparado los siguientes Sets:

- Sets formados a partir de instancias del conjunto ensamblado según se identifican en la Figura 4-19, para seleccionar la pieza central de madera (llamado “SetCentral”), la pieza lateral (“SetLateral”), la clavija (“SetPerno”) y el taco “SetTaco”.

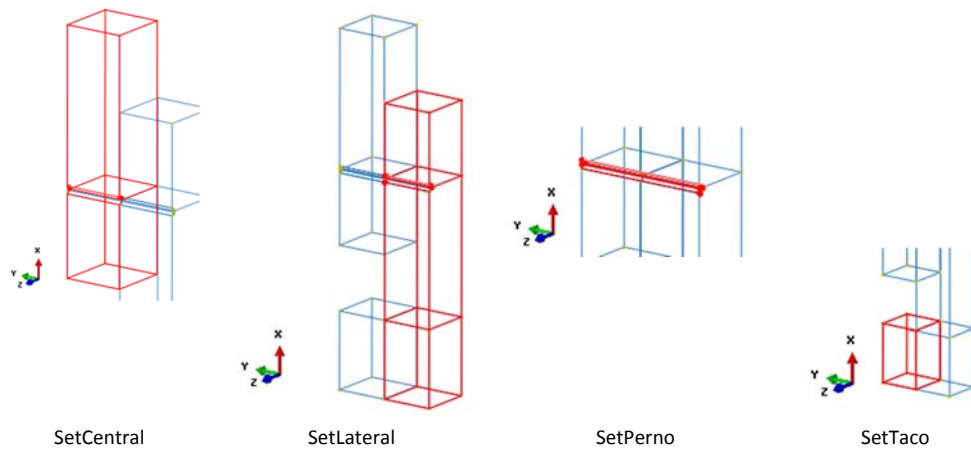


Figura 4-19. Sets para hacer referencia a instancias.

- Sets formados a partir de objetos de referencia, como el plano correspondiente a la parte de la testa de la pieza de madera central, donde será aplicada la carga con la que debe trabajar la unión o el deslizamiento requerido sobre esa misma superficie. Se etiqueta como "SetDISPL". Otro set que sirve como referencia es la intersección de aristas en el nodo perteneciente al plano superior de la pieza central ("Set-DislU1CtrNd12"), que se muestra en la Figura 4-20.

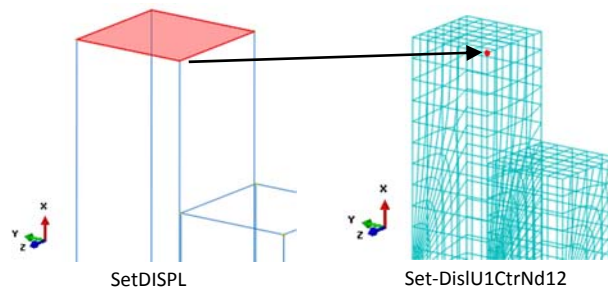


Figura 4-20. Sets para objetos de referencia.

- Sets formados a partir de elementos finitos, como el conjunto de cuatro elementos finitos pertenecientes a las esquinas de las piezas de madera expuestas a mayor compresión ("Set4ElemCentral" y "Set4ElemLateral"), los elementos finitos de las mismas esquinas ("SetCtr" y "SetLtr") o el conjunto de elementos finitos de la clavija donde es previsible que aparezcan los momentos flectores máximos ("SetRotulaCentral" y "SetRotulaLateral"), como se muestra en Figura 4-21.

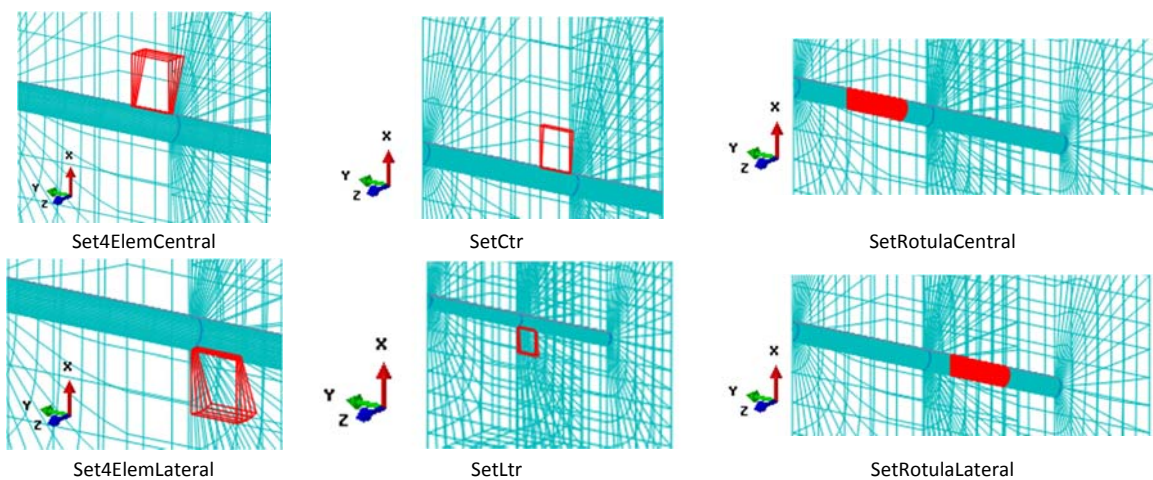


Figura 4-21. Sets para extracción de información de elementos finitos.

4.4.2.4 Etapas de análisis: módulo *Step*

Es necesario establecer los pasos o *steps* que van a tener lugar en la unión. En este módulo se describe la secuencia de condiciones de contorno y cargas que van a actuar sobre el modelo, y los resultados que se quieren analizar a medida que evoluciona el problema, mediante las opciones *Create field output* y *Create history output*.

Los pasos definidos en este problema se pretenden ajustar a las condiciones de trabajo que se requieren en uniones reales de forma semejante a los ensayos experimentales que serán descritos en el Capítulo 5. Se considera una unión que va a trabajar en condiciones estáticas, cuya base inferior ha sido apoyada en una plataforma para ejercer una compresión desde el plano superior (testa de la pieza central), estudiando la situación que presenta la unión cuando se aplica la presión vinculada con la capacidad de carga por plano cortante y elemento de fijación ($F_{v,Rk}$) que establece la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). También es interesante obtener resultados sobre la evolución de la carga frente al deslizamiento. Se fija un estado para el deslizamiento de 15 mm, que es el permitido por el ensayo (UNE-EN 26891, 1992), y para otra situación de deslizamiento muy avanzado de 60 mm. Partiendo de la opción *Create step*, se definen los siguientes pasos:

- **Initial:** Se asocia a las condiciones de contorno, que se definen posteriormente en el módulo *Load*. Es un paso que siempre incluye Abaqus®, y establece la información sobre el comportamiento que tiene la unión cuando no ha comenzado a trabajar. Las condiciones de contorno aplicadas en el paso *Initial* se mantienen (o propagan) a los siguientes pasos y son:
 - Apoyo de la base inferior (“ApoyoInferior”), que impide el desplazamiento del plano inferior de la unión en la dirección de eje “X” ($U1 = 0$).
 - Simetría en el plano perpendicular al eje Y, que pasa por el centro de la clavija (“YsymmBC”). Para ello se hace uso del Set “Partition cell-1” (véase Figura 4-18) y se restringen los desplazamientos en el eje Y y los giros en los ejes X y Z ($U2 = UR1 = RU2 = 0$).
 - Simetría en el plano perpendicular al eje “Z” (“ZsymmBC”). Para ello se hace uso del set “Partition cell-2” (véase Figura 4-18) y se restringen los desplazamientos en el eje Z y los giros en los ejes X e Y ($U3 = UR1 = RU2 = 0$).
 - Interacción en las superficies de contacto entre la clavija y la madera, para impedir que los nodos de los elementos de la madera se incrusten en los elementos de la clavija, que se definirá en el módulo *Interaction*.
- **PASO 1:** Junto con las condiciones de contorno establecidas en el paso *Initial*, se añade un desplazamiento en el plano superior de la pieza central de madera (que se aplica al set “SetDISPL”), en dirección del eje X y el mismo sentido que la carga de compresión, con una distribución uniforme de valor $U1 = -0,7$ mm. Este deslizamiento debe ser pequeño para evitar problemas de convergencia durante el proceso de cálculo. La Figura 4-22 muestra la secuencia de ventanas para la creación de un paso, mientras que la Figura 4-23 muestra la condición de contorno que supone el desplazamiento de aproximación aplicado al modelo en el “PASO 1”.

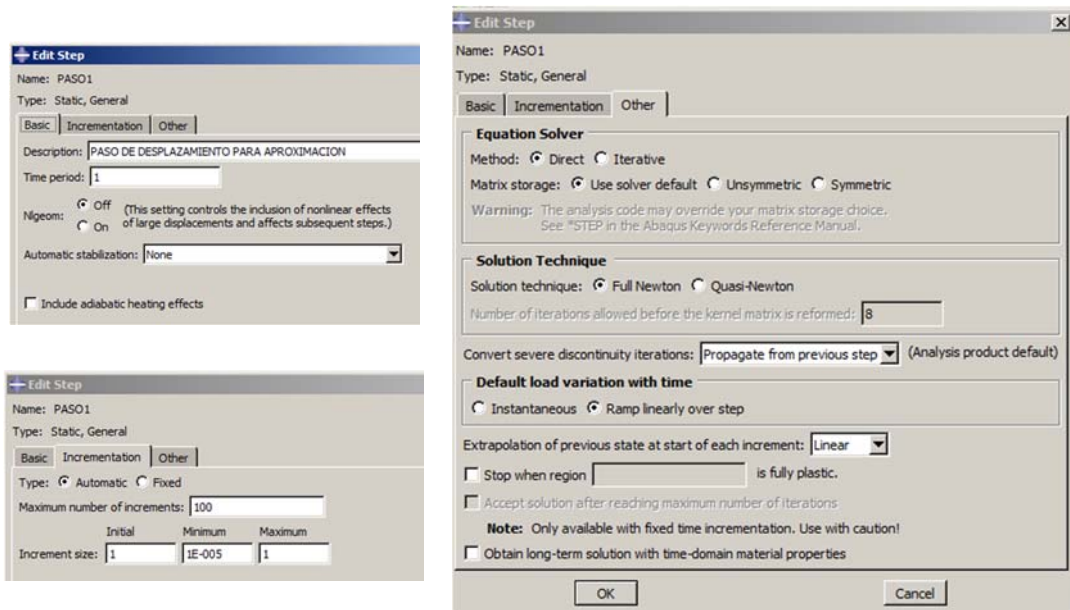


Figura 4-22. Configuración de un paso.

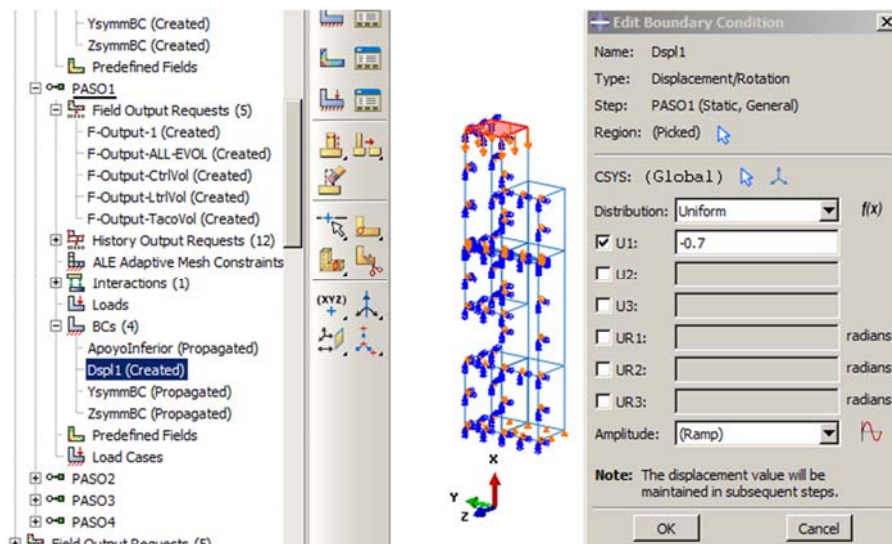


Figura 4-23. Condiciones de deslizamiento añadidas en el PASO 1.

- PASO 2: En este paso se pretende analizar la unión en el estado donde la carga aplicada es igual a la capacidad de carga por plano cortante ($F_{v,Rk}$) establecida por norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). La carga se aplica a modo de presión uniforme, distribuida en la misma superficie de la pieza central de madera a la que se aplican los deslizamientos, que se marca en rojo en la Figura 4-23.
- PASO 3: Se lleva la unión hasta el deslizamiento máximo permitido para los ensayos con uniones metálicas según norma (UNE-EN 26891, 1992). De forma similar a como se hizo en el PASO 1, se aplica un deslizamiento $U1 = -15$ mm.
- PASO 4: Se lleva la unión hasta un deslizamiento muy avanzado, con lo que se obtiene la relación carga-deslizamiento a medida que la unión llega a esa situación. De forma similar a como se hizo en el PASO 1, se aplica un deslizamiento $U1 = -60$ mm.

En los pasos 1, 2, 3 y 4 es necesario definir las variables de salida requeridas para estudiar el comportamiento mecánico, que luego se visualiza gracias al archivo *.odb. Haciendo uso de las opciones *Create field output* y *Create history output* se habilitan en la ventana correspondiente los cuadros para las variables: *Stresses*, *Strains*, *Displacement*, *Forces*, *Contact Energy*, *Volume* y *State* para cada incremento.

4.4.2.5 Interacciones entre superficies: módulo *Interaction*

El módulo *Interaction* permite establecer distintas relaciones que son aplicadas cuando se ejecuta la simulación numérica en los distintos pasos o *Steps*. En el modelo que se ha construido es necesario definir unas condiciones iniciales cuando las superficies entran en contacto. Se crea una interacción entre la superficie de la clavija (que actúa como superficie *master*) y el agujero de madera en el que se aloja la clavija (superficie *slave*) llamada "ContactDowelTimber". También se crea una restricción o *constraint* entre la superficie del taco (que actúa como superficie principal) y la pieza de madera lateral (etiquetada como "TieTaco").

Las superficies *master* y *slave* rigen la transmisión de fuerzas entre los elementos finitos de las distintas piezas cuando entran en contacto (Figura 4-24). Abaqus® determina la zona de contacto, estudiando de manera iterativa si cada nodo de la superficie esclava es cerrado (existe contacto y transmite presión) o abierto (no está en contacto y, por tanto, no transmite presión). Para ello, en cada etapa del proceso, calcula en cada nodo cerrado la presión de contacto; si ésta resulta negativa (correspondería a tracción, cosa que no es admisible), cambia el estado del nodo a abierto, y vuelve a iterar. Si cambia la condición de contacto, es lo que el programa llama en esa iteración "discontinuidad severa" (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013).

En la interacción entre clavija y madera tenemos que tener presente la forma de contacto. Para ello hay que indicar:

- **Comportamiento normal.** Si la distancia de los nodos de una de las superficies (denominada esclava) a la otra (conocida como maestra) es mayor que cero, no se transmite presión entre las superficies (ligadura abierta); cuando la distancia llega a cero, entonces sí se permite la transmisión (ligadura cerrada). De esta forma se impide que los nodos de la superficie esclava penetren en la superficie *master*. Lo contrario sí es posible, pudiendo los nodos de la superficie *master* penetrar las facetas definidas por los nodos de la superficie *slave* (Figura 4-24). Para evitarlo, debe elegirse como esclava la superficie de malla más fina.

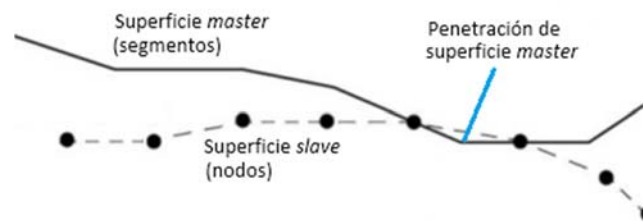


Figura 4-24. Contacto entre las superficies maestra y esclava (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013).

- **Comportamiento tangencial.** Este modelo de contacto permite considerar las fuerzas tangenciales entre las superficies *slave* y *master* debidas a fenómenos de rozamiento.

En el contacto entre clavija y madera puede definirse el deslizamiento como pequeño o finito. El primer caso es admisible cuando el desplazamiento tangencial es menor que la longitud de la arista de los elementos finitos, resolviéndose el cálculo de una manera más rápida y eficiente. Se ha elegido la superficie de la clavija como maestra (de color rojo en la Figura 4-25) porque el acero es más duro y se considera que los nodos de la superficie maestra pueden penetrar en la superficie esclava. Esta interacción se encuentra activa desde el paso "Initial" y se ha propagado a los pasos posteriores, al objeto de comenzar el contacto desde una situación estática, evitando posibles movimientos rígidos iniciales, y permaneciendo activa para transmitir los esfuerzos a medida que la unión evolucione en los estados de carga y deslizamiento.

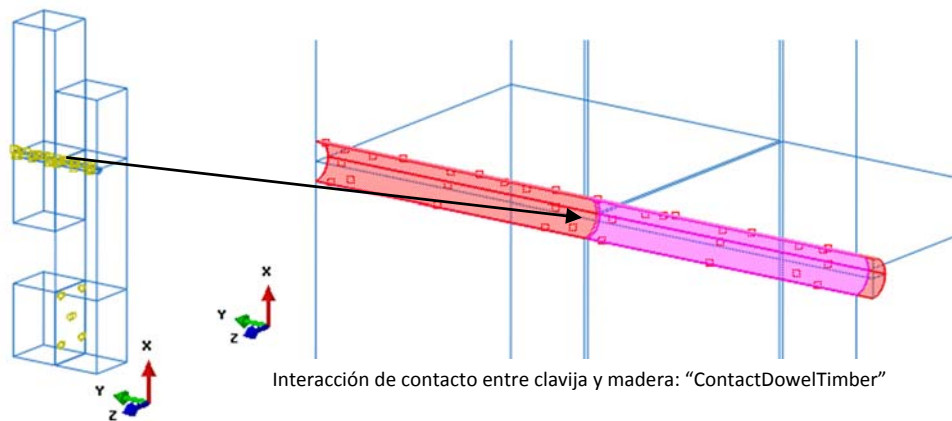


Figura 4-25. Interacción entre superficies madera-clavija.

Una vez definida la interacción, es necesario establecer las propiedades del contacto en dirección tangencial y perpendicular a la superficie, con la opción *Interaction Properties* (Figura 4-26). Se ha definido como un comportamiento tangencial sin fricción de acuerdo con algunas referencias (Johansen, 1949) y un comportamiento normal que permita la separación tras el contacto, porque la clavija está sometida a esfuerzos de flexión no habiendo condiciones de contorno que impidan su separación de la madera.

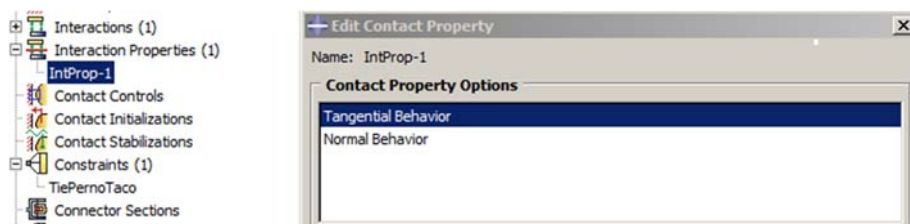


Figura 4-26. Interacción entre superficies.

La restricción o *constraint* entre la superficie del taco y la pieza de madera lateral de espesor t_1 se representa en la Figura 4-27, donde el taco actúa como superficie maestra. Esta restricción es necesaria para acoplar los grados de libertad en el contacto de las dos piezas y ajustar la superficie esclava en el proceso de ensamblaje. Abaqus® permite distintos tipos de restricciones. Se ha empleado la denominada *Tie* porque permite acoplar los grados de libertad entre los nodos de dos regiones para que no haya movimiento relativo entre ellas, y es una opción aconsejada (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013) cuando las mallas creadas en las superficies de las regiones puedan ser diferentes.

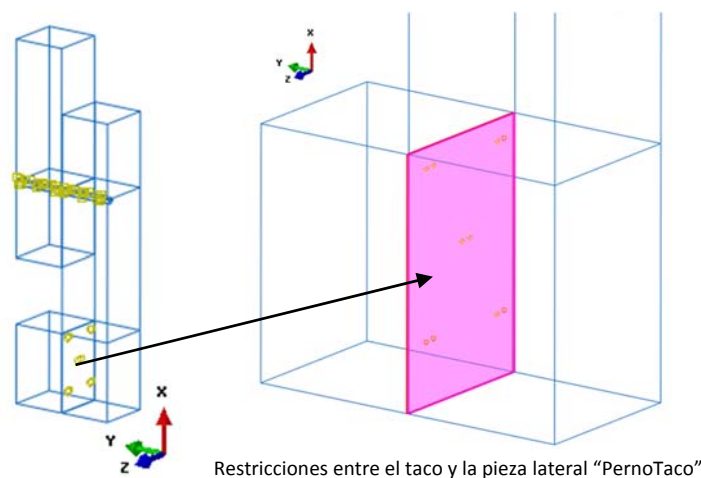
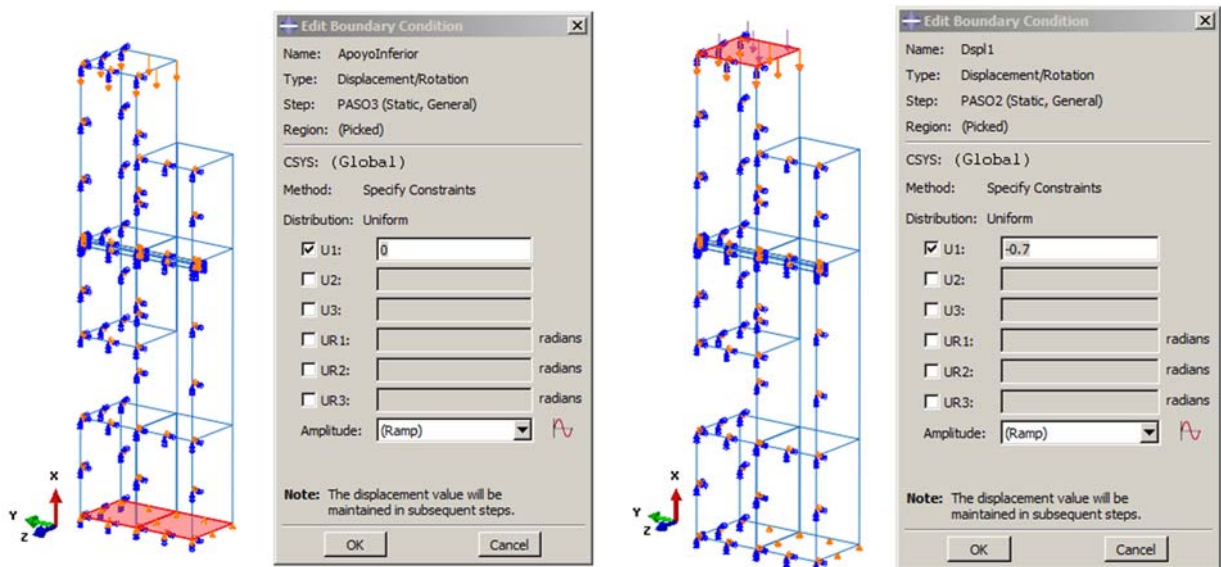


Figura 4-27. Interacción y restricciones entre superficies: madera-clavija.

4.4.2.6 Condiciones de contorno y aplicación de carga sobre la unión: módulo *Load*

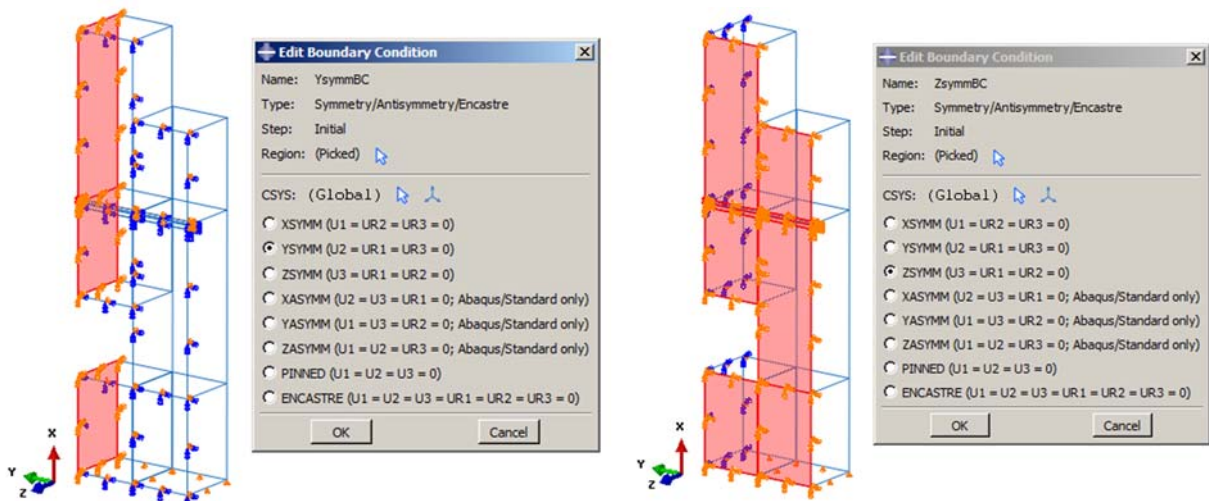
Con el módulo *Load* se definen las condiciones de contorno mediante la opción *BCs* y las cargas a aplicar sobre la unión mediante la opción *Loads*. Ambas pueden activarse y desactivarse en los diferentes pasos de la simulación numérica. Las condiciones de contorno se exponen en la Figura 3-33 y son:

- Restricciones de movimiento en la dirección “X” ($U1 = 0$) en el plano inferior de apoyo de las piezas laterales de espesor t_1 y en el taco que las une. Se etiqueta como “ApoyoInferior”.
- Simetrías que se dan planos verticales del sistema de referencia global y son:
 - Simetría en el plano perpendicular al eje “Y”. Anula el desplazamiento en la dirección del eje Y y los giros en los ejes X y Z de valor nulo ($U1 = UR1 = UR3 = 0$) en el plano central de simetría. Se etiqueta como “YsymBC”.
 - Simetría en el plano perpendicular al eje Z. Anula el desplazamiento en la dirección del eje Z y los giros en X y en Y ($U3 = UR1 = UR2 = 0$) en el plano central de simetría. Se le llama “ZsymBC”.
- Desplazamiento en la superficie superior de la pieza central ($U1$) de valor -0,7, -15 y -60 mm respectivamente, como ya se indicó en el módulo *Step*. Etiquetados como “Dspl1”, “Dspl2” y “Dspl3” se aplican en pasos sucesivos. La Figura 4-23 refleja la edición del primero de ellos llamado “Dspl1”.



Restricción de movimiento por empotramiento “ApoyoInferior”

Movimiento de deslizamiento “Dspl1”



Primer plano de simetría “YsymBC”

Segundo plano de simetría “ZsymBC”

Figura 4-28. Zonas de aplicación de las condiciones de contorno.

Aplicando condiciones de simetría en los ejes “Y” y “Z” según se muestra en la Figura 4-29 se puede reducir la cantidad de cálculos a realizar (Fueyo et al., 2009, B), con el consiguiente ahorro de nodos y, por lo tanto, de tiempo de cálculo.

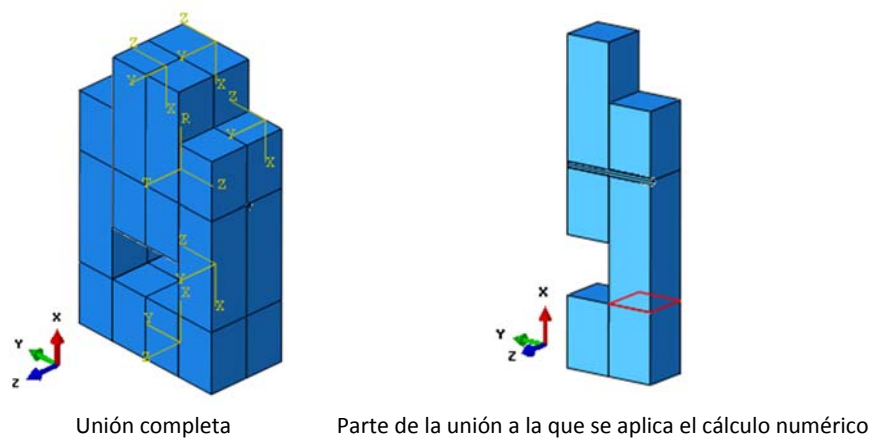


Figura 4-29. Problema simplificado aplicando la doble simetría.

La carga aplicada a la unión se introduce mediante la opción “Loads”, como una presión trabajando sobre la superficie superior de la pieza central de madera (correspondiente al set “SetDISPL” representado en la Figura 4-20). Esta presión se calcula según la Ecuación 4-39, teniendo en cuenta la carga que llega a la unión desde el resto de la estructura, la cual se divide entre el área sobre la que se aplica. La capacidad de carga por plano cortante y elementos de fijación ($F_{v,Rk}$) se calcula según se vio Ecuación 4-11 considerando la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), con el objetivo de estudiar las tensiones en el estado límite último. Para las dimensiones y tipo de madera particulares del modelo de unión estudiado, la presión relacionada con la capacidad de carga toma un valor de:

$$\text{Presión}_{(2F_{v,Rk})} = \frac{2 \cdot F_{v,Rk}}{t_2 \cdot h_2} = \frac{\left(\frac{2 \cdot F_{v,Rk}}{4} \right)}{\left(\frac{t_2}{2} \right) \cdot \left(\frac{h_2}{2} \right)} = \frac{2 \cdot 4.978}{160^2} = 0,3889 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Ecuación 4-39

Atendiendo a la norma de cálculo estructural (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), no hay restricciones de movimiento para determinar los estados límite en la estructura real; sin embargo, para ensayos de uniones con elementos de fijación mecánicos (UNE-EN 26891, 1992) sí se limita el deslizamiento máximo que puede tener la unión con un valor de 15 mm, constante e independiente de las dimensiones de la unión. Las condiciones de empotramiento y simetría actúan desde el paso *Initial*, mientras que el desplazamiento de aproximación se aplica en el PASO1 ($U1 = -0,7$ mm), la presión se aplica en el PASO 2 y los desplazamientos $U1 = -15$ mm y $U1 = -60$ mm se aplican en el PASO 3 y el PASO 4 respectivamente.

4.4.2.7 Generación de la malla de elementos finitos: módulo *Mesh*

Una vez especificadas las cargas y las condiciones de contorno, el siguiente paso es definir la malla para las partes que van a ser sometidas al proceso de simulación, haciendo uso del módulo *Mesh*. Como ya se indicó, en este modelo el tamaño de la malla se reduce gracias a los planos de simetría. El mallado requiere una serie de pasos:

1. Crear unos puntos, que Abaqus® denomina “semillas”, en las posiciones de las aristas de las particiones donde se desea que existan nodos. Para ello se usa el comando *Edge* con la opción *Seed*.
2. Generar la malla, para lo cual se ejecuta la orden *Part* del módulo *Mesh*.

Las semillas que describen la posición de los nodos se establecen con la opción *Seed Part* y permite la posterior creación de la malla de elementos finitos. Se investigaron distintas mallas utilizando la herramienta *partition* de Abaqus®, que permite dividir todo el modelo en distintas zonas para mallarlas independientemente. En todos los casos, la interconexión entre las mallas es continua, pero el número, el tamaño y la distribución de los elementos es diferente para las distintas zonas. El objetivo es obtener una malla con el número mínimo de elementos, con el fin de disminuir el tiempo de cálculo del sistema, pero que pueda dar resultados suficientemente buenos. Esto se puede conseguir utilizando una malla grosera en las áreas sin importancia, lejos de la zona de contacto, y una malla muy fina en las áreas de especial interés, como son las cercanas a la zona de contacto. Por ese motivo, se hace uso de un sembrado general por tamaño (cada 16 mm) para el conjunto del modelo, mientras que en los ejes que definen las superficies de contacto entre clavija y piezas de madera se ajusta el tamaño de malla con una mayor densidad, aumentando la colocación de semillas y haciéndolo por número (en lugar de por tamaño) en la dirección tangencial de la clavija y del agujero hasta llegar a los 14 nodos por curva. En la Figura 4-30 se pueden ver el resultado del sembrado de nodos y los elementos a que dan lugar. También se aprecian los detalles del mallado en las piezas de madera central y en la clavija como consecuencia de aumentar el número de semillas. Este aumento en la densidad de los nodos mejora la convergencia en el proceso de simulación y la precisión en los resultados obtenidos.

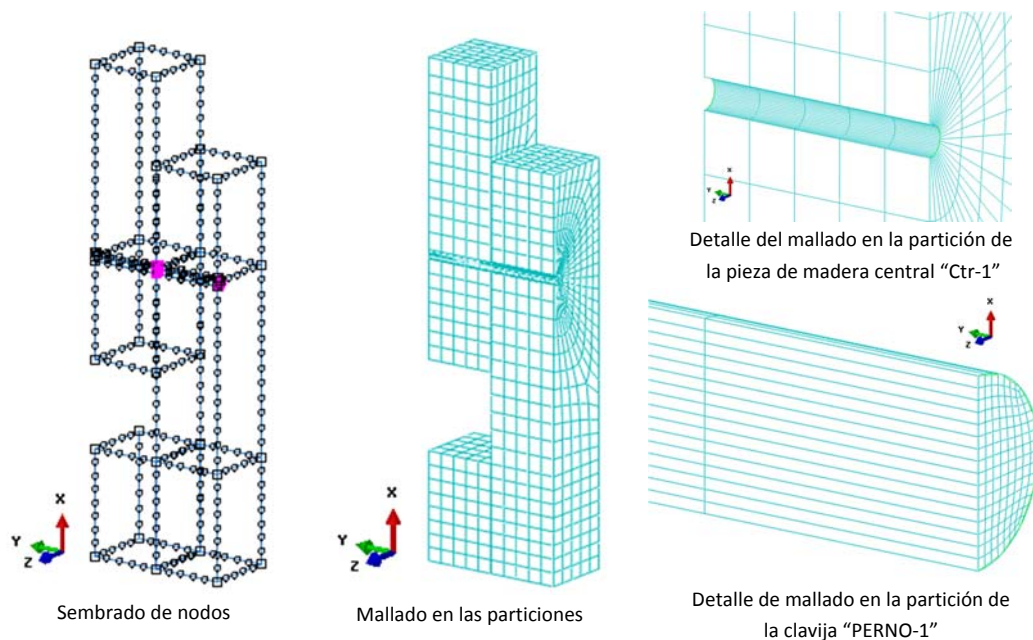


Figura 4-30. Proceso de siembra de nodos, mallado y detalles.

Establecidas las posiciones de los nodos, se pasa a definir el tipo de elementos finitos mediante la opción *Mesh Controls*. Los elementos finitos integrados en Abaqus® se caracterizan por cinco factores (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013):

- Familia: sólido (C), lámina (S), viga (B), rígido (R), barra (T), etc.
- Número de grados de libertad de cada nodo.
- Número de nodos: Si sólo tiene nodos en los vértices [por ejemplo, el hexaedro sólido de 8 nodos de la Figura 4-31 (a)], se habla de elemento lineal o de primer orden, porque las funciones de interpolación que utiliza son lineales. Si, además, contiene nodos en el centro de las aristas [por ejemplo, el hexaedro de 20 nodos de la Figura 4-31 (b) o el tetraedro de 10 nodos de la Figura 4-31 (c)], se denomina elemento cuadrático o de segundo orden, dado que entonces las funciones de interpolación son polinomios de orden 2.
- Formulación: Puede ser Lagrangiana (cuando el material está unido al elemento y que es la que se usa por defecto) o Euleriana (que supone el elemento fijo en el espacio y el material fluye a través de él).

- Integración: La configuración por defecto supone que, al realizar las integrales necesarias para calcular los coeficientes de las matrices de rigidez de los elementos, en los elementos lineales se utilizan 2 puntos de Gauss en cada dirección y 3 puntos en los elementos cuadráticos [Figura 4-31 (a)]. Se puede reducir el tiempo de cálculo utilizando un punto de Gauss menos en cada dirección [Figura 4-32 (b)], hablándose entonces de integración reducida (R).



Figura 4-31. Elementos finitos según el orden de su función de forma (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013).

Los elementos se nombran de la siguiente manera: la primera letra indica a qué familia pertenece (C, S, B, R, T, etc.), las dos siguientes están relacionadas con su dimensión (3D para tridimensionales, AX si es axil simétrico, PE indica deformación plana y PS tensión plana). De ser necesarias, se añaden letras a continuación para características particulares (formulación, técnica de integración, etc.). Por ejemplo, C3D8 corresponde a un elemento sólido tridimensional de 8 nodos [Figura 4-31 (a)], o CPS8R indica un elemento sólido bidimensional para tensión plana (*plane stress*) con 8 nodos que usa integración reducida [Figura 4-32 (b)].

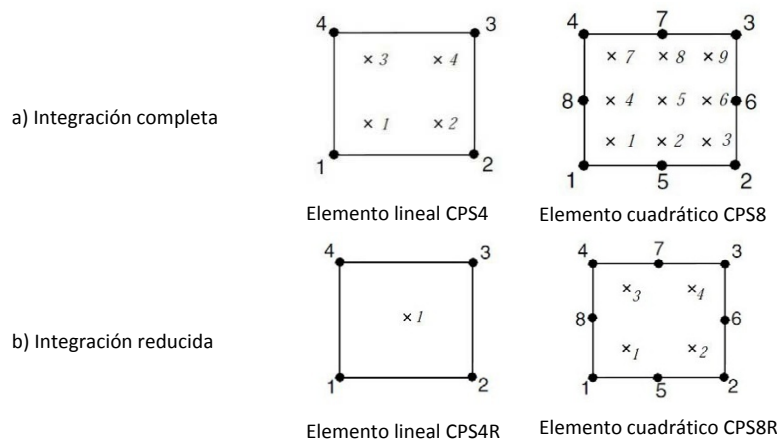


Figura 4-32. Elementos finitos según el tipo de integración (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013).

A la hora de elegir el tipo de elemento finito, el manual de Abaqus® (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013) indica que se debe tratar de reducir al máximo la distorsión de la malla. Para ello, en modelos tridimensionales, recomienda:

- Usar elementos con forma de hexaedro, también llamados *brick* (Figura 4-31).
- En las regiones donde existan concentraciones de tensiones (como la zona de contacto de madera con clavija) es conveniente usar elementos cuadráticos, ya que proporcionan una mejor resolución de los gradientes de tensión.
- Si la pieza trabaja predominantemente a flexión, como en este caso de la clavija, dichos elementos se ajustan mejor a la deformación por tener nodos en los puntos intermedios (Figura 4-33, abajo). En los elementos lineales (con sólo nodos en los vértices), las caras se mantienen planas, siendo por tanto elementos demasiado rígidos para describir la flexión (Figura 4-33, arriba).

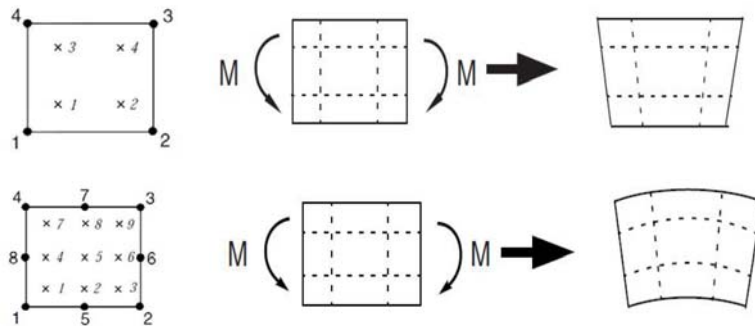


Figura 4-33. Comportamiento en flexión de elementos lineales y cuadráticos (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013).

La malla de elementos finitos puede obtenerse básicamente mediante tres técnicas de mallado: estructurado, de barrido y libre (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013). La más recomendable es la primera, pues permite controlar perfectamente el patrón de la malla. Abaqus® usa diferentes colores para indicar qué técnica es posible dentro de las diferentes secciones de mallado. En el caso de la unión estudiada, se observa la disposición de un mallado estructurado. Si la sección apareciera de color naranja, indicaría la necesidad de realizar más particiones.

Se investigó el empleo de elementos lineales o cuadráticos. El uso de elementos cuadráticos supone más carga en el cálculo del sistema pero permiten una malla menos densa, frente al caso de elementos lineales donde la carga de computación es menor, por la simplicidad del tipo de elemento, pero requiere mayor densidad de mallado. Para el mallado descrito anteriormente se ha optado por elementos de tipo sólido (C) con tres grados de libertad, lineales y hexaédricos definidos como C3D8 por la librería Standard de Abaqus®, aunque puede ajustarse estos elementos fundiendo alguno de los nodos y transformándolos a los de tipo C3D6 y C3D4 de cuña o de lámina, que se ajustan a zonas de geometrías muy complicadas. Para este modelo, el sistema de mallado automático de Abaqus® sólo ha necesitado emplear los de tipo C3D8. En la Tabla 4-4 se describen el tipo y número de elementos, así como el número de nodos del mallado.

Tabla 4-4. Relación de tipo y número de elementos y número de nodos para las distintas instancias.

Instancia	Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos
Central	C3D8	1.130	1.608
Lateral	C3D8	1.290	1.848
Clavija	C3D8	1.260	1.639
Taco	C3D8	200	324
Total		3.880	5.419

4.4.2.8 Definición del trabajo y ejecución del cálculo: módulo Job

Una vez definida la malla, haciendo uso del módulo *Jobs*, se crea el trabajo que da lugar al archivo *input file* (con extensión **.inp*), que se lanza al procesador para su cálculo. La gestión de este módulo permite el trabajo con múltiples procesadores, siempre que la licencia de Abaqus® no lo limite. También se seleccionan aquí las subrutinas cuando el modelo hace uso de éstas. Éste es el caso, ya que se ha incluido una para modelizar el comportamiento de la madera. Para relacionarla con el trabajo, es necesario indicar en el cuadro de edición del mismo (desde la solapa “General”) la ruta y el nombre del archivo que contiene la subrutina.

En el Anexo B2 se facilita una copia del archivo que permite generar el modelo (con extensión **.cae*) para su simulación y el archivo resultante del proceso de cálculo del módulo *Job* (con extensión **.odb*). Se puede verificar que está toda la información necesaria definida para ejecutar el trabajo con la opción *Data Check*, y ejecutar el proceso de cálculo con la opción *Submit*. La opción de *Results* permite pasar al módulo de *Visualización*, teniendo en cuenta que los resultados están relacionados (con el archivo de extensión **.odb*) que se haya creado.

4.4.2.9 Visualización gráfica de resultados: módulo *Visualization*

Como se indicó en el apartado anterior, para visualizar los resultados es necesario tener abierto el archivo *.odb bien una vez ejecutado el trabajo, o bien desde el módulo Visualización. La Figura 4-34 muestra los resultados de simulación del modelo en lo referente a las tensiones normales en la dirección del eje “X”, que quedan denotadas en Abaqus® como S11. Desde este módulo se extraen los distintos datos y gráficas, que serán desarrollados en el Capítulo 6, correspondiente a los resultados.

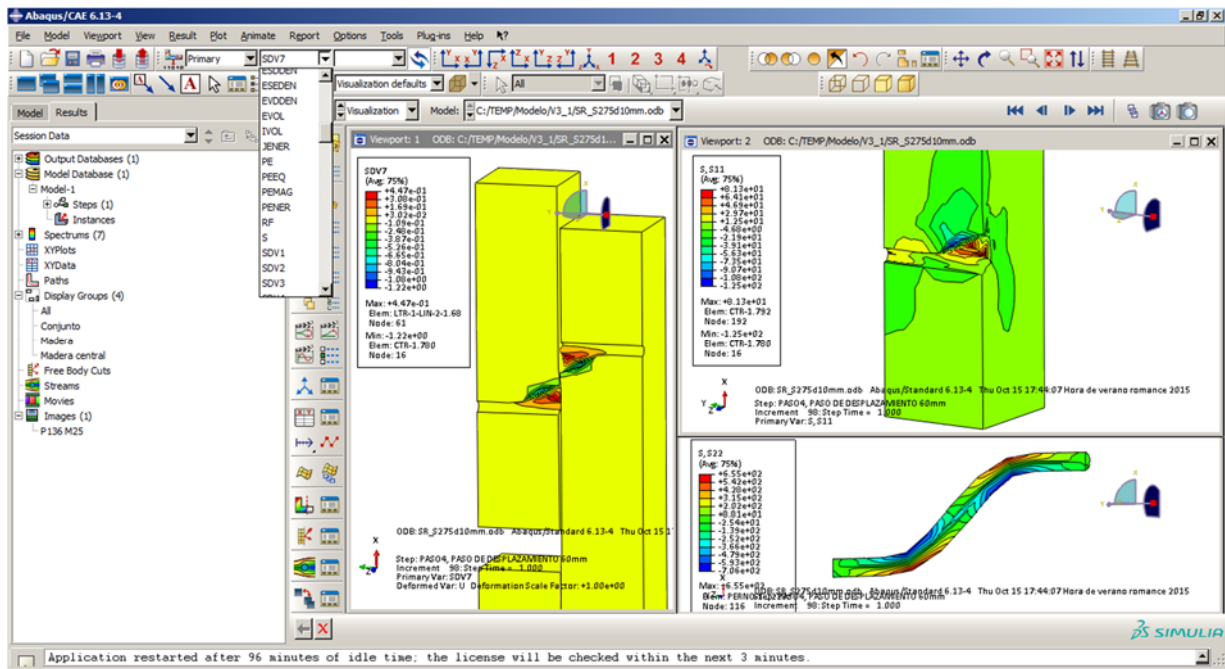


Figura 4-34. Opciones de visualización.

4.4.2.10 Estructura de scripts y lenguaje *Python*®

Como ya se indicó previamente, todas las órdenes introducidas a través de los menús de Abaqus® quedan recogidas en un lenguaje de programación interpretado, llamado *Python*, que facilita un código legible donde es posible agrupar todas las sentencias necesarias, en uno o varios archivos. Permite componer las instrucciones que se van visualizando en el archivo *abaqus.rpy* a medida que se realizan con la interfaz gráfica Abaqus/CAE, para ser copiadas en nuevos archivos de órdenes o *scripts* de extensión *.py con objeto de ejecutarse de forma rápida desde el área de introducción de comandos (por ejemplo, para componer de nuevo el modelo recreando de forma rápida las operaciones descritas anteriormente en los apartados de cada módulo). También permite llegar a un punto concreto del procedimiento sin necesidad de repetir todos los pasos previos en Abaqus/CAE, o incluso realizar cambios a nivel de programación para ejecutar variantes del modelo. De hecho, ésta es la forma habitual de trabajo por las múltiples ventajas que conlleva.

En la Figura 4-35 se muestra, a modo de ejemplo, una porción del código *Python*®; en particular, la que genera la pieza PERNO en el módulo *Part*.

```

91 #make part: PERNO
92 s0 = mdb.models['Model-1'].Sketch(name='__profile__', sheetSize=200.0)
93 g, v, d = s0.geometry, s0.vertices, s0.dimensions
94 s0.sketchOptions.setValues(sheetSize=200.0, gridSpacing=5.0, grid=ON,
95 gridFrequency=2, constructionGeometry=ON, dimensionTextHeight=5.0,
96 decimalPlaces=2)
97 s0.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
98 s0.CircleByCenterPerimeter(center=(0.0, 0.0), point1=((DowelDiameter)/2, 0.0))
99 p = mdb.models['Model-1'].Part(name='PERNO', dimensionality=THREE_D,
100 type=DEFORMABLE_BODY)
101 p = mdb.models['Model-1'].parts['PERNO']
102 p.BaseSolidExtrude(sketch=s0, depth=3.0+t1+1.0+t2+1.0+t1+3.0)
103 s0.unsetPrimaryObject()
104 p = mdb.models['Model-1'].parts['PERNO']
105 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
106 del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']

```

Figura 4-35. Sentencias de código en Python®.

4.4.3 Subrutina para describir el comportamiento mecánico de la madera

Trabajar con la madera en tres dimensiones supone enfrentarse a modelizar un comportamiento mecánico complejo debido a su composición microestructural a base de fibras alargadas alineadas en la dirección del tronco y unidas entre sí transversalmente, con diferentes módulos elásticos según la dirección en que se midan y también con distintos límites elásticos en las diferentes direcciones. Además, no sólo la dirección afecta el valor de estas últimas características mecánicas, sino que también varían si los esfuerzos a los que se la somete son de tracción o de compresión.

El problema de la unión con clavija está expuesto a solicitaciones combinadas y, en las zonas de contacto entre la madera y la clavija, aparecen en mayor o menor medida todos los tipos de esfuerzos: paralelo y perpendicular a la fibra, tanto en tracción como en compresión. La aparición de tensiones perpendiculares a la fibra es especialmente peligrosa en el caso de que sean de tracción, debido a la baja resistencia del material ante este tipo de esfuerzos, lo que ratifica la necesidad de definir lo mejor posible el comportamiento de la madera frente a este tipo de esfuerzos, como se ha indicado al describir la configuración desde el módulo *Materials* (véase Apartado 4.4.2.2).

La simulación numérica con elementos finitos en Abaqus® cuenta con una amplia librería de materiales, entre ellos, los que describen los comportamientos elasto-plásticos ortotrópicos según el criterio de Hill, pero que no contempla límites elásticos diferentes a tracción o compresión. Por ello, se hace necesario utilizar herramientas avanzadas que permitan definir expresamente un modelo lo más aproximado posible. Abaqus® dispone de la posibilidad de conectarse a través de un entorno de programación con subrutinas de usuario, denominadas UMAT (de User MATerial), desarrolladas *ad hoc* para describir otros comportamientos posibles. En este apartado se expone el planteamiento para modelizar el comportamiento mecánico de la madera mediante una subrutina UMAT expresamente programada para este fin por un equipo de trabajo, con el fin de ajustar el comportamiento de la madera a las relaciones de ortotropía descritas (véase Apartado 2.2.3.6).

La subrutina se vincula con Abaqus® a través del módulo *Jobs* (véase Apartado 4.4.2.8) y ha sido desarrollada en el lenguaje Fortran® (Formula Translating System) en su versión 2008. Se trata de un lenguaje de programación de alto nivel que ha venido siendo utilizado en aplicaciones científicas y de ingeniería, y puede ser ejecutado relacionando las variables del material definido por el usuario desde el módulo *Materials* de Abaqus® con un archivo externo de extensión *.for. Las variables que se introducen desde Abaqus® están orientadas a establecer una relación entre las tensiones y las deformaciones (véase la Ecuación 2-2 y la Ecuación 2-3) y los valores característicos y límites en el comportamiento de la madera. El proceso numérico desarrolla una simulación del comportamiento de la madera frente a estados de carga o desplazamientos tridimensionales en sus tres direcciones de ortotropía: la dirección longitudinal paralela a la fibra (L), la radial coincidente con la dirección del radio del tronco del árbol (R) y la tangencial (T) que es perpendicular a las dos anteriores. Dicho comportamiento se caracteriza por los módulos

elásticos longitudinales E_L, E_R, E_T , transversales G_{TL}, G_{LR}, G_{RT} , y los coeficientes de Poisson $\nu_{TL}, \nu_{LT}, \nu_{RT}, \nu_{TR}, \nu_{RL}, \nu_{LR}$, cuyas relaciones se establecen en el Apartado 2.2.3.6. Teniendo en cuenta que se ha propuesto un modelo de unión (Tabla 4-1) realizado con una madera laminada homogénea GL24h, los valores numéricos asociados al comportamiento de la misma son los descritos en el Apartado 3.4.1.

La curva tensión-deformación típica del ensayo uniaxial en la dirección “i” de una probeta de madera tiene la forma indicada en la Figura 4-36. Durante el proceso de carga, en primer lugar aparece la zona de comportamiento elástico lineal “0-a”, caracterizado porque las deformaciones desaparecen al cesar las cargas y porque las tensiones y deformaciones están relacionadas por la ley de Hooke ($\sigma_i = E_i \cdot \epsilon_i$), que relaciona la tensión de trabajo (σ_i) con el módulo elástico, siendo (E_i) y la deformación (ϵ_i) en la dirección (i) objeto de estudio. A partir del punto “a”, cuya tensión se denomina límite elástico o resistencia de fluencia (f_i), se alcanza el tramo plástico, que implica deformaciones permanentes en caso de descarga b-c. Tras una recarga c-b, el límite elástico ha aumentado al valor de la tensión en el punto b, caracterizándose este proceso de endurecimiento por la pendiente de esta curva. Si la pendiente es nula, la curva “a-d” es una recta horizontal, denominándose el comportamiento como perfectamente plástico. En un punto cualquiera d del tramo plástico, la deformación unitaria (ϵ_i) puede descomponerse en una parte elástica (ϵ_i^e) y otra plástica (ϵ_i^p).

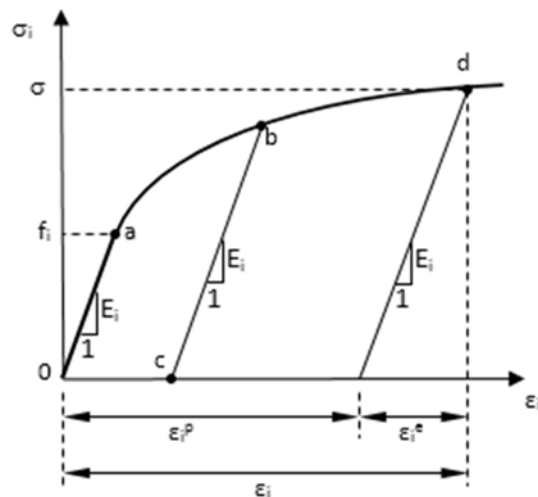


Figura 4-36. Carga y descarga en una dirección (i) para la superficie de plastificación.

Para facilitar el desarrollo y la programación numérica de la subrutina, en lo que resta de este apartado se hace uso del la notación vectorial de Voigt (véase Tabla 2-7), por lo cual:

- Los ejes L, R y T pasan a denotarse como 1, 2 y 3, respectivamente.
- Las tensiones cortantes se denominarán $\tau_{LR} = \sigma_4$, $\tau_{LT} = \sigma_5$ y $\tau_{RT} = \sigma_6$.
- Las deformaciones angulares se denominarán $\gamma_{LR} = \epsilon_4$, $\gamma_{LT} = \epsilon_5$ y $\gamma_{RT} = \epsilon_6$.

Para definir el comportamiento mecánico en un caso general tridimensional, son necesarias básicamente tres cosas:

- Ley de comportamiento elástico.
- Criterio de plastificación, que marca el inicio de las deformaciones plásticas.
- Ley de comportamiento plástico, conocido como regla de flujo plástico, junto con la ley de endurecimiento del material.

La ley de comportamiento elástico supone la generalización de la ley de Hooke. En el caso de un material ortotrópico como la madera, lleva a unas relaciones lineales entre las tensiones y las deformaciones elásticas. Éstas se expresaron de manera matricial en los ejes de ortotropía mediante la Ecuación 2-2.

El criterio de plastificación indica la situación a partir de la cual aparecen las primeras deformaciones plásticas. En el caso de un ensayo uniaxial, corresponde al punto de la Figura 4-36, cuya tensión (f_i) marca el límite de comportamiento: es elástico si $\sigma_i < f_i$ y comienza la plastificación cuando $\sigma_i = f_i$. La cuestión se complica al considerar tensiones biaxiales, pues el criterio de plastificación se transforma en una función $F(\sigma_i, f_i) = 0$, que relaciona las tensiones y los límites elásticos en las dos direcciones, y representa una curva en el espacio de las tensiones perpendicular a uno de los ejes, por ejemplo σ_3 , lo que da lugar a una función de σ_1 y σ_2 . Más aún, cuando las tensiones son triaxiales, donde el criterio de plastificación se corresponde con una superficie en el espacio de las tensiones σ_1, σ_2 y σ_3 . La Figura 4-37 representa la sección de dicha superficie por el plano $\sigma_3 = 0$. Esta superficie queda definida por una función de las componentes de tensiones. De manera genérica se cumplirá lo siguiente: Si $F < 0$, el comportamiento es elástico, iniciándose la plastificación cuando $F = 0$.

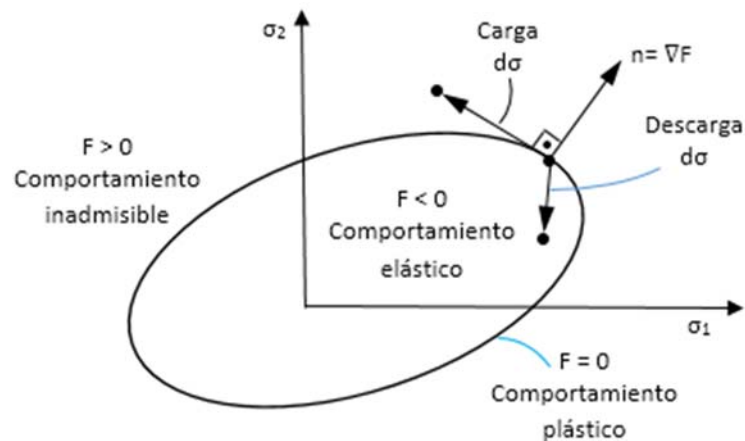


Figura 4-37. Carga y descarga en una sección perpendicular a la dirección de σ_3 .

Para un material que presenta un comportamiento de tipo elasto-plástico ortotrópico, uno de los criterios de plastificación utilizados es el propuesto en 1948 por Hill, que puede expresarse según la Ecuación 4-40, a partir del cual se centrará el desarrollo de la subrutina.

$$F(\sigma_i, f_i) = \sigma_{coH}(\sigma_i, f_i) - \sigma_{ref} = 0$$

Ecuación 4-40

Siendo:

- σ_{coH} tensión de comparación con el criterio de Hill.
- f_i tensiones de plastificación o resistencias características de la madera.
- σ_{ref} tensión de plastificación de referencia.

La tensión de plastificación de referencia debe obtenerse a partir de las resistencias de fluencia y da lugar a los coeficientes de Hill F_{ii} y N_i , que a su vez se componen en una matriz $[P]$ para obtener la tensión de comparación (σ_{coH}).

Una vez que se alcanza la superficie de plastificación $F(\sigma_i) = 0$, el proceso presenta dos posibilidades (Figura 4-37):

- Que se produzca una descarga, volviendo a la zona elástica (interior de la superficie de fluencia), de manera que $F(\sigma_i + d\sigma_i) < 0$.
- Que el estado de tensiones varíe por una redistribución entre las diferentes tensiones dando lugar a un nuevo punto de tensión en la superficie de plastificación, de manera que $F(\sigma_i + d\sigma_i) = 0$.

De la misma forma que en el ensayo uniaxial, tras la recarga “c-b” (Figura 4-36), el límite elástico (f) aumenta por endurecimiento, en el caso general tridimensional, como el punto no puede salir de la superficie de fluencia por la condición de consistencia, una recarga implica que aumenta el tamaño de la superficie de fluencia o varía su posición. En el primer caso se habla de endurecimiento isotrópico, mientras que el segundo es conocido como cinemático (Figura 4-38). En general, el endurecimiento puede ser una combinación de ambos tipos. Para el caso particular donde pueda considerarse que la superficie de fluencia no varía de tamaño ni de posición, se hablaría de comportamiento perfectamente plástico.

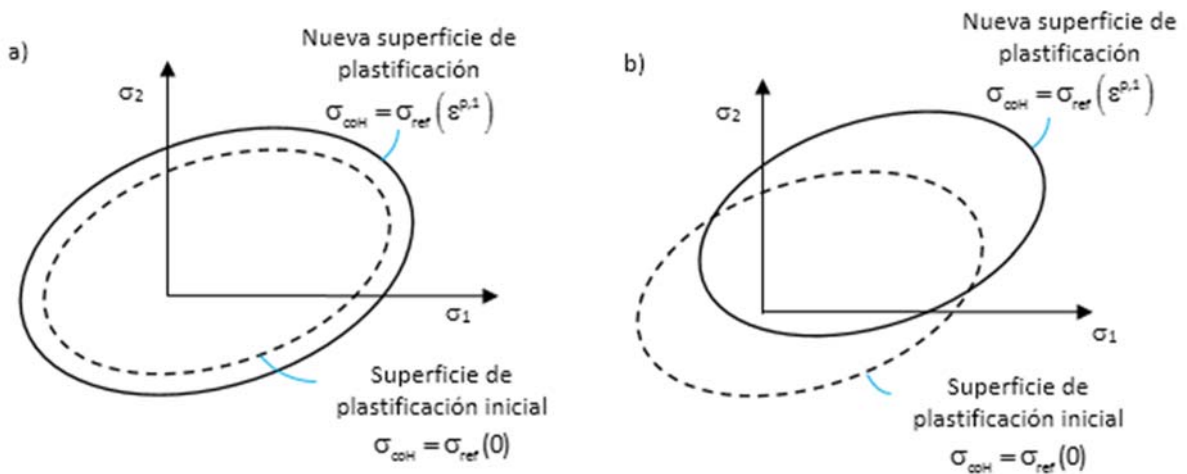


Figura 4-38. Endurecimiento isotrópico a) y cinemático b).

El tipo de endurecimiento que puede utilizarse depende de cómo se comporte cada material. En este trabajo se considerará, como suele ser habitual, que el endurecimiento es solamente isotrópico, que resulta más fácil de modelizar pues para caracterizarlo basta un único parámetro. Con este fin, se toma una variable que describa el estado de deformaciones plásticas en conjunto, denominada deformación plástica de comparación (ϵ_{co}^p), cuya expresión es función de las componentes de las deformaciones plásticas ϵ_i^p ($i=1, \dots, 6$). El aumento de tamaño de la superficie de fluencia se refleja en la tensión de plastificación de referencia mediante la ley de endurecimiento σ_{ref} (ϵ_{co}^p) siendo el criterio de fluencia (F) función de la tensión de comparación (σ_{coh}) y de la deformación plástica de comparación (ϵ_{co}^p).

La ley de comportamiento de deformaciones plásticas, conocida como regla de flujo asociada, establece una relación de proporcionalidad entre la variación de las deformaciones plásticas y el gradiente de la función de fluencia, según la Ecuación 4-41, e indica que la variación ($d\epsilon_i^p$) se debe producir en la dirección perpendicular a la superficie de fluencia, estando relacionado el parámetro plástico ($d\lambda$) con el tamaño de dicha variación.

$$d\epsilon_i^p = d\lambda \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma_i}$$

Ecuación 4-41

El método de cálculo numérico aplicado requiere una formulación incremental. Como las deformaciones plásticas en cualquier instante dependen de la historia previa de todo el proceso de carga, la simulación numérica debe seguir dicho proceso mediante sucesivos incrementos. Supongamos que en un instante dado las tensiones y deformaciones en un cierto punto son σ_i^0 y ϵ_i^0 ($i = 1, \dots, 6$) y se produce un incremento de deformación ($\Delta\epsilon_i$), el objetivo es obtener las tensiones (σ_i) y deformaciones (ϵ_i) tras dicho incremento. Se debe distinguir si el incremento se produce en la zona elástica, en la plástica o supone el paso de la primera a la segunda.

En la situación general, el incremento de deformación consta de una parte elástica y otra plástica que en el caso general, responde a la Ecuación 4-42.

$$\Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_i^0 = \Delta \varepsilon_i^e + \Delta \varepsilon_i^p \quad \text{con } i = 1, \dots, 6$$

Ecuación 4-42

Teniendo en cuenta la matriz de rigidez (D) que relaciona tensiones y deformaciones (véase Ecuación 2-3), se puede establecer la Ecuación 4-43.

$$\Delta \sigma_i = \sigma_i - \sigma_i^0 = D_{i,j} \cdot \Delta \varepsilon_j^e \quad \text{con } i,j = 1, \dots, 6$$

Ecuación 4-43

Teniendo en cuenta la ecuación anterior y el desarrollo que se puede hacer sobre la regla del flujo plástico se llega a la Ecuación 4-44.

$$\sigma_i = \sigma_i^0 \cdot D_{i,j} \Delta \varepsilon_j^e - \Delta \lambda \cdot D_{i,j} \cdot n_j \quad \text{con } i,j = 1, \dots, 6$$

Ecuación 4-44

La tensión σ_i puede dividirse en dos partes, teniendo en cuenta que si se prueba con un nuevo valor de la tensión σ_i^{prue} que está fuera de la zona de comportamiento elástico, éste valor debe ser corregido. Esta separación implica calcular las tensiones mediante dos etapas:

- Predicción elástica. A modo de prueba, se determinan las tensiones de prueba (σ_i^{prue}) mediante la Ecuación 4-45, que corresponde a suponer que toda la deformación ($\Delta \varepsilon_i$) es elástica. Con ellas se evalúa la función de Hill (Ecuación 4-40): si $F(\sigma_i^{\text{prue}}) < 0$, entonces el punto de prueba se encuentra dentro de la zona elástica, no hay componente plástica en las deformaciones ($\Delta \varepsilon_i^p = 0$) y el incremento finaliza con $\sigma_i = \sigma_i^{\text{prue}}$.
- Corrección plástica. Por el contrario, si $F(\sigma_i^{\text{prue}}) > 0$, el punto de prueba se encuentra fuera de la zona elástica. Debe por tanto corregirse, hasta trasladarlo a la superficie de fluencia $F(\sigma_i) = 0$, y cumplir así la condición de consistencia, para lo que se utiliza la Ecuación 4-46. Durante el incremento, puede haber aumentado el tamaño de la superficie de fluencia debido al endurecimiento del material.

$$\sigma_i^{\text{prue}} = \sigma_i^0 + D_{i,j} \cdot \Delta \varepsilon_i \quad \text{con } i,j = 1, \dots, 6$$

Ecuación 4-45

$$\sigma_i = \sigma_i^{\text{prue}} - \Delta \lambda \cdot D_{i,j} \cdot n_j \quad \text{con } i,j = 1, \dots, 6$$

Ecuación 4-46

Este proceso que hace uso de una predicción elástica de prueba y, en el caso de que el resultado se salga de la zona de comportamiento elástico, la correspondiente corrección plástica, se identifica como algoritmo de retorno y se muestra gráficamente en la Figura 4-39.

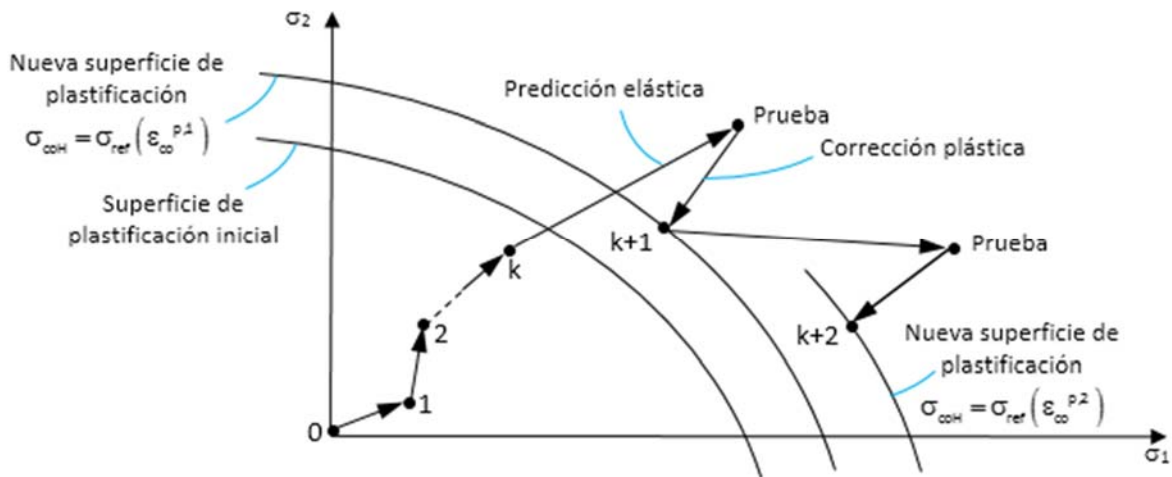


Figura 4-39. Representación del proceso de carga con el algoritmo de retorno.

La subrutina UMAT debe tener unas variables concretas de entrada y salida (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013). Las de entrada básicamente son las tensiones (σ_i^0), las deformaciones elásticas ($\epsilon_i^{e,0}$) y las deformaciones plásticas ($\epsilon_i^{p,0}$) al inicio del incremento, el incremento de deformación ($\Delta\epsilon_i$) y las constantes que caracterizan el comportamiento elasto-plástico del material. Las variables de salida, que debe calcular la subrutina, son esencialmente las tensiones y deformaciones al final del incremento (σ_i , ϵ_i^e , ϵ_i^p) y el operador jacobiano ($J_{i,j}$), según se indica en la Ecuación 4-41.

$$d\Delta\sigma_i = J_{i,j} \cdot d\Delta\epsilon_j$$

Ecuación 4-47

En definitiva, la subrutina UMAT describe el comportamiento de la madera sobre la base del modelo ortótropo elasto-plástico de Hill corregido según lo expuesto en los apartados anteriores. Dicho modelo considera resistencias de fluencia (f_i) distintas en las tres direcciones de ortotropía, pero iguales en tracción y en compresión. La madera, en cambio, presenta resistencias distintas a tracción (f_i^t) y a compresión (f_i^c), que se han establecido a partir de las resistencias características del material ($f_{t,0}$, $f_{t,90}$, $f_{c,0}$, $f_{c,90}$ y f_v). Para resolver la diferencia de resistencias a tracción y a compresión, se ha optado por establecer al principio de la subrutina un condicional que fija un valor distinto si la madera trabaja a tracción o compresión, y utilizar en el cálculo las resistencias que correspondan. Se debe tener en cuenta que en estados triaxiales de tensión puede existir compresión en una dirección y tracción en otra, por lo que es necesario adoptar un criterio que permita decidir si el material en ese punto está trabajando predominantemente a tracción o compresión. Para ello, en cada dirección de ortotropía (i) se ha calculado la ratio adimensional (r_i) según la Ecuación 4-48.

$$r_i = \frac{\sigma_i}{f_i} \quad (i=1,2,3) \quad \text{con} \quad \begin{cases} f_i = f_i^t & \text{si } \sigma_i > 0 \\ f_i = f_i^c & \text{si } \sigma_i < 0 \end{cases}$$

Ecuación 4-48

Después se determina cuál es la mayor ratio en valor absoluto y, si dicha ratio es positiva, se considera que ese punto trabaja predominantemente a tracción. En caso contrario, trabaja a compresión.

La Figura 4-40 muestra un diagrama de flujo de la subrutina empleada.

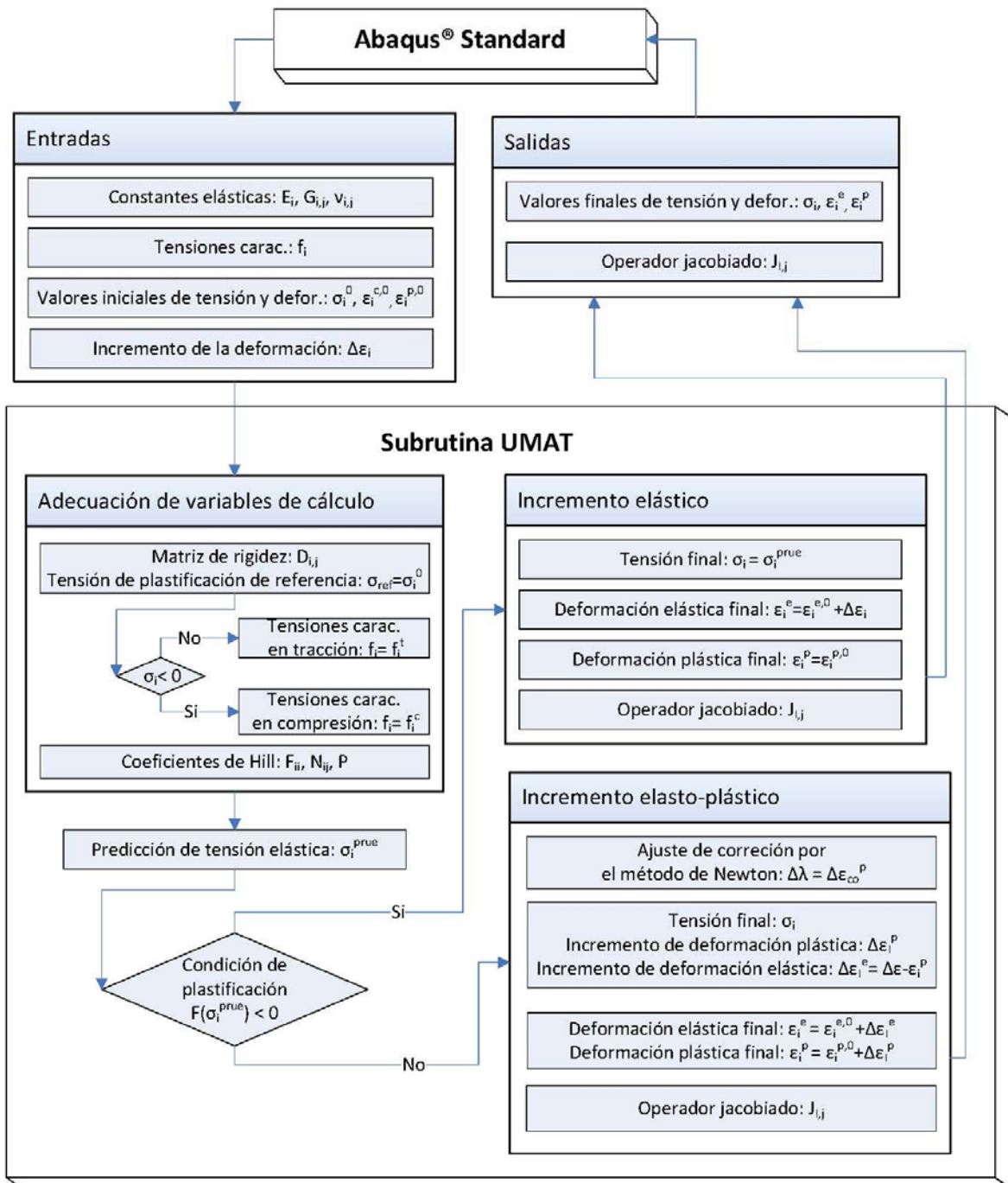


Figura 4-40. Diagrama de flujo para la subrutina para modelizar el comportamiento mecánico de la madera.

5 Metodología de los ensayos realizados

5.1 Introducción

En este capítulo se establecen las bases para la ejecución de los ensayos objeto de estudio. Se comienza revisando los métodos de ensayos para determinar las propiedades mecánicas de la madera y los tratamientos estadísticos que se aplican. A continuación, se muestran distintas configuraciones para las probetas expuestas a carga y la colocación de la clavija en relación con la geometría del conjunto según las normas para particulares ensayos, como el que define la resistencia a aplastamiento por la clavija en la madera. Se recopilan criterios de publicaciones que han trabajado con ensayos para este tipo de uniones para valorar la disposición, el acondicionamiento y las dimensiones de las probetas.

Se identifica de forma detallada la geometría de las probetas que han sido ensayadas, los procesos de fabricación y de montaje, el programa de ensayos (incluyendo la relación completa de probetas) y la notación empleada para describir cada probeta de una forma compacta.

Se explica en procedimiento de ensayo realizado sobre las probetas, los datos y los calculados derivados del ensayo, incluyendo los controles y las verificaciones que garantizan resultados fiables. Se describen las exigencias y las características asociadas a los dispositivos de ensayos, especialmente los relacionados con la calibración. Dado que los ensayos realizados no son comunes, el acoplamiento entre la probeta y la máquina ha requerido herrajes fabricados a medida cuyo diseño también queda establecido.

Se finaliza en capítulo describiendo la salida de resultados que se consigue con los ensayos. Se muestra una curva de carga frente a deslizamiento con las fases que se pueden distinguir en ella a medida que se desarrolla el ensayo. Con el fin de normalizar los resultados, se indica la estructura que deben contener los informes de resultados. Se muestra el programa de gestión a medida, a través del cual se han registrado todos los datos relativos a los ensayos y se han generado los informes. Tanto el programa de gestión a medida con la base de datos de resultados, como los informes de todos los ensayos son facilitados en los anexos correspondientes.

5.2 Métodos de ensayos en madera para uso estructural

Los ensayos sobre uniones de madera tipo clavija suponen una problemática compleja debido a la ortotropía y heterogeneidad de la madera, así como a la influencia de otras variables del entorno (humedad, tiempo de aplicación de la carga, combinación de distintos materiales, patologías, etc.). En términos generales, la normativa ha intentado hacer un análisis independiente de las variables de fallo, entre ellas el aplastamiento de la madera y la flexión de la clavija. Es usual que las normas de algunos países tengan un referente claro sobre normas más antiguas con experiencia reconocida en dicho campo. En este contexto, se pueden citar como ejemplos las normas ANSI de los EEUU, o las normas COPANT en Sudamérica, como modelo de unificación en esta materia (Ariza, 2002).

En el ámbito europeo, las normas tradicionales pertenecían al llamado “enfoque de las tensiones básicas” (probetas de tamaño pequeño y, en general, libres de defectos), basadas en el trabajo con materiales homogéneos como acero y hormigón. Sin embargo, es necesario un tratamiento más cercano a la realidad de la madera estructural. La nueva normativa de ensayos europea aspira a unificar los procedimientos en todos los países de la Unión Europea, por lo cual las normativas nacionales se hallan en proceso de revisión, investigación y mejora.

Para las bases teóricas y prácticas del trabajo con madera en estructuras, se mantiene como referencia el Eurocódigo 5 (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y sus adaptaciones en cada país, como el Documento Básico de Seguridad Estructural en Madera (DB SE M, 2009), en el caso de España. Para generar un lenguaje común en el tratamiento de la madera de uso estructural, se ha definido en la Unión Europea un sistema denominado de “clases resistentes”, (UNE-EN 338, 2010) que establece los conceptos generales sobre el modo de obtener las resistencias características (Hermoso et al., 2007).

Las normativa nacional (DB SE M, 2009) clasifica la madera en dos grupos: aserrada de tipo conífera (representada con la letra "C") y frondosa o angiosperma (con la letra "D"), seguida de un número correspondientes a la resistencia característica a flexo-tracción expresada en MPa (N/mm^2). Los diferentes tipos de madera se tipifican mediante dicha letra, seguida de la resistencia característica a flexo-tracción expresada en MPa (N/mm^2). Existen valores desde C-14 hasta C-28, en coníferas. En el Reino Unido también se han desarrollado ensayos basados en el Eurocódigo 5 para uniones con clavijas en cortadura doble y encoladas (Davis & Claisse, 2001).

Ya han sido revisadas y actualizadas normas como la de "Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas" (UNE-56544, 2011), dando lugar a una clasificación en calidades estructurales basada en los defectos comunes citados, donde las calidades más bajas suponen el "rechazo" para su uso estructural, debiendo ser extensible también al ensayo de la unión tipo clavija. Los trabajos realizados sobre las propiedades resistentes, referidas a la clasificación visual, indican altos porcentajes de rechazo en casos reales que sugieren cambios en la normativa actual (Íñiguez, 2007). La clasificación visual, que utiliza los defectos aparentes de la madera tales como fibra, anillos, nudos, etc. (como se expuso en el Capítulo 2), es similar a la de otros países. Para dicha clasificación se usan los mismos criterios en cada país miembro, sólo varía el ámbito de las especies a las que se aplica. Actualmente se ha estado revisando esta norma (UNE-56544, 2011), dando lugar a calidades estructurales obtenidas de 1ª, 2ª y, según los países, una 3ª, más el "rechazo". Esta norma ha sido sucesivamente cambiada en los últimos años 2003, 2007, 2009 y la actual, de 2011, lo que da una idea de la necesidad de prestar atención a estas modificaciones de cara al desarrollo de los ensayos.

Los cálculos de estructuras reales suponen que en grandes escuadrías de madera es necesario optimizar el diámetro de la clavija para una sección constante de madera. Las clavijas contribuyen significativamente al coste del sistema de ensamblado estructural (Batchelar & McIntosh, 1988), de manera que debe cuidarse especialmente el uso de una proporción adecuada de estos elementos. Se buscan sistemas de unión de tipo clavija que traten de reducir el diámetro de la misma, ya que a mayores tamaños del sistema de unión aumentan las posibilidades de rotura frágil en los componentes de la madera (Guan & Rodd, 2001). Así, el presente capítulo aborda un procedimiento acorde con situaciones reales que se pueden dar sobre el nudo, determinando su resistencia como unión estructural de madera en un caso habitual, la unión mediante clavija en dirección transversal, frente a otros como los realizados en dirección longitudinal a la fibra (Bainbridge et al., 2002).

Para analizar la evolución de la relación entre carga y desplazamiento, se añaden elementos que distribuyen la tensión de aplastamiento de la madera y la deformación plástica de la clavija. Se propone un marco de trabajo para mejorar el rendimiento de la unión con los elementos tipo clavija, modificando distintos parámetros como la densidad o el rozamiento (y con ello, la distribución tensional) en la zona de contacto.

Se pretende mejorar la fiabilidad en las mediciones sobre la unión cuando se emplean distintas técnicas: refuerzos con placas dentadas (Echavarría et al., 2009), expansiones de pernos (Larsen & Jensen, 2000) o inyección de adhesivos en la zona de contacto (Rodd & Leijten, 2003), frente a la flexión simple definida en el Eurocódigo 5 y fundamentada en autores que se han encuadrado en la teoría del rendimiento (Johansen, 1949), (Hilson, 1995). Esta teoría ha sido empleada en el cálculo de uniones tipo clavija, fue desarrollada en Europa en la década de 1940, viniendo a predecir el límite de carga de uniones con diferentes configuraciones mixtas. En América del Norte se la denominó como "European Yield Model" (Rodd & Leijten, 2003). Se exponen los procedimientos de ensayo que faciliten la obtención de resultados acordes con las técnicas de construcción empleadas.

Las condiciones de muestreo e interpretación de los ensayos se dan en la norma (UNE-EN 384, 2004), en la cual se establece, además, la posibilidad de comparar estos ensayos con otros sobre probetas "pequeñas libres de defectos", tal como las cita textualmente. Los ensayos de propiedades mecánicas en la dirección paralela a las fibras y densidad se definen en la norma (UNE-EN 408, 2004) y los ensayos de propiedades en la dirección perpendicular a la fibra y esfuerzos de corte o desgarro se ven en la norma (UNE-EN 1193, 2010).

Gran parte de los ensayos definidos se orientan a determinar las propiedades físicas y mecánicas de la madera de un modo independiente (Blanchet, 2004). Por ejemplo, en tracción paralela a la fibra, para obtener el módulo de elasticidad ($E_{t,0}$) a compresión paralela a la fibra, para calcular el módulo de elasticidad ($E_{c,0}$) de cortante, a flexión, etc. En general, cada muestra suele consistir en un grupo de probetas con características iguales, de los tamaños más representativos (escuadría y longitud) que se pueden obtener para una especie y procedencia.

En todo este proceso se busca una correlación entre clases de madera aserrada estructural y las propiedades de valores característicos, ya sean mecánicas o físicas (caso de la densidad). Esta correlación se acepta para cada grupo de especie, procedencia y calidad. Como consecuencia, se tiene una resistencia característica a flexo-tracción y, con ella, el resto de propiedades necesarias para el cálculo. Dichas correlaciones se publican también en forma de norma, en este caso la (UNE-EN 1912, 2012), y el extracto de la misma se expone en la Tabla 5-1. Por ello, se ensayan las propiedades mecánicas en elementos de tamaño comercial, según las “dimensiones representativas de cada procedencia”, con sus defectos, tal y como se obtienen del aserrado y dimensionado de sus caras.

Tabla 5-1. Relación de especie y resistencia, extracto de norma (UNE-EN 1912, 2012).

CLASE RESISTENTE	PAÍS QUE PUBLICA LA NORMA DE CLASIFICACIÓN	CALIDAD*	NOMBRE COMERCIAL	PROCEDENCIA
D70	Reino Unido	HS HS	Balau Greenheart	Sudeste de Asia Guayana
D60	Países Bajos Reino Unido	A/B HS HS HS	Azobé Ekki Kapur Kempas	Oeste de África Oeste de África Sudeste de Asia Sudeste de Asia
D50	Reino Unido	HS HS HS HS	Keruing Cari Opepe Merbau	Sudeste de Asia Oeste de Australia Este de África Sudeste de Asia
D40	Reino Unido	HS HS HS	Iroko Jarrah Teca	África Este de Australia Sudeste de Asia
D35	-			
D30	-			
* Las calidades relacionadas se especifican en las normas de clasificación relacionadas en el anexo A de la norma (UNE-EN 1912, 2012).				

5.2.1 Métodos de ensayo para la determinación de las propiedades mecánicas

Existe normativa europea que define las propiedades de la madera en lo referente a la determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas (UNE-EN 384, 2004) y (UNE-EN 408, 2004). Ésta especifica métodos de ensayo para las características más importantes, utilizando como probetas las piezas de madera en sus dimensiones reales. Identifica métodos para las propiedades en dirección:

- Paralela a la fibra: ensayo de flexión, compresión y tracción paralelas a la fibra para determinar las resistencias, módulos de elasticidad, contenido de humedad y densidad.
- Perpendicular a la fibra y cortante: ensayo en la dirección de compresión perpendicular a la fibra, determinando las resistencias y módulo de elasticidad; y ensayo de resistencia a cortante.

La norma que determina los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad (UNE-EN 384, 2004) no trata directamente sobre la metodología de ensayo, pero se encuentra muy relacionada con el proceso de obtención de los parámetros de resistencia. Establece el procedimiento para la determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad para una población de madera determinada.

5.2.2 Ensayos de compresión y tracción paralela a la fibra

El ensayo de compresión se efectúa sobre una probeta con una longitud igual a 6 veces la menor dimensión de la sección transversal (UNE-EN 1193, 2010). La carga se aplica de modo concéntrico, con un dispositivo articulado que permite ejercer un axil de compresión sin generar esfuerzos de flexión. Las deformaciones se miden sobre un tramo central con una longitud igual a 4 veces la menor dimensión de la sección transversal, utilizando dos extensómetros dispuestos de tal forma que se minimicen los posibles efectos de distorsión. El módulo de elasticidad ($E_{c,0}$), se calcula según la Ecuación 5-1:

$$E_{c,0} = \frac{l_1 \cdot \Delta F}{A \cdot \Delta w}$$

Ecuación 5-1

Siendo:

- ΔF incremento de carga dentro de una zona recta de la curva carga-deformación.
- Δw incremento de deformación correspondiente a ΔF .
- A área de la sección transversal.

El ensayo de tracción paralela a la fibra se realiza sobre una probeta que se fija a la máquina de carga a través de mordazas en sus extremos, para poder ejercer el axil de tracción. La longitud libre entre mordazas debe ser, como mínimo, igual a 9 veces la mayor dimensión de la sección transversal (h). La deformación (w) se mide sobre la longitud (l_1), que como mínimo debe ser igual a 5 veces h , colocando un extensómetro en cada cara de la pieza para reducir los errores debidos a la distorsión de la probeta. El módulo de elasticidad ($E_{t,0}$) se calcula según la Ecuación 5-2 (los términos tienen el mismo significado que en el ensayo de compresión).

$$E_{t,0} = \frac{l_1 \cdot \Delta F}{A \cdot \Delta w}$$

Ecuación 5-2

En ambos casos, tanto el de tracción como el de compresión, la resistencia se obtiene aumentando la carga con un desplazamiento constante de la cabeza de carga, de manera que se alcance la carga máxima (F_{max}) en un tiempo de 300 ± 120 segundos (UNE-EN 384, 2004). La resistencia se calcula con la Ecuación 5-3 para compresión, y con la Ecuación 5-4 para tracción.

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{A}$$

Ecuación 5-3

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{A}$$

Ecuación 5-4

5.2.3 Ensayo de las propiedades en dirección perpendicular a la fibra

Los ensayos de tracción y compresión perpendicular a la fibra están definidos en la norma (UNE-EN 408, 2004), donde las dimensiones de las probetas dependen del tipo de ensayo (tracción, compresión) y del material (madera maciza o laminada encolada); con una tolerancia admisible para las dimensiones b , h y l de la probeta del 1 %, como se indica en la Tabla 5-2.

Ensayo	Madera maciza			Madera laminada encolada			
	b (mm)	h (mm)	l (mm)	b _{min} (mm)	h (mm)	b·l (mm ²)	Volumen (m ³)
Tracción	45	180	70	100	400	25.000	0,01
Compresión	45	90	70	100	200	25.000	-

Tabla 5-2. Dimensiones de las probetas de madera estructural o de madera laminada encolada (UNE-EN 408, 2004).

La probeta se coloca verticalmente y se ejerce un axil de compresión o de tracción a través de unas placas de acero. En el caso de la tracción, estas placas se encolan a la probeta con un adhesivo epoxi. Las deformaciones se miden sobre un tramo centrado de longitud (h_0), aproximadamente igual a 0,6 veces h . Se colocan dos extensómetros, uno en cada cara, con el fin de minimizar el posible efecto de la distorsión (según la Figura 5-1), la dirección de la fibra es denotada con 1).

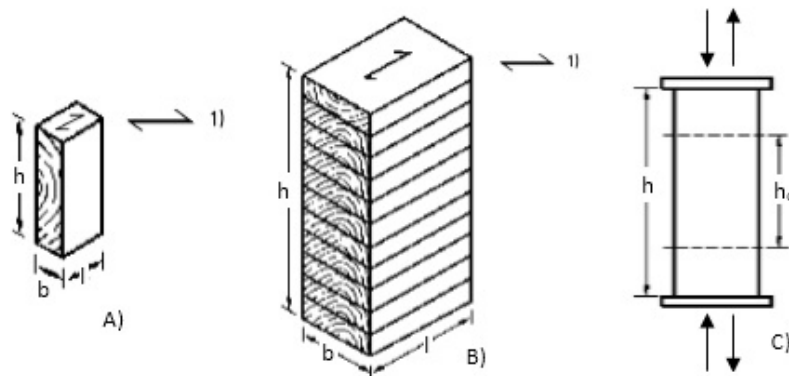


Figura 5-1. Disposición de elementos: A) madera aserrada, B) laminada encolada y C) fundamento del ensayo.

La resistencia a tracción se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_{t,90} = \frac{F_{t,90,max}}{b \cdot l}$$

Ecuación 5-5

Siendo:

- $f_{t,90}$ resistencia a la tracción perpendicular a la fibra, en N/mm^2 .
- $F_{t,90,max}$ carga máxima de tracción perpendicular a la fibra, en N.

La velocidad de avance de la cabeza de carga debe ser tal que la rotura se alcance en un tiempo de 300 ± 120 segundos, y el módulo de elasticidad en tracción ($E_{t,90}$) se deduce de la Ecuación 5-6:

$$E_{t,90} = \frac{h_0 \cdot \Delta F}{b \cdot l \cdot \Delta w}$$

Ecuación 5-6

Siendo:

- ΔF incremento de carga en la zona lineal de la curva carga-deformación, comprendida entre el 10 % y el 40 % aproximadamente de $F_{t,90,max}$.
- Δw incremento de deformación correspondiente de ΔF .

En el ensayo de compresión perpendicular, la rotura no se produce de manera tan clara como en el ensayo de tracción y es, por tanto, necesario definir un valor denominado $F_{c,90,max}$, elegido en una primera aproximación de forma estimada. Se calcula el $0,1 \cdot F_{t,90,max}$ y el $0,4 \cdot F_{t,90,max}$ sobre la gráfica de carga-deformación y se trazan la línea 1 y la 2, paralela a la anterior, pasando por el punto $w = 0,01 \cdot h_0$. Se adopta como $F_{c,90,max,est}$ el punto de intersección de la curva con la recta 2. Si este valor se encuentra dentro del +5 % de $F_{c,90,max,est}$ puede utilizarse para determinar la resistencia a compresión (Figura 5-2). En caso contrario, se repite el proceso con otro valor estimado, hasta que se cumpla.

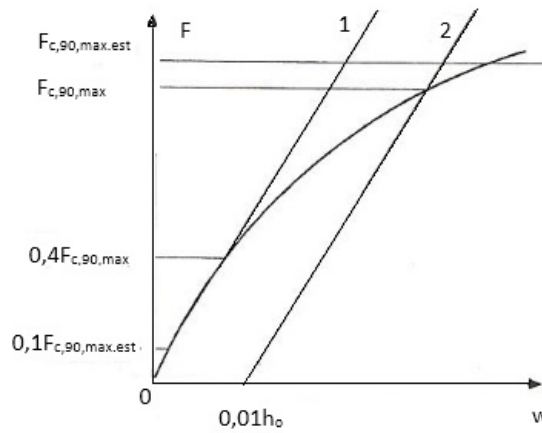


Figura 5-2. Curva de carga-deformación en compresión.

Una vez definido $F_{c,90,max}$, la resistencia a compresión viene definida por la Ecuación 5-7:

$$f_{c,90} = \frac{F_{c,90,max}}{b \cdot l}$$

Ecuación 5-7

Y el módulo de elasticidad $E_{c,90}$, por la Ecuación 5-8:

$$E_{c,90} = \frac{h_0 \cdot \Delta F}{b \cdot l \cdot \Delta w}$$

Ecuación 5-8

Siendo:

- ΔF incremento de la carga en la zona lineal de la curva carga-deformación, comprendida aproximadamente entre los valores del 10 % y el 40 % de $F_{c,90,max,est}$.
- Δw incremento de la deformación correspondiente a ΔF .

5.2.4 Ensayo de cortante en dirección paralela a la fibra

Este ensayo permite obtener la resistencia a cortante, provocado por un esfuerzo de deslizamiento de las fibras en un plano paralelo a la dirección de las mismas. Las dimensiones de la probeta son las siguientes (UNE-EN 408, 2004):

- $l = 300 \pm 2$ mm
- $b = 32 \pm 1$ mm
- $h = 55 \pm 1$ mm

La probeta se encola a unas placas de acero con espesor de 10 mm, lo que permite someter la pieza a un esfuerzo de compresión (F), que provoca un esfuerzo rasante en la madera como se muestra en la Figura 5-3.

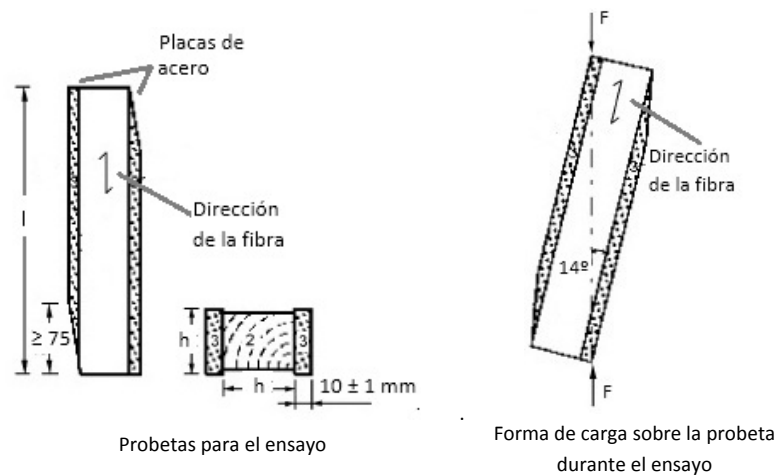


Figura 5-3. Composición de ensayo a esfuerzo cortante en dirección paralela a la fibra.

La carga se aplica con un avance constante de la cabeza de carga hasta alcanzar la rotura en un tiempo de 300 ± 120 segundos (UNE-EN 408, 2004), como en el caso anterior. La resistencia a cortante se obtiene de la Ecuación 5-9:

$$f_v = \frac{F_{\max} \cdot \cos 14^\circ}{b \cdot l}$$

Ecuación 5-9

5.2.5 Determinación de las propiedades mecánicas a partir de las propiedades más representativas

Es frecuente que en la caracterización de las propiedades mecánicas de una especie y calidad de madera se realicen únicamente los ensayos más característicos, deduciéndose las propiedades restantes a partir de relaciones definidas en la norma (UNE-EN 384, 2004). Esta norma recoge las expresiones que permiten estimar algunas propiedades a partir de los valores característicos de la resistencia a flexión ($f_{m,k}$), la densidad (ρ_k) y el valor medio del módulo de elasticidad ($E_{0,med}$), determinados de acuerdo con las directrices de la norma. De esta forma, los valores característicos de la resistencia a tracción y compresión paralelas a la fibra y a cortante se deducen a partir de la resistencia a flexión de acuerdo con la Ecuación 5-10, Ecuación 5-11 y Ecuación 5-12, respectivamente:

$$f_{t,0,k} = 0,6 \cdot f_{m,k}$$

Ecuación 5-10

$$f_{c,0,k} = 5 \cdot f_{m,k}^{0,45}$$

Ecuación 5-11

$$f_{v,k} = 0,2 \cdot f_{m,k}^{0,8}$$

Ecuación 5-12

Los valores característicos de la resistencia a tracción y compresión perpendicular a la fibra se estiman a partir del valor característico de la densidad, según la Ecuación 5-13 y la Ecuación 4-14, respectivamente:

$$f_{t,90,k} = 0,001 \cdot \rho_k$$

Ecuación 5-13

$$f_{c,90,k} = 0,015 \cdot \rho_k$$

Ecuación 5-14

Siendo:

- ρ_k densidad característica, en kg/m^3 .
- $f_{t,90,k}$ y $f_{c,90,k}$ resistencia a tracción y compresión perpendicular, en N/mm^2 .

El valor característico del módulo de elasticidad ($E_{0,k}$) de acuerdo con las siguientes expresiones:

- en coníferas: $E_{0,k} = 0,67 \cdot E_{0,med}$
- en frondosas: $E_{0,k} = 0,84 \cdot E_{0,med}$

El valor medio del módulo de elasticidad perpendicular a la fibra ($E_{90,med}$) se deduce de las expresiones:

- en coníferas : $E_{90,med} = E_{0,med}/30$
- en frondosas : $E_{90,med} = E_{0,med}/15$

Por su parte, el valor medio del módulo de elasticidad de la muestra ($E_{0,med}$) se calcula a partir de ensayos y aplicando una corrección respecto el módulo de elasticidad en flexión pura, tal y como indica la norma (UNE-EN 384, 2004).

Finalmente, el módulo de elasticidad transversal (G) puede calcularse según la Ecuación 5-15:

$$G = \frac{E_{0,med}}{16}$$

Ecuación 5-15

5.2.6 Determinación de características mecánicas a partir de probetas libres de defectos

Hasta los años 70, el procedimiento de obtención de las propiedades mecánicas de la madera se ha basado en el ensayo de probetas de pequeñas dimensiones y libres de defectos. Se calculaba el 5º percentil, admitiendo una distribución Normal o de Gauss. Sobre este valor, se aplicaban una serie de ajustes para llegar a obtener la tensión admisible del material con tamaño real y calidad comercial.

Estos ajustes se deben a las siguientes causas:

- Duración de la carga con una referencia normal de 10 años.
- Humedad con referencia madera seca, humedad inferior al 9 %.
- Canto (o altura de la sección).
- Calidad.
- Coeficiente de seguridad.

El procedimiento fue cuestionado como sistema válido para predecir el comportamiento de la madera en tamaño estructural y con los defectos de la calidad comercial. En los años 70 se realizó un estudio experimental en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de British Columbia (Madsen, 1992), con el fin de comprobar la llamada teoría de Madsen. El trabajo consistió en el ensayo de 128 probetas pequeñas y libres de defectos con dimensiones de 25x25x400 mm, sometidas a una carga concentrada, con diversos niveles de tensión (8 en total). De aquí se obtuvo la denominada Curva de Madison, de donde se deduce un factor corrector para corregir una duración breve del ensayo frente a la duración Normal de 10 años.

Los resultados se resumen en las siguientes observaciones:

- Sobre el valor del 5º percentil, se ensayaron a flexión piezas de madera seca de Douglas Fir de calidad N° 2, con un tamaño comercial (sección de 38x140 mm y 3,66 m de longitud), sobre una luz de 3,0 m, con cargas en los tercios de la luz. El valor medio de la tensión de rotura fue de 35,8 MPa, con una desviación estándar de 18,7 MPa ($cv = 0,52$), de donde resulta un 5º percentil (asumiendo la distribución normal) de 5,0 MPa.
- Si se adopta una distribución de Weibull de 3 parámetros, el ajuste resulta mucho mayor, y el valor de 5º percentil alcanza los 13,3 MPa, 2,7 veces mayor que el anterior.
- La duración de la carga para corregir la resistencia obtenida en una duración breve del ensayo, refiriéndola a la duración Normal (10 años), admite un factor igual a 0,62.

A la curva de Madison mostrada en la Figura 5-4 hay que añadir otras propuestas reconocidas en normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). Es el caso del estudio que se realizó para evaluar el efecto de la duración de la carga en la madera con dimensiones comerciales, donde se ensayaron más de 2.800 piezas de 38x140 mm de sección, con una longitud de 3,6 m y con diferentes niveles de tensión. Las conclusiones a las que se llegó son las siguientes:

- La Curva de Madison no es válida para las piezas de tamaño comercial ensayadas a flexión.
- El 5º percentil de la resistencia después de 2 meses de carga se reduce al 85 % y después de 1 año de carga al 75 %, respecto a la resistencia en duración breve.
- El material de mayor resistencia queda más afectado por la duración de la carga que el material menos resistente, para un mismo nivel de tensión.
- La Curva de Madison resulta conservadora para cargas que duren hasta 1 año, y no conservadora en cargas de mayor duración.

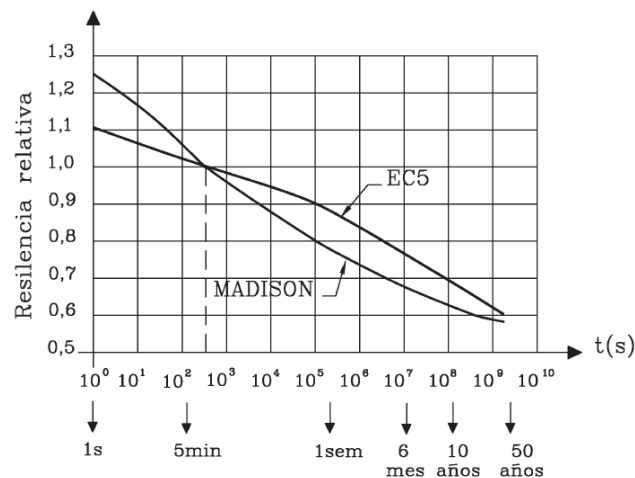


Figura 5-4. Relación entre resistencia y duración de la carga. Curva de Madison frente a la adoptada en el (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).

El contenido de humedad en las probetas libres de defectos presentaba una corrección con un coeficiente de 1,25 desde el estado húmedo (humedad mayor del 79 %) hasta el estado seco (humedad menor del 19 %). Para contrastar este valor, con la aplicación a la madera en dimensiones comerciales, se partió de una muestra de 1.000 piezas de 38x140 mm de sección de pino de Douglas Fir de calidad “Nº 2 and Better” (denominación de calidad en la que se comercializan las clases Nº 2 y superiores, sin separar). Se formaron 5 subgrupos, ensayándose cada uno a una humedad diferente (25, 20, 15, 10 y 7 %). De los resultados de ensayo se deduce que las distribuciones de resistencia de cada grupo se separan para percentiles superiores al 40. De esta manera, se obtiene mayor resistencia cuanto menor sea el contenido de humedad. Pero en percentiles inferiores al 40, y claramente en el 5º percentil, no existen diferencias apreciables. Por lo tanto, se concluye que la humedad no afecta al 5º percentil de la resistencia a flexión de la madera con dimensiones comerciales, siempre que ésta esté controlada y sea reducida.

Respecto a la altura de la sección, en el sistema de cálculo basado en probetas libres de defectos, se admite una corrección por altura de la sección igual a $\left(\frac{2}{d}\right)^{0,11}$, tratando la altura (d) en pulgadas. Los ensayos fijaron una altura de 50 mm, lo que implica una reducción de la resistencia para una altura de 140 mm de la sección de la viga de 0,89. Se realizaron ensayos con madera de dimensiones comerciales para tres condiciones de carga diferentes:

- Carga concentrada en el centro del vano.
- Dos cargas en los tercios de la luz.
- Dos cargas en un vano central inferior a los tercios de la luz.

La diferencia de resistencia al nivel del 5º percentil alcanzaba el 25 %. El efecto de la altura de la sección está enmascarado por el efecto del tamaño que responde a la longitud de la pieza, que se encuentra sometido al momento máximo. De los tres casos de carga, el de cargas en los tercios del vano resulta ser el más desfavorable. Para el caso del tercio central, que está sometido al momento máximo, únicamente el punto central alcanza el momento máximo. La probabilidad de encontrar el defecto más desfavorable en ese punto es menor.

Con el criterio de probetas libres de defectos, el efecto de la calidad de la madera se vincula con la resistencia mediante factores que disminuyen la resistencia obtenida en probetas limpias en función de la calidad correspondiente. La corrección se aplicaría de forma análoga para todas las especies, pero la realidad es distinta. Especies con nudos pequeños pero abundantes se comportan mejor que las especies con pocos nudos muy localizados. El método de clasificación es erróneo al aceptar que el efecto de los nudos es independiente de la especie. Por ello se debe tener presente que la frecuencia de los nudos es ignorada a pesar de que tiene repercusión.

Los procedimientos más antiguos definían las propiedades mecánicas de la madera empleando probetas de pequeño tamaño y libres de defectos. Las diferencias de comportamiento se manifiestan con claridad en el modo de rotura de una probeta a flexión (Figura 5-5). En definitiva, el comportamiento mecánico de la madera es muy distinto si se refiere a madera limpia (probetas pequeñas y libres de defectos) o a madera comercial (probetas de tamaño real con defectos comunes). En el caso de madera limpia, los resultados no se corresponden bien con la realidad, por lo que el trabajo se orienta a modelos de dimensiones reales.

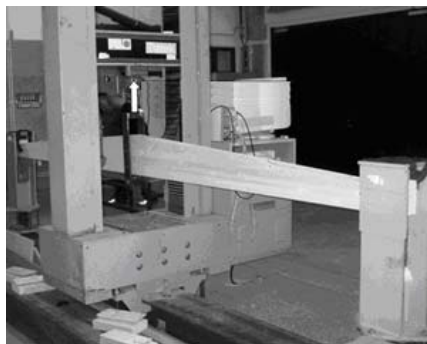


Figura 5-5. Ensayo sobre máquina en flexión.

5.2.7 Tratamiento estadístico de los ensayos

Cada vez más se está convirtiendo en una necesidad el empleo de la madera de uso estructural, con dimensiones comerciales, certificados de calidad, caracterización de límites a defectos comunes y grados de certidumbre al ensayo. Así, se obtienen valores de resistencias características y no de tensiones como ocurría antes, y un mayor nivel de confianza en estos ensayos. Los valores característicos de resistencia se definen a partir del 5º percentil de una población estadística con distribución normal.

De forma general, se puede hacer uso del percentil i -ésimo de una muestra, donde la i toma valores del 1 al 99. El i % de la muestra son valores menores que él y el $100-i$ % restante son mayores. En particular el (DB SE M, 2009) refleja que este valor debe ser el 5 % percentil, es decir, aquel valor que separa los datos de la muestra dejando por debajo un 5 % y por encima el restante 95 %, de modo que sólo existe una probabilidad del 5 % de encontrar resistencias menores. Se aplica para los valores de los módulos de elasticidad característicos y otras propiedades, como la densidad de la madera. A modo de ejemplo, en la Figura 5-6 A, se representa un histograma de frecuencias, donde se puede apreciar el número de probetas de madera que se repiten en cada segmento de densidades (corresponden al análisis de densidades de la primera serie de probetas objeto de ensayo). Mientras, en la Figura 5-6 B, se muestra la frecuencia acumulada. Si se atiende al 5º percentil, se podría decir que a partir de una densidad de 400 kg/m^3 , el 95 % de las probetas presentan valores de densidad superiores. En cualquier caso, es aconsejable

que el número de piezas expuestas a ensayo sea más elevado, para hablar de distribuciones normales con un nivel de confianza aceptable.

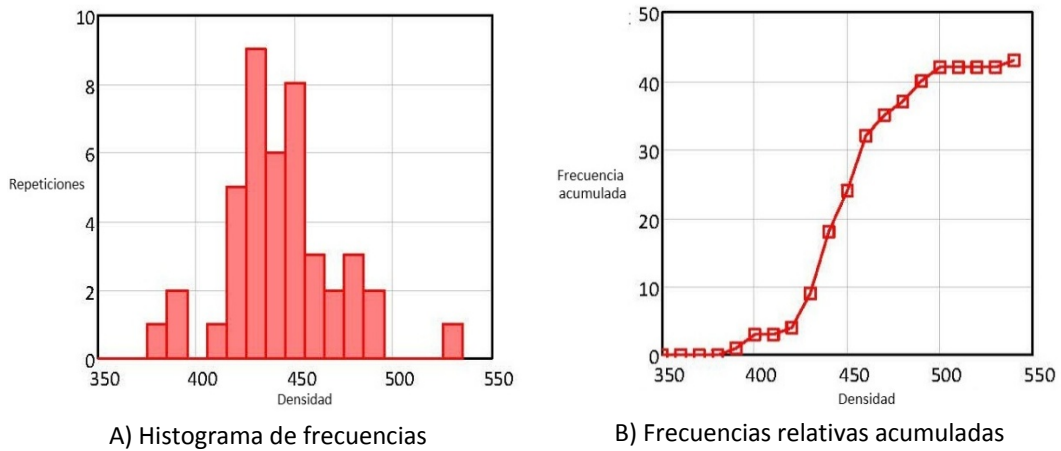


Figura 5-6. Análisis de 5º percentil sobre densidad de probetas.

Cada muestra consta de un grupo de probetas con dimensiones iguales, de forma que se seleccionan los tamaños más representativos (escuadría y longitud) que se pueden obtener para una especie y procedencia determinadas. El número de probetas por muestra para el caso de propiedades físicas básicas se describe en la norma (UNE-EN 384, 2004). En la Figura 5-7 se aprecia que las muestras deben poseer como mínimo 40 probetas, siendo penalizadas en un factor k_s que multiplica al valor final de la resistencia característica en la madera con $k_s < 1$. Para no sufrir estas penalizaciones, se necesitarían al menos 200 probetas total de la muestra más pequeña y, a ser posible un número de muestras de igual sección transversal (A) mayor de 5. El número de probetas mínimo es variable según el ámbito geográfico, por ejemplo las normas panamericanas (COPANT) establecen valores mínimos de alrededor de 30 probetas.

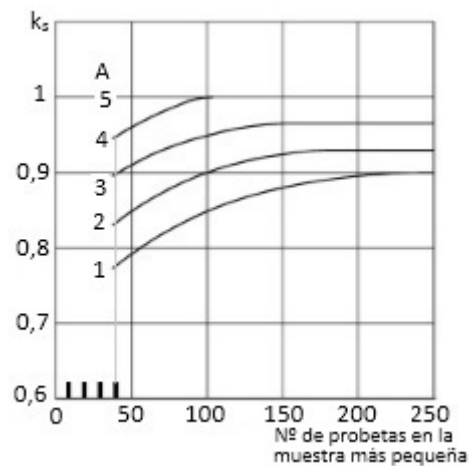


Figura 5-7. Determinación del coeficiente k_s (UNE-EN 384, 2004).

5.3 Ensayos de elementos de fijación tipo clavija

5.3.1 Modelos de referencia y fundamentos

5.3.1.1 Composición del ensayo para el cálculo de resistencia a aplastamiento por la clavija en la madera

Normalmente, la resistencia a aplastamiento por la clavija de distintos tipos de madera se define a partir de ensayos. En la Figura 5-8 se muestran de modo esquemático los montajes y la forma en que se realizan estos ensayos (Argüelles et al., 2003).

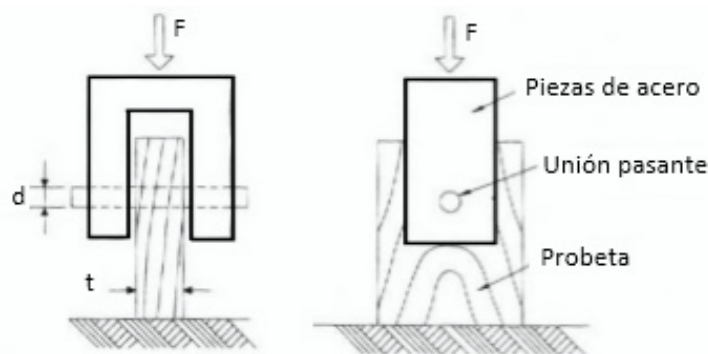


Figura 5-8. Dispositivo de ensayo para el cálculo de resistencia a aplastamiento por clavija en la madera.

Los métodos de laboratorio que permiten determinar la resistencia al aplastamiento y el módulo de aplastamiento de los elementos de fijación tipo clavija para madera se pueden identificar según la norma (UNE-EN 383, 2007). Se debe realizar el ensayo de la probeta mediante el dispositivo representado en la Figura 5-9. Dicho dispositivo no debe ejercer ningún esfuerzo de fricción entre las placas de acero y las probetas que pudiera influir en las medidas.

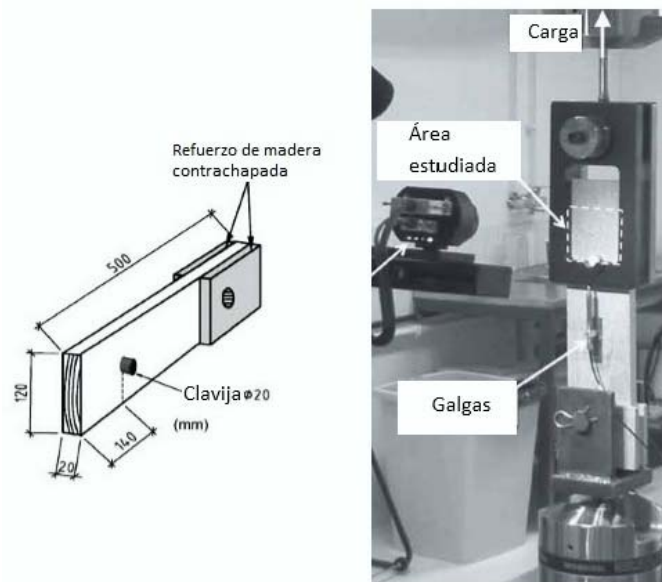


Figura 5-9. Ensayo en tracción sobre clavija moleteada (Sjödín et al., 2008).

El objetivo de este ensayo es conseguir el aplastamiento de la madera evitando que se produzca la flexión del elemento de fijación sometido a ensayo. Se carga el elemento de fijación en dirección perpendicular a su eje, mediante un dispositivo de carga de acero, y se mide la carga y el aplastamiento o deformación correspondiente. Para la madera maciza o productos derivados de la madera constituidos por varias capas que tengan una sola

dirección de la fibra, la carga puede ejercerse en dirección paralela a la fibra, o bien en dirección perpendicular a la fibra para la compresión. La probeta debe ser un prisma rectangular que incluya un elemento de fijación cuyo eje esté orientado perpendicularmente a la superficie de la probeta prismática. Las restricciones dimensionales se indican en la Figura 5-10.

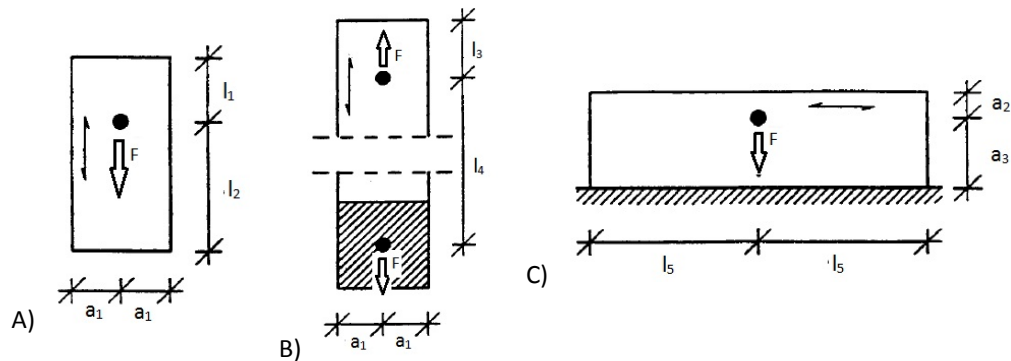


Figura 5-10. Ensayos de aplastamiento: A) paralelo a la fibra, por compresión; B) paralelo a la fibra, por tracción; C) perpendicular a la fibra, por compresión, según (UNE-EN 383, 2007).

Donde los valores de las cotas “ a_i ” y “ l_i ” son función del diámetro del perno, según se refleja en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Ensayos de aplastamiento. Geometrías de probeta en función del diámetro del perno (UNE-EN 383, 2007).

Dimensiones	Clavos sin taladro previo	Clavos con pretaladro	Tornillos y clavijas	Material de la probeta
a_1	5·d	5·d	3·d	Madera o tableros derivados de la madera.
l_1	20·d	12·d	7·d	
l_2	20·d	12·d	7·d	
l_3	20·d	12·d	7·d	
l_4	40·d	40·d	30·d	Madera o productos derivados de la madera de varias capas con una única dirección de la fibra.
a_1	5·d	5·d	5·d	
a_1	5·d	5·d	5·d	
l_5	20·d	20·d	20·d	

La norma (UNE-EN 383, 2007) permite que la carga pueda ejercerse en compresión, o en tracción. Así, distintos autores sugieren la aplicación de cargas en:

- Compresión (Figura 5-11), lo cual facilita efectos indeseados en los elementos de unión, entre la probeta y la máquina de ensayo.
- Tracción, lo que evita efectos de pandeo y excentricidades, como proponen algunos otros autores (Sjödín et al., 2008) que, además, aplican refuerzos de madera contrachapada en la zona de sujeción de la probeta opuesta a la zona de ensayo (Véase Figura 5-9).

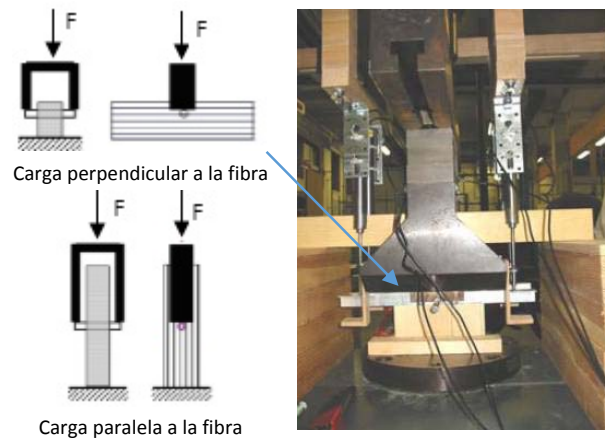


Figura 5-11. Disposiciones para ensayo de aplastamiento por clavija en madera.

Alternativas a estos ensayos podrían ser los de piezas asimétricas en la dirección de la carga (Rosowskya & Bulleitb, 2002). En este caso se toman dimensiones de probetas de valor: t_1 desde 19,1 a 25,4 mm, t_2 desde 3,18 mm a 25,4 mm; y diámetro en el perno del orden de 3 mm. Esta disposición presenta inconvenientes derivados de la excentricidad (véase Apartado 3.2.1.1).

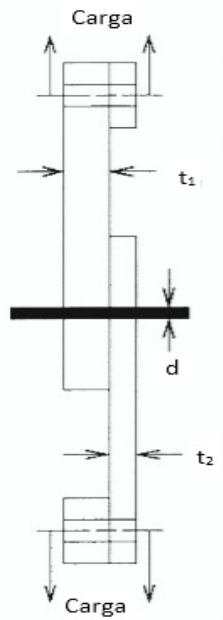


Figura 5-12. Ensayo de tracción sobre unión con clavija en cortadura simple (Rosowskya & Bulleitb, 2002).

Los ensayos que se desarrollaron en este trabajo disponen las fibras alineadas predominantemente con la carga que provoca el fallo (es decir, $\alpha = 0^\circ$), para posteriormente ampliar el trabajo considerando parte de ellas a 45° y 90° entre las piezas laterales y central, recogiendo con ello los efectos de ortotropía.

5.3.1.2 Composición del ensayo para caracterizar la resistencia de la unión

El aplastamiento de la madera como consecuencia de la clavija es uno de los fallos posibles en este tipo de uniones. Pero, como se vio en el Apartado 2.7.3, las uniones de madera con clavija pueden presentar otros modos de fallo, siendo de especial interés los relacionados con la plastificación de la clavija y las rótulas plásticas en el acero (Figura 5-13 C). También es importante poder estudiar la energía recogida por la unión, lo que lleva a ensayos más cercanos a la composición real de trabajo de la unión. Se pueden realizar ensayos en uniones completas (Figura 5-13 A) sometidas a cortadura doble y cargas de tracción (Guan & Rodd, 2001). El conjunto de la unión puede presentar diversas particularidades, por ejemplo, refuerzos con placas de madera (de mayor resistencia) colocadas en zonas

más sensibles al aplastamiento o fallos imprevistos como los originados por la tracción en zonas de la madera no expuestas al aplastamiento, de la clavija (Figura 5-13 B). Por estos motivos se debe tener presente todo el conjunto de la unión, la disposición de las cargas y las restricciones vinculadas con la geometría de la probeta en función del diámetro de la clavija (Tabla 5-3).

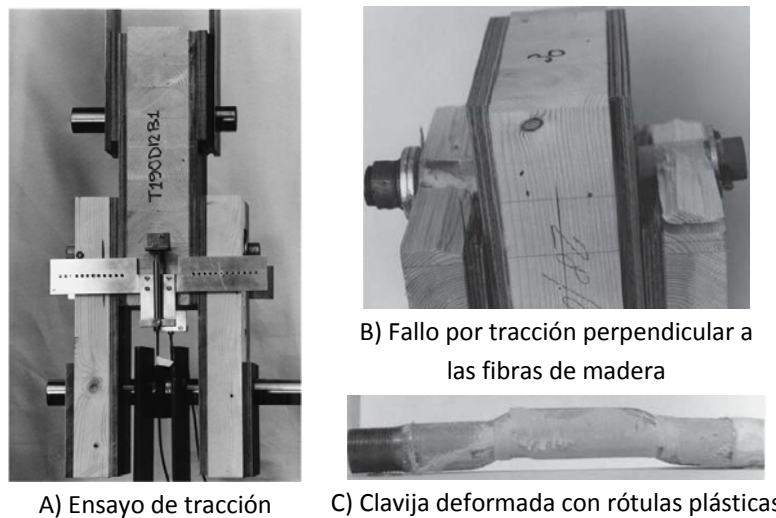


Figura 5-13. Ensayo en tracción para fallo por doble cortante (Guan & Rodd, 2001).

En la Figura 5-14 se muestra el aspecto resultante en probetas sometidas a cortadura doble tras el fallo en compresión (Rodd & Leijten, 2003), donde las fibras están alineadas con la carga que provoca el fallo, aunque también se deben estudiar distintos ángulos entre la posición de las fibras en la pieza central y las laterales para considerar fallos análogos a los mostrados en la Figura 5-13 B.



Figura 5-14. Probetas de ensayo en compresión ante fallo por cortadura doble.

Se debe mantener una velocidad durante el ensayo para garantizar situaciones de carga estáticas; existen dos tendencias:

- Ensayo en velocidad de desplazamiento constante (1 mm/min), según (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), empleada en trabajos como los de (Dong Phuong, 2006).
- Ensayo a velocidad de carga constante, según indica la norma [Estructuras de madera. Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. (UNE-EN 26891, 1992)] al establecer una carga estimada y limitar el tiempo de ejecución de ensayo. Ha sido empleada en otros trabajos de investigación con ensayos, como (Dorn et al., 2013) y (Awaludin et al., 2008).

Con el fin de homogeneizar resultados, se toma la norma (UNE-EN 26891, 1992) como principal referencia para lograr la compatibilidad de los resultados en las investigaciones llevadas a cabo en diferentes laboratorios, junto con otras complementarias (UNE-EN 383, 2007). La norma nacional (UNE-EN 26891, 1992) es una transcripción de la norma ISO 6891 del año 1983, que es aplicable a las uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos para estructuras con cargas estáticas. Sus principios también pueden emplearse para el ensayo de otras uniones, aunque

la misma norma reconoce que pueden ser necesarias modificaciones al procedimiento de ensayo. Las reglas normalizadas para determinar las resistencias características de elementos de fijación mecánicos se publican en normas internacionales separadas. Por ello, la norma [Estructuras de madera: Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia al aplastamiento y del módulo de aplastamiento para los elementos de fijación tipo clavija, (UNE-EN 383, 2007)] determina restricciones de geometrías de la probeta en función del diámetro de la clavija. Además se considera:

- La aplicación lenta y gradual de las fuerzas, que hace que los desplazamientos de las partículas del cuerpo sean a velocidades muy pequeñas y, por consiguiente, puede despreciarse la energía cinética producida.
- Rozamiento despreciable entre los enlaces externos, esto es “todo el trabajo que realizan las fuerzas externas se invierte totalmente en deformar al cuerpo, transformándose en energía de deformación”.

Se cumple con ello una de las condiciones generales de la Resistencia de Materiales, en lo referente al principio de los pequeños desplazamientos. Supone que al aplicar fuerzas exteriores sobre los cuerpos, los desplazamientos que se originan son pequeños en relación con las dimensiones del cuerpo. Ello permitirá que las ecuaciones de equilibrio se puedan aplicar sobre el sistema material en su posición inicial, es decir sin haberse deformado, y así mismo, la posibilidad de emplear técnicas energéticas, como las de trabajos virtuales y el teorema de Castigliano. Viene a marcar relaciones de proporcionalidad entre el desplazamiento que se produce y el tamaño del sólido rígido. Este aspecto se echa en falta en la norma (UNE-EN 26891, 1992), que fija deslizamientos de 15 mm independientemente del tamaño de la unión.

5.3.1.3 Acondicionado de las probetas

Deberá tenerse cuidado en el acondicionado de la madera antes de fabricarse una unión, así como las propias uniones del conjunto antes de realizar el ensayo; que se harán de forma que las condiciones del ensayo se correspondan realmente con las condiciones de las uniones en las estructuras (en lo que respecta a la influencia de la densidad, humedad, resistencia de la madera y aparición de fendas a causa de la contracción).

Cuando el objetivo del ensayo sea comparar uniones en condiciones similares, se deberá emplear para la climatización la atmósfera normalizada (a 20 °C y 65 % de humedad), según la norma (UNE-EN 7520, 1994). Esta norma es una transcripción de la norma ISO 554 del año 1956.

5.3.1.4 Formas y dimensiones de las probetas

Las uniones que se ensayan deberán tener dimensiones y formas tales que, realmente, se obtenga la información necesaria de su resistencia y deslizamiento. La probeta se conforma como un prisma rectangular constituido por madera o derivados de la madera que incluyan un elemento de fijación cuyo eje esté orientado perpendicularmente a la superficie de la probeta prismática. Para cumplir el principio del ensayo, el grosor (t) debería estar comprendido, al menos, entre $1,5 \cdot d$ y $4 \cdot d$. El tamaño de las piezas de madera de espesor t_1 y t_2 suele venir condicionado por su integración en estructuras; esto es, las escuadrías se dimensionan previamente para evitar fallo de la madera en su integración como viga y, posteriormente, en los nudos. Parece lógico pensar que el cálculo de la clavija se debiera subordinar al dimensionado previo de la madera y al estado de carga que se debe transmitir en el nudo.

En consecuencia, los modos de fallo más aconsejados suponen la rótula plástica en el bulón. Esto se ha ratificado en el (DB SE M, 2009), donde se indica:

“Las capacidades de carga más altas se obtienen en los mecanismos de rotura donde la rótula plástica de la clavija y la tensión de aplastamiento de la madera se alcanzan de forma simultánea. Para ello se recomienda que la clavija penetre entre 10 y 12 diámetros en la madera en cada una de las piezas a unir.”

Es habitual despreciar las reducciones del área de la sección transversal de las vigas de madera, en la sección eficaz de la misma, en el entorno de los nudos de estructuras reales. Tanto en proyectos aplicados para edificación en madera (Sanz, 2008), como en publicaciones (Guan & Rodd, 2001) y (Fueyo et al., 2009, B), se puede apreciar que las tensiones de aplastamiento en la madera son muy localizadas, y no suelen afectar significativamente a la distribución tensional a lo largo de la viga, sino más habitualmente al fallo por rótula plástica de la clavija (Figura 5-15).

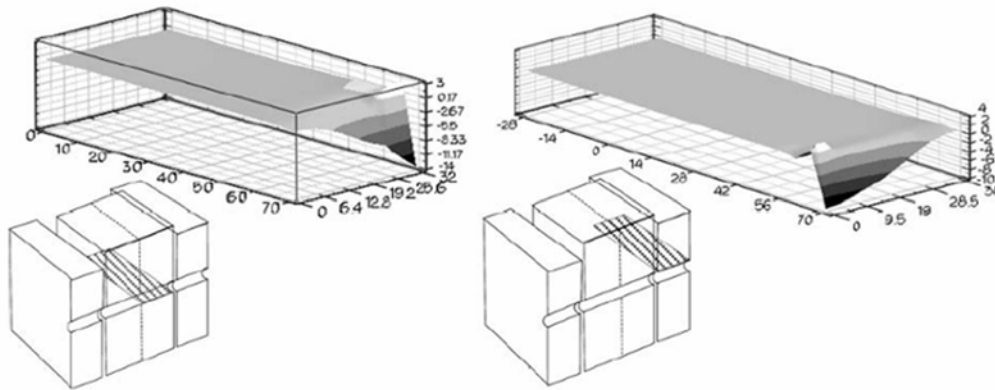


Figura 5-15. Distribución de las tensiones de compresión en la madera central, en la sección justo debajo del perno, y en la madera lateral en la sección justo encima del perno (Fueyo et al., 2009, B).

Autores como (Dorn et al., 2013) proponen dimensiones para las probetas de 868 mm de largo, 72 mm de espesor y 40, 100, 200 mm de ancho. Así se indica en el Apartado 5.2.6, relativo a la determinación de características mecánicas a partir de probetas libres de defectos, y según los trabajos de ensayos sobre elementos de madera (Ariza, 2002). El enfoque de la normativa europea desaconseja el uso de probetas de pequeño tamaño libres de defectos, donde serían más habituales aplastamientos uniformes en la madera. Se aconseja el empleo de elementos de gran tamaño (a ser posible real), que asuman la inclusión de los defectos normales y un comportamiento lo más cercano posible al de la estructura real.

Para las dimensiones geométricas complementarias se ha tenido en cuenta la norma (UNE-EN 386, 2002), donde se determinan las distancias de la clavija al contorno de las piezas de madera en función del diámetro de la clavija (Tabla 5-3). Estas distancias pretenden garantizar que el fallo en la unión esté en relacionado con la propia clavija y las zonas de aplastamiento que esta provoca, en lugar de los planos de hienda asociados con una sección neta de madera pequeña donde se propagan grietas hacia la periferia de la madera como ocurre en la Figura 5-13 B; ya que el objetivo es estudiar la resistencia de la unión de tipo clavija, en lugar de otros tipos de fallo que tengan que ver más con la resistencia de la propia madera.

En relación con la configuración, de entre todos los posibles tipos de uniones en estructuras de madera con clavija, se ha optado por el caso de unión entre piezas de madera en doble cortadura. Las razones para esta elección ya se justificaron en el Capítulo 3. La Figura 5-16 muestra este tipo de unión con sus principales dimensiones geométricas.

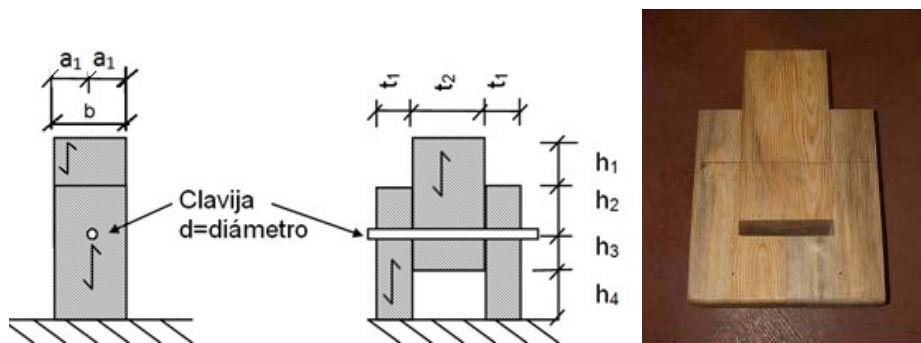


Figura 5-16. Dimensiones y geometría del tipo de unión seleccionado para el estudio.

Las probetas tienen un fondo igual al ancho t_2 , de valor 200 mm en las primeras series con madera de clase resistente QL24h y 160 mm a partir de la probeta número 44 con madera GL24h. El cambio se justifica por el ahorro de costes, al reducir el volumen de la madera y mejorar la técnica de montaje (a partir de la probeta 44 se sustituye la unión continua de las dos piezas laterales (de espesor t_1) por la colocación de un taco que fija solidariamente ambas piezas con una mordaza de agarre. La clavija se centra respecto a las caras laterales en una cota a_1 y se coloca a una distancia igual de las testas libres de carga ($h_2 = h_3 = 115$ mm). El largo para las piezas laterales es de $L_1 = 550$ m ($h_2 + h_3 + h_4$) y para la pieza central de madera $L_2 = 330$ mm ($h_1 + h_2 + h_3$). Estas cotas se exponen en la Figura 5-17 y en la Tabla 5-4 para cada una de las piezas. La elección de estas cotas ha estado condicionada también por las restricciones expuestas en el Apartado 2.7.7 y 2.7.9 referidas al efecto hienda, la separación y las distancias entre las clavijas y los planos de referencia.

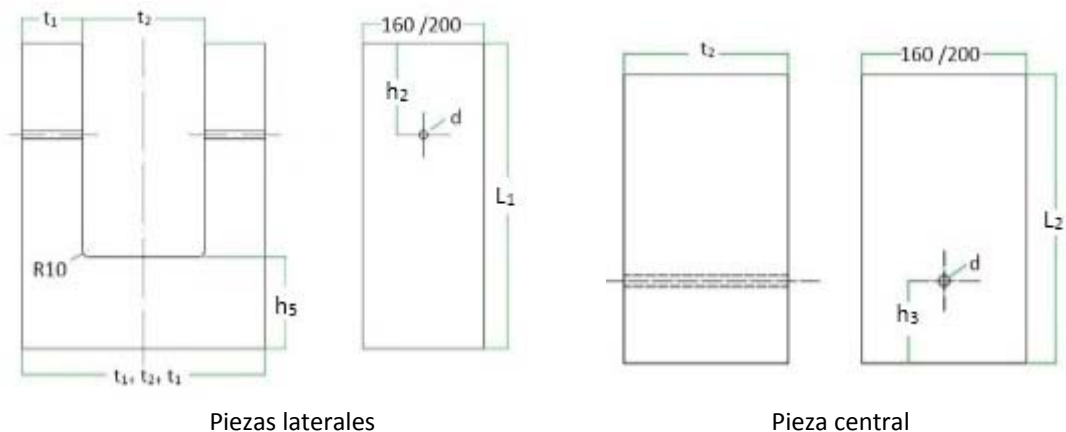


Figura 5-17. Extractos de planos descompuestos con dimensiones (en mm) de las piezas de madera ensayadas.

Tabla 5-4. Cotas de las probetas (en mm).

Cota	Probetas 200	Probetas 160
t_2	200	160
t_1	Variable	Variable
a_1	100	80
h_1	100	100
h_2	150	115
h_3	100	115
h_4	150	200
h_5	155	120
L_1	500	550
L_2	350	330

También son interesantes los estudios con diferentes ángulos (α), entre la dirección de la fibra en la pieza central y la dirección de la fibra en las piezas laterales, fijando una rotación en la pieza central de madera de varios ángulos hasta llegar a orientaciones de $\alpha = 90^\circ$ (Figura 5-18).

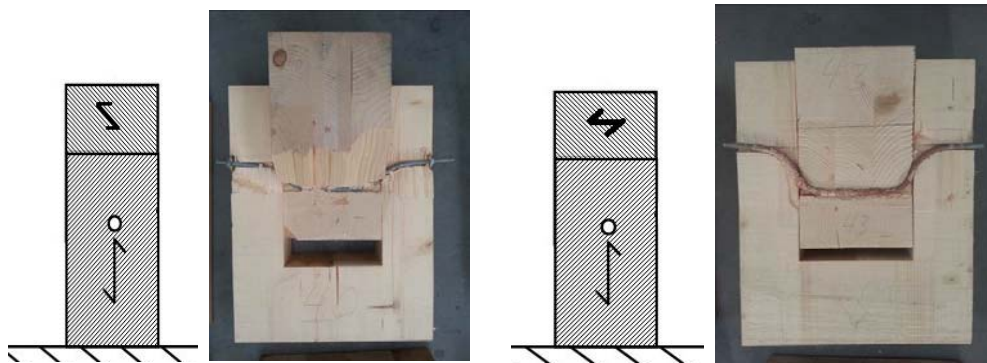


Figura 5-18. Probetas con pieza central orientada a 45° y 90°.

Es interesante realizar un corte transversal a todas las probetas una vez ejecutado el ensayo (Figura 5-19) con el fin de poder valorar: el modo de fallo, los anchos de aplastamientos (b_1 y b_2) o cualquier otra particularidad en las regiones ocultas. Este aspecto debe ser tenido en cuenta en el diseño de la probeta, en especial al fijar la orientación de las fibras de madera y hace aconsejable que sean en la dirección de la carga. La realización del corte transversal (habitualmente por aserrado) va a ejecutarse con más dificultad en la región cercana a la clavija por las deformaciones de la misma. Una orientación de las fibras alineadas con el plano de corte facilita la operación mientras que otras orientaciones de fibras pueden tener efectos indeseados. Por ejemplo, la probeta mostrada en la Figura 5-18 con orientación de las fibras a 45° respecto a la carga muestra como la pieza central se ha desprendido en la dirección de las fibras, lo que dificulta la medición de los anchos de aplastamiento.



Figura 5-19. Sección transversal de probetas ensayadas en cortadura doble.

Las dimensiones de las piezas de madera deben ser revisadas en el proceso anterior a la composición de la probeta, porque las escuadrías comerciales pueden tener secciones ligeramente mayores. Estos incrementos de sección están justificados por mermas en los procedimientos de cepillado posteriores y por las tolerancias del proceso de corte, que pueden dar lugar a la generación de piezas de mayores anchos y espesores que el nominal. En estos casos, tales excesos deben ser corregidos por métodos que permitan obtener la precisión dimensional necesaria, como el propio cepillado y el fresado por control numérico aplicado en las probetas con madera QL24h (véase Figura 5-20). Por su parte, la madera GL24h se suministró cepillada y con una precisión dimensional que permitía el montaje de las probetas sin correcciones significativas. Finalmente, el agujero se realiza mediante taladro, utilizando una broca de barrena y un dispositivo de guiado por columna.



Figura 5-20. Fabricación de probetas para ensayo y muestra de las distintas series.

Se tienen presentes también normas como la de “Clasificación visual de la madera para uso estructural procedente de coníferas” (UNE-56544, 2011), de cara a identificar defectos de rechazo o distorsión de resultados como, por ejemplo, la presencia de nudos cercanos a la clavija.

La geometría del perno parte de la caracterización desarrollada en el Capítulo 3. Debe recordarse que las ecuaciones analíticas de fallo (en los cuatro modos) no hacen distinción entre diámetro de clavija y agujero (d), y hace pensar que el dimensionado se ciñe a pernos lisos; pero, en la composición de las probetas para ensayo, se amplían los condicionantes de clavija, al contemplar la introducción de técnicas extendidas en la construcción para estos elementos, como por ejemplo el uso de:

- Bulón roscado, que permita la mejora de rendimiento de la unión, al introducir cargas axiales, debidas a fuerzas de rozamiento entre la madera y el acero. El acero de calidad 5.6 ya se comercializa con formatos roscados, mientras que los aceros S 275 y F111 (de geometría inicialmente lisa) se les genera el roscado por mecanizado con terrajas.
- Adhesivo en clavija, que también puede mejorar la contribución por efecto sogá, a la vez que permite proteger y ocultar los extremos de la clavija (tanto por estética como por resistencia a fuego y durabilidad de la estructura).
- Expansión de la clavija, que provoca el incremento del diámetro (d) o la incrustación de pestañas dentro del agujero, y en consecuencia fijaciones interiores de efecto sogá que permiten ocultar la unión de forma semejante al caso anterior.
- La fijación de intercaras con conectores dentados. Aunque inicialmente no afectan al diámetro de la clavija, existen diseños de conectores dentados que a modo de corona presentan un agujero para permitir el paso de la clavija, por lo que el dimensionado del conector debe contemplar la clavija para permitir su paso y una disposición de los dientes que interfieran lo menos posible en la región de aplastamiento de la clavija.

En los cálculos de resistencia mecánica de las uniones tipo clavija, el valor característico de la capacidad de carga por plano cortante y por elemento mecánico de fijación ($F_{V,Rk}$) debe tomarse como el menor valor de los obtenidos en los distintos modos de fallos (Apartado 2.7.3), y no se contemplan con rigor:

- Los efectos axiales introducidos por tuercas y arandelas.
- Los efectos de fricción, tanto por contacto entre la superficie de la clavija con el agujero, como entre superficies de madera, especialmente cuando las cargas normales se pueden incrementar (por ejemplo, al introducir tracciones con la fijación de los pernos con tuerca y arandela).

Resulta interesante mejorar el comportamiento de los pernos cuando se intentan cubrir necesidades y exigencias reales. Medidas que se pueden tomar son por ejemplo:

- Controlar la retención del agua resguardando la unión, ya sea para evitar pudrición o para mejorar la resistencia frente al fuego de la unión.
- Conocer la resistencia característica de la clavija para un deslizamiento dado, sobre todo si están sometidas a efectos sogá derivados de situaciones particulares como la expansión de la clavija.

- Definir el comportamiento de agujeros rellenos con materiales distintos al de la clavija expuesta a flexión, por ejemplo destinado a holguras para la inyección de adhesivo.

Al realizar un estudio analítico, se ha observado que la variable dimensional que más afectan a los valores de capacidad de carga en la unión ($F_{v,Rki}$) es sobre todo el diámetro de la clavija (d). En la Figura 5-21 se anticipa parte de los resultados (desarrollados en el Capítulo 6 y condensados en la Tabla 6-16). La capacidad de carga ($F_{v,Rki}$) se representa en el eje vertical y el subíndice “i” viene a indicar el modo de fallo, siendo habitual que se pase de un modo de fallo 4 ($i = 4$) con diámetros de clavija pequeños a modo de fallo 3 a medida que aumenta el diámetro. Por otro lado, se pueden apreciar mayores pendientes al incrementar el diámetro, mientras que las variaciones en el espesor de las piezas de madera (t_1 y t_2) no mejoran significativamente la capacidad de carga. Cuando los espesores (de la madera) se reducen significativamente aparecen modos de fallo 1 o 2 (el fallo de la unión se origina en la madera), y esto no es de interés para un buen diseño de la estructura como ya se vio en el Capítulo 4.

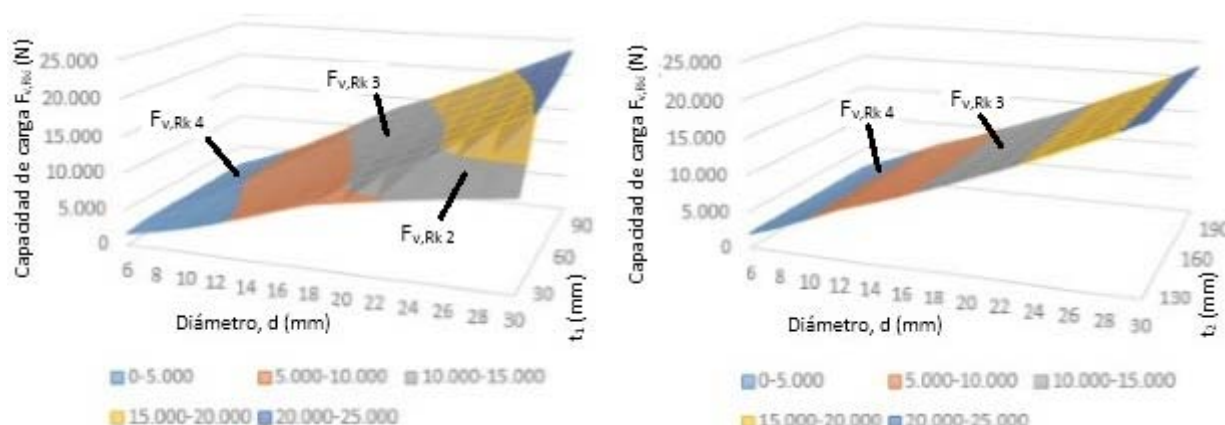


Figura 5-21. Evolución de los modos de fallo ($F_{v,Rki}$), como función de las variables geométricas.

Las características de la unión se encuadran en un segmento cercano al de una estructura real (la expuesta en el Apartado 3.9 relativa a los almacenes de la dársena del Canal de Castilla). Considerando la mayor influencia del diámetro de clavija (d) en el rendimiento del nudo, se plantearon tres bloques de ensayos experimentales:

- Primer bloque: fijando un rango de diámetros limitado, se centran los ensayos en la variación de otros parámetros de la clavija (como tipo de acero, superficies de contacto y refuerzos sobre la clavija simple) fijando una relación $2 \cdot t_1 = t_2$ entre los espesores de madera que permita analizar el comportamiento de la unión ante variables no geométricas.
- Segundo bloque: con escuadrías de mayor tamaño, variando el ancho de las piezas laterales, tomando relaciones de espesor en las piezas de madera de tipo $2 \cdot t_1 < t_2$ y el diámetro de clavija al objeto de obtener un modo de fallo con rótulas plásticas en el perno (modos de fallo 4 y 3), para pasar a modos de fallo en las piezas laterales de madera (modo de fallo 2) que permitan comparar el modo de fallo analítico con el real.
- Tercer bloque: fijando la geometría de la madera, se centraron los ensayos en una variación del diámetro de la clavija y el ángulo de orientación de la fibra, manteniendo la relación entre los espesores de las piezas de madera $2 \cdot t_1 = t_2$ que permita la posición de las piezas de madera.

En las referencias bibliográficas (Dorn et al., 2013) se observan ensayos con agrupaciones de entre tres y cinco probetas de las mismas características para validar los resultados. Debe recordarse que, para la caracterización de Madera Estructural (UNE-EN 384, 2004), se fija un número de probetas mayor de cuarenta, considerando el coeficiente k_5 reflejado en la Figura 5-7; sin embargo, esta norma trata propiedades de madera y no la composición de toda una unión con distintas piezas de madera y con clavija (aspecto que da lugar a mayor número de parámetros de diseño). Tras realizar visitas y reuniones en reconocidos laboratorios, como el Instituto Nacional de Investigación

y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), se tomó la decisión de adoptar repeticiones de ensayos para tres probetas iguales, considerando que:

- Los ensayos realizados son destructivos.
- Las probetas tienen escuadrías grandes (semejantes a las de estructuras reales).
- Los cambios realizados de una a otra probeta suponen modificaciones escalonadas de diseño y, en ocasiones, superposición de efectos.
- El alto coste de fabricación y ejecución del ensayo:
 - El precio de fabricación por probeta oscila (a fecha de este trabajo) entre 40 € y 95 € por unidad, a lo que habría que agregar los costes de ejecución del ensayo (agradeciendo a INZAMAC Asistencias Técnicas, S.L. la puesta a nuestra disposición sin coste de sus laboratorios y máquinas).
 - El tiempo de ejecución de ensayo es alto, debido a la necesidad de una aplicación lenta y gradual de cargas, controles previos a la ejecución y la redacción del informe de cada uno de los ensayos.

Las muestras se han definido a partir de tres repeticiones de probetas con iguales características. Excepcionalmente, determinadas muestras han quedado representadas por dos probetas, cuando se ha identificado una incidencia en los resultados de ensayo que ha provocado el descarte de la tercera muestra. En casos muy puntuales se ha realizado el ensayo con una sola probeta, por ejemplo cuando la variación de espesor t_1 es pequeña y está en el marco de una serie en la que solo se ha cambiado ese parámetro (por ejemplo, el espesor de las piezas de madera lateral); por lo tanto, existen resultados próximos (derivados de ensayos muy parecidos) que podrían identificar irregularidades por interpolación.

Para identificar cada probeta se hará uso de la notación [PXXX], donde “P” es indicativo de probeta y “XXX” el número de probeta y su correspondiente ensayo, dado que este es destructivo. Para las muestras, entendiendo éstas como agrupación de probetas iguales, el proceso será semejante: con la notación [MXX], donde “M” es indicativo de muestra y “XX” es el número de muestra. Para describir las características más significativas de la unión clavija se ha hecho uso de una notación descriptora compacta que se describe en la Figura 5-22.

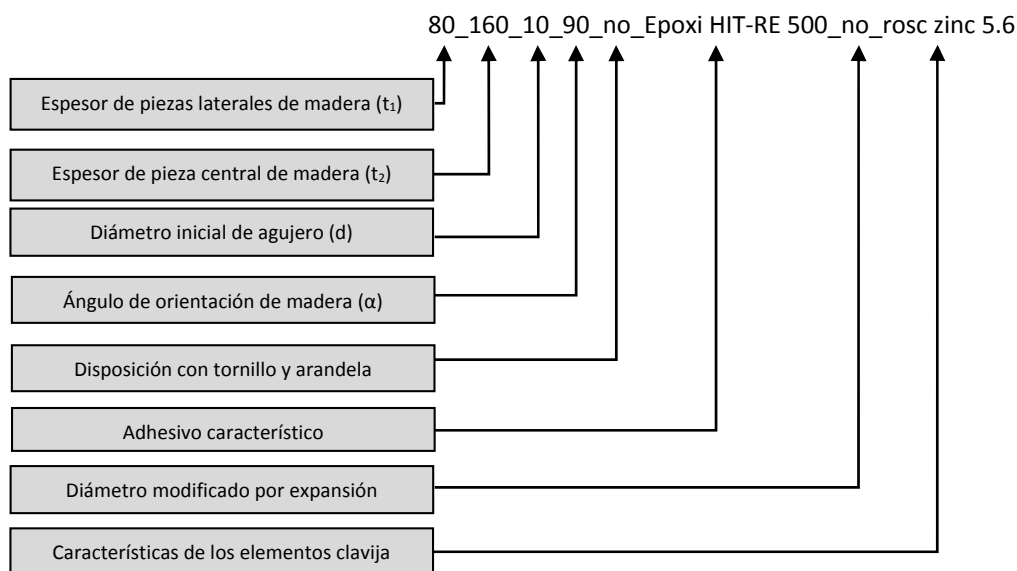


Figura 5-22. Notación descriptora compacta de probetas y muestras.

En la Tabla 5-5 se muestra la relación de probetas ensayadas con su descriptor compacto (descrito en la Figura 5-22). Los informes de ensayo se facilitan en soporte digital en el Anexo D, que ha sido generado a partir de una aplicación (basada en una estructura de base de datos a medida) que se vincula también con las hojas de cálculo y permite componer la información de probetas, ensayos y resultados analíticos según se indicó en el Apartado 2.5.1.

Tabla 5-5. Relación de probetas en ensayo.

Identificador de la probeta de ensayo	Descriptor inicial de la muestra	Tipo de madera	ρ_{real} (kg/m ³)
P001	100_200_10_0_si_no_no_rosc zinc 5.6	Madera maciza (C30)	589,51
P01A	100_200_24_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	418,48
P01B	100_200_30_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	447,64
P002	100_200_16_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	420,49
P004	90_200_10_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	0,00
P005	80_200_10_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	395,34
P006	70_200_10_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	385,84
P007	100_200_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	434,20
P008	100_200_24_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	394,50
P009	100_200_30_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	450,79
P010	100_200_16_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	455,88
P011	100_200_20_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	428,44
P012	100_200_20_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	436,12
P013	100_200_10_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	422,35
P014	100_200_10_0_si_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	424,10
P015	100_200_10_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	436,14
P016	100_200_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	447,33
P017	100_200_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	438,67
P018	100_200_20_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	449,64
P019	100_200_20_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	477,56
P020	100_200_20_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	463,53
P021	100_200_20_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	460,69
P022	100_200_30_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	454,86
P023	100_200_30_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	486,41
P024	100_200_30_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	491,74
P025	100_200_30_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	492,29
P026	100_200_10_0_si_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	530,51
P027	100_200_10_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	425,33
P028	40_200_20_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	442,68
P029	40_200_20_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	484,00
P030	40_200_20_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	482,18
P031	40_200_20_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	479,91
P032	100_200_10_90_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	468,79
P033	100_200_10_90_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	458,89
P034	100_200_10_90_si_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	456,79
P035	100_200_10_90_si_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	438,89
P036	100_200_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	443,69
P037	100_200_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	431,89
P038	100_200_10_45_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	456,14
P039	100_200_10_45_no_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	432,77
P040	100_200_10_45_si_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	453,14
P041	100_200_10_45_si_no_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	435,14
P042	100_200_10_45_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	450,42
P043	100_200_10_45_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	QL24h (S10)	437,29
P044	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	GL24h	444,77
P045	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	GL24h	457,44
P046	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	GL24h	443,90
P047	80_160_12_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6	GL24h	449,37
P048	80_160_12_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6	GL24h	443,62
P049	80_160_12_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6	GL24h	442,76
P050	80_160_10_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6	GL24h	440,59
P051	80_160_10_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6	GL24h	430,31
P052	80_160_10_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6	GL24h	429,92
P053	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa alta res.	GL24h	434,22
P054	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa alta res.	GL24h	451,23
P055	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa alta res.	GL24h	445,12
P056	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc. F1	GL24h	446,55
P057	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc (S275 JR)	GL24h	425,50
P058	80_160_10_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	GL24h	426,37
P059	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc. F1	GL24h	425,50

Tabla 5-4. Relación de probetas en ensayo (Cont. 1).

Identificador de la probeta de ensayo	Descriptor inicial de la muestra	Tipo de madera	ρ_{real} (kg/m ³)
P060	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc. F1	GL24h	455,49
P061	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc (S275 JR)	GL24h	449,54
P062	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc (S275 JR)	GL24h	442,73
P063	80_160_10_0_no_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	435,52
P064	80_160_10_0_no_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	433,27
P065	80_160_10_0_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	GL24h	433,40
P066	80_160_10_0_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	GL24h	455,60
P067	80_160_10_0_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	GL24h	426,10
P068	80_160_10_0_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosco zinc 5.6	GL24h	427,84
P069	80_160_10_0_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosco zinc 5.6	GL24h	428,45
P070	80_160_10_0_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosco zinc 5.6	GL24h	423,20
P071	80_160_10_45_si_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	417,95
P072	80_160_10_45_si_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,60
P073	80_160_10_45_si_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,60
P074	80_160_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,60
P075	80_160_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosco zinc 5.6	GL24h	451,50
P076	80_160_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosco zinc 5.6	GL24h	443,86
P077	80_160_10_90_no_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	458,66
P078	80_160_10_90_no_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	447,46
P079	80_160_10_90_no_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	447,20
P080	80_160_10_0_no_no_no_Moleteado N (S275 JR)	GL24h	452,15
P081	80_160_10_0_no_no_no_Moleteado F1	GL24h	443,90
P082	80_160_10_0_si, apriete 15 Nm_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	453,62
P083	80_160_12_0_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	GL24h	455,60
P084	80_160_12_0_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	GL24h	455,50
P085	80_160_12_0_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	GL24h	455,50
P086	80_160_10_90_si, apriete 15 Nm_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,50
P087	80_160_10_90_si, apriete 15 Nm_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	439,60
P088	80_160_10_90_si, apriete 15 Nm_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	447,94
P089	80_160_14_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosco zinc 5.6	GL24h	451,54
P090	80_160_14_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosco zinc 5.6	GL24h	446,07
P091	80_160_14_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosco zinc 5.6	GL24h	447,76
P092	80_160_14_0_no_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	447,24
P093	80_160_14_0_no_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	454,83
P094	80_160_14_0_no_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	458,39
P095	80_160_14_0_no_no_si, metálica_rosco zinc 5.6	GL24h	445,89
P096	80_160_14_0_no_no_si, metálica_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P097	80_160_14_0_no_no_si, metálica_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P098	80_160_14_0_no_no_si, plástica_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P099	80_160_14_0_no_no_si, plástica_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P100	80_160_14_0_no_no_si, plástica_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P101	80_160_14_0_si_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P102	80_160_14_0_si_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P103	80_160_14_0_si_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P104	80_160_14_45_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P105	80_160_14_45_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosco zinc 5.6	GL24h	426,84
P106	80_160_14_45_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosco zinc 5.6	GL24h	437,95
P107	80_160_14_45_no_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	436,60
P108	80_160_14_45_no_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P109	80_160_14_45_no_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P110	80_160_14_45_no_no_si, metálica_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P111	80_160_14_45_no_no_si, metálica_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P112	80_160_14_45_no_no_si, metálica_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P113	80_160_14_45_no_no_si, plástica_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P114	80_160_14_45_no_no_si, plástica_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P115	80_160_14_45_no_no_si, plástica_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P116	80_160_10_90_si_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,38
P117	80_160_10_90_si_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,60
P118	80_160_10_90_si_no_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,60
P119	80_160_14_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosco zinc 5.6	GL24h	455,60

Tabla 5-4. Relación de probetas en ensayo (Cont. 2).

Identificador de la probeta de ensayo	Descriptor inicial de la muestra	Tipo de madera	ρ_{real} (kg/m ³)
P120	80_160_14_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	GL24h	455,38
P121	80_160_14_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	GL24h	455,38
P122	80_160_10_90_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosc zinc 5.6	GL24h	455,38
P123	80_160_10_90_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosc zinc 5.6	GL24h	455,60
P124	80_160_10_90_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosc zinc 5.6	GL24h	455,60
P125	80_160_10_90_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	GL24h	455,60
P126	80_160_10_90_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	GL24h	455,60
P127	80_160_10_90_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	GL24h	455,60
P128	80_160_10_90_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosc zinc 5.6	GL24h	455,60
P129	80_160_10_90_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosc zinc 5.6	GL24h	424,15
P130	80_160_10_90_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosc zinc 5.6	GL24h	425,15
P131	80_160_12_90_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	GL24h	436,61
P132	80_160_12_90_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	GL24h	455,50
P133	80_160_12_90_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	GL24h	455,50
P134	80_160_10_0_no_no_no_Lisa	GL24h	455,50
P135	80_160_10_0_no_no_no_Lisa	GL24h	427,06
P136	80_160_10_0_no_no_no_Lisa	GL24h	438,17
P137	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa	GL24h	436,83
P138	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa	GL24h	432,40
P139	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa	GL24h	439,30
P140	80_160_10_0_Conector interc._no_no_rosc zinc 5.6	GL24h	437,22
P141	80_160_10_0_Conector interc._no_no_rosc zinc 5.6	GL24h	438,56
P142	80_160_10_0_Conector interc._no_no_rosc zinc 5.6	GL24h	429,40
P143	80_160_10_0_no_no_no_Lisa alta res.	GL24h	445,33
P144	80_160_10_0_no_no_no_Lisa alta res.	GL24h	440,21
P145	80_160_10_0_no_no_no_Lisa alta res.	GL24h	437,91

A pesar de que el número total de ensayos realizados es superior a 100 (inicialmente 145), la norma de aplicación estructural (DB SE M, 2009) recomienda definir los valor característicos a partir del 5º percentil de una población estadística con distribución normal (Apartado 5.2.7). Sin embargo el número de probetas es habitualmente tres para cada muestra y no permite hacer una distribución normal para obtener el 5º percentil. Por ese motivo, se plantea el uso de una media ponderada como reflejan otros trabajos (Otero et al., 2010), y para conseguir valores cercanos al nivel de confianza del 5º percentil se toma la capacidad de carga mínima corregida para las probetas idénticas. No obstante, es importante destacar que el objetivo de los ensayos no era determinar valores de resistencia de las uniones en puntos característicos, sino evaluar comparativamente los resultados de probetas con características geométricas y constructivas distintas y su evolución en deslizamiento, mostrando el aspecto de las curvas características frente a los modelos existentes. Estos criterios han sido empleados también por otros investigadores (Otero et al., 2010).

5.3.1.5 Control y verificación en las probetas

5.3.1.5.1 Control de humedad en la madera

El acondicionamiento de las probetas debe conseguir que el contenido de humedad de las probetas previo al ensayo sea lo más parecido posible al contenido en humedad de equilibrio en condiciones de servicio (Argüelles et al., 2003). En cualquier caso, se recomienda que esté por debajo del 25 % (Wood Handbook, 1998).

Lo más aconsejable es emplear cámaras climáticas donde, mediante condiciones de temperatura y humedad controlada durante un periodo de tiempo determinado, es posible conseguir que la madera de la misma probeta alcance unas determinadas condiciones de humedad relativa. También existen otros métodos [como el de estufa, que supone llevar la madera a temperaturas de 103 °C para conseguir reducciones en el contenido de humedad por desecación, hasta alcanzar las condiciones de humedad relativa deseada, siguiendo la norma (UNE-EN 13183, 2004)]. Verificadas las dimensiones, la densidad y el contenido en agua, éstas se volverán a comprobar una vez ejecutado el ensayo. Si la madera está certificada, el contenido de humedad obtenido por desecación se puede considerar como

el previo a la adquisición de la misma, siempre que se haya protegido y respetado las indicaciones de transporte y almacenaje; pudiendo penalizar la resistencia de la madera si se sobrepasa el 12 % de humedad, según la norma (UNE-EN 384, 2004). En tal caso, la densidad debe disminuirse un 0,5 % por cada incremento del 1 % del contenido de humedad de más. Cuando el contenido de humedad sea menor del 12 %, la densidad debe aumentarse un 0,5 % por cada 1% de variación del contenido de humedad de menos. Para estar del lado de la seguridad y tener variaciones de densidad pequeñas (incrementos de hasta el 2 %), se despreciará el efecto de este último criterio. En este caso, aunque se dispone de cámaras climáticas de desecación (Figura 5-23), no fue necesario su uso, ya que la madera adquirida con certificación de calidad no superó en ningún caso el 12 % de humedad.



Figura 5-23. Cámaras de acondicionamiento de humedad.

El contenido en humedad debe verificarse con equipos como el xilohigrómetro de resistencia, debidamente calibrado. Esta forma de proceder ratifica las prescripciones normativas y permite, junto con el pesado de la probeta, ratificar la densidad de la madera y el contenido de humedad durante el ensayo. Estos datos son rápidos y fáciles de obtener (véase Figura 5-24).



Figura 5-24. Control de humedad y verificación con xilohigrómetro Seltar HGD-1.

5.3.1.5.2 Control de ejecución

Es importante la revisión de las especificaciones de montaje descritas en el Capítulo 3, especialmente aquellas que quedan condicionadas por la ejecución de los operarios, como pueden ser:

- La fecha de caducidad del epoxi.
- La correcta mezcla y aplicación del adhesivo en todo el agujero (Figura 5-25).
- El pretensado de tuerca-arandela (Figura 5-26).
- El embutido de varillas.

De no ser así, pueden aparecer vicios ocultos que afecten a los resultados y que difícilmente pueden ser identificados *a posteriori*.



Figura 5-25. Verificación de idoneidad del adhesivo y proceso de montaje.



Figura 5-26. Verificación de pretensado en probetas con tuerca-arandela.

5.3.1.5.3 Control de peso, humedad de la madera y variables ambientales

El control de peso se realiza como medida complementaria al control de humedad y permite corroborar la densidad (conocido su volumen). Este pesado se realiza justo tras la ejecución del ensayo (Figura 5-27).



Figura 5-27. Control de peso de probetas tras ensayo.

La madera debe acondicionarse hasta conseguir una masa constante, antes de la colocación del elemento de fijación, en una atmósfera con una humedad relativa de $65 \pm 5 \%$ y a una temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (UNE-EN 7520, 1994). Una vez elaborada la probeta, y de forma previa al ensayo, el conjunto de probeta debe acondicionarse de nuevo de la misma forma. Existen tablas que correlacionan la humedad de equilibrio de la madera en función de la temperatura y la humedad relativa del aire. La norma (UNE-EN 383, 2007) contempla que, para estudios especiales, se admite realizar el acondicionamiento de la probeta en otras condiciones de humedad, antes y después de la colocación del elemento de fijación, debiendo reseñarse en el informe de ensayo.

Se deben verificar otras particularidades, como las relacionadas con el fraguado del adhesivo epoxi, debiendo permanecer la probeta ya ensamblada con al menos 4 días en condiciones análogas a las del ensayo. Esto conlleva la necesidad de identificar, en los informes de ensayo, la fecha de entrega de probeta y la fecha de realización del ensayo.

5.3.2 Procedimiento de carga

5.3.2.1 Estimación de la carga máxima y aplicación de la misma

La norma (UNE-EN 26891, 1992) establece que el ensayo se debe programar partiendo de una carga máxima estimada (F_{est}) para el tipo de unión que se va a ensayar. Dicha carga deberá fijarse sobre la base de la experiencia, cálculo o ensayos preliminares, y deberá ajustarse. En nuestro caso se partió de los valores de cálculo analítico ($F_{v,Rk}$) para definir inicialmente los valores de F_{est} . Durante la realización de los ensayos, la carga máxima (F_{max}) se puede desviar en más de un 20 % respecto al valor estimado (F_{est}). En tal caso, la carga estimada se debe ajustar para los ensayos sucesivos. La norma permite que los valores ya determinados se utilicen, pero ajustando las deformaciones y los módulos de aplastamiento, motivo por el cual en los ensayos ejecutados las variables calculadas en el ciclo de carga continuo (sobrepasada la parada de 30 s en el 10 % de la carga estimada) se han determinado calculándose sobre la carga máxima (F_{max}) del ensayo. Debe seguirse el procedimiento de carga que se muestra en la Figura 5-28.

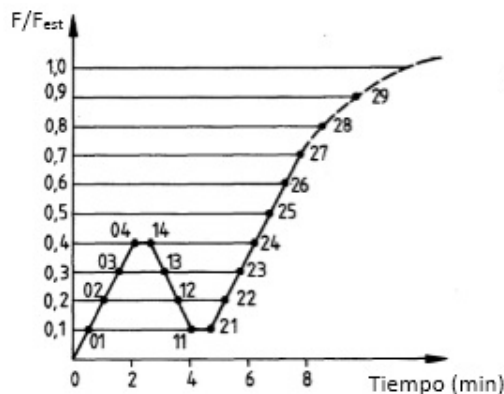


Figura 5-28. Procedimiento de carga (UNE-EN 26891, 1992).

Una vez fijada la carga estimada (F_{est}) se aplica gradualmente la carga hasta alcanzar un 40 % de este valor ($0,4 \cdot F_{est}$) y se mantiene durante 30 s. Después, se reduce a un 10 % ($0,1 \cdot F_{est}$) y se mantiene durante otros 30 s para incrementar de nuevo la carga hasta alcanzar la carga final estimada o un deslizamiento de 15 mm. La velocidad de aplicación de cargas debe ser lenta, y la norma considera que hasta el 70 % de F_{est} se puede aplicar un régimen constante de carga o de deslizamiento que corresponda a $0,2 F_{est}$ por minuto ± 25 %. Una vez alcanzado al $0,7 \cdot F_{est}$, se debe aplicar una velocidad constante de deslizamiento; el objetivo es que se logre la carga final (o el deslizamiento de 15 mm) en un tiempo de ensayo adicional de 3 a 5 min. Esto supone que la duración del ensayo está entre 10 y 15 min. Otras referencias (UNE-EN 408, 2004) indican duraciones de ensayo de 300 ± 120 s (5 ± 2 min) para la determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas, aunque el programa de ensayos se ceñirá a las indicaciones de la norma (UNE-EN 26891, 1992), dado que el tiempo fijado en ésta (15 min) es más cercano a las condiciones estáticas de trabajo de la estructura.

En la práctica, los resultados no varían si se toma el criterio de aplicar carga o deslizamiento constante en el primer tramo. Las limitaciones de programación en la máquina de ensayos llevan a fijar como criterio un ensayo en deslizamiento (en las probetas realizadas con la primera máquina) y en carga constante (para las realizadas con la segunda), pero por encima de $0,7 \cdot F_{est}$ no se cambian los parámetros de carga constante a deslizamiento constante; lo que permite dar homogeneidad a los resultados del ensayo (y acercarlo a un comportamiento que permite considerar simplificaciones estáticas). El tiempo de duración del ensayo es analizado en el Capítulo 6, donde se verá que la velocidad de deformación se mantiene también sensiblemente constante.

5.3.2.2 Medición del deslizamiento y carga

Según la norma (UNE-EN 26891, 1992) es suficiente registrar, para cada probeta ensayada, los deslizamientos v_{01} , v_{04} , v_{14} , v_{11} , v_{21} , v_{24} , v_{26} y v_{28} , valores que se pueden identificar en la Figura 5-28. También, debe registrarse el deslizamiento que corresponde con la carga máxima (F_{max}). Si no se dispone de un diagrama carga-deslizamiento, las mediciones de deslizamiento habrán de tomarse en cada incremento de $0,1 \cdot F_{est}$ de la carga. La carga máxima (F_{max}) para cada probeta en ningún caso debe ser superior a la alcanzada para un deslizamiento de 15 mm. En la práctica, para las uniones con clavija objeto de este estudio, se ha determinado el valor de la carga estimada (F_{est}) a partir de los valores analíticos ($F_{v,Rk}$) y se han obtenido valores muy bajos en relación con el deslizamiento límite de 15 mm. Teniendo en cuenta que la unión presentaba pendientes con alta rigidez, se ha continuado el ensayo considerando la carga máxima a 15 mm y llevando el ensayo hasta los 60 mm de deslizamiento estudiando toda la curva carga-desplazamientos de forma continua y no solo en puntos característicos por debajo de F_{max} .

5.3.2.3 Cálculos

En el ensayo se determinan los valores de las variables indicadas en la Tabla 5-6, relacionados con las medidas efectuadas según evoluciona la ejecución del mismo:

Tabla 5-6. Valores calculados en el ensayo según la norma (UNE-EN 26891, 1992).

1	Carga máxima	F_{max}
2	Carga máxima estimada	F_{est}
3	Deslizamiento inicial	$v_i = v_{04}$
4	Deslizamiento inicial modificado	$v_{i,mod} = \frac{4}{3} \cdot (v_{04} - v_{01})$
5	Asiento de la unión	$v_s = v_i - v_{i,mod}$
6	Deslizamiento elástico	$v_e = \frac{2}{3} \cdot (v_{14} + v_{24} - v_{11} - v_{21})$
7	Módulo de deslizamiento inicial	$k_i = \frac{0,4 \cdot F_{est}}{v_i}$
8	Módulo de deslizamiento	$k_s = \frac{0,4 \cdot F_{est}}{v_{i,mod}}$
9	Deslizamiento a $0,6 \cdot F_{max}$.	v_{06}
10	Deslizamiento modificado a $0,6 \cdot F_{max}$.	$v_{06,mod} = v_{06} - v_{24} + v_{i,mod}$
11	Deslizamiento a $0,8 \cdot F_{max}$.	v_{08}
12	Deslizamiento modificado a $0,8 \cdot F_{max}$.	$v_{08,mod} = v_{08} - v_{24} + v_{i,mod}$

Muchos ensayos de carga-deslizamiento siguen inicialmente una curva convexa, ya que el asiento en la unión (v_s) es negativo. Los valores calculados para el deslizamiento a $0,6 \cdot F_{max}$ hasta el deslizamiento modificado a $0,8 \cdot F_{max}$ (contemplados en los registros 9 a 12 de la Tabla 5-6) se refieren al valor de F_{max} para cada uno de los ensayos. En la práctica, dado que se dispone del diagrama de carga frente a deslizamiento se tomarán de la lectura de dicho diagrama. Mientras en los tramos previos al punto 21 (Figura 5-28) se hace uso de valores referidos a deslizamientos calculados a partir de F_{est} .

El procedimiento debe relacionar con la mayor precisión posible el punto de inicio de ensayo con el origen descrito en la norma (UNE-EN 26891, 1992). Por ello es aconsejable definir:

- Una precarga ($F_{Precarga}$), que establezca el inicio de contacto entre la placa aplicadora de carga de la máquina de ensayos y la probeta de ensayo; el valor debe ser muy pequeño en relación con la capacidad de carga

de la unión estructural a ensayar. Se ha establecido en 50 N, punto a partir del cual se fija el origen de los ejes del sistema de referencia, tanto en carga como en deslizamiento.

- La holgura (u_{hol}), que establezca el inicio del deslizamiento donde la unión está trabajando en condiciones de consolidación inicial; especialmente porque se contempla una relación entre el módulo de deslizamiento del ensayo (k_s) y el que se obtiene a partir de la densidad (K_{ser}), descrito para distintos elementos de fijación en Tabla 2-23, que dan lugar al deslizamiento final (u_{final}) descrito en el Apartado 2.7.11.

En la práctica, la opción más eficaz es colocar a cero el origen para el sistema de referencia de carga frente a deslizamiento una vez realizada la precarga, porque si no los resultados se ven alterados.

5.3.3 Dispositivo de ensayos

5.3.3.1 Requerimientos en las máquinas de ensayos

De forma general, las máquinas deben estar calibradas y verificadas. Los requerimientos más particulares se basan en la norma (UNE-EN 26891, 1992) y en la norma (UNE-EN 383, 2007). En ambas se indica que:

- La máquina de ensayo y los sistemas de acoplamiento de la probeta no deben ejercer esfuerzos de fricción entre las placas de acero y las probetas que influyan en las medidas.
- Las superficies que transmiten la carga deben ser planas, paralelas entre sí y perpendiculares al eje en el que se aplica carga sobre la probeta.
- La probeta ha de colocarse simétricamente en el dispositivo de ensayo.
- La carga debe aplicarse sobre el eje de la probeta.
- En general, los equipos de medida y el sistema de acoplamiento deben asegurar que no haya excentricidades, torsiones, etc., que pudieran influir en las mediciones.

Esta preparación debe realizarse después del acondicionamiento. Además de los instrumentos destinados a la medida de las dimensiones de la probeta, el contenido de humedad, etc., el equipo debe incluir:

- Un dispositivo de carga que pueda aplicarla de manera continua y registrarla con una precisión de $\pm 1\%$ de la carga aplicada. La norma de ensayos (UNE-EN 383, 2007) añade que, para las cargas menores a la décima parte de la carga máxima estimada ($0,1 \cdot F_{est}$), la precisión será del $\pm 0,1\%$ de esa carga máxima estimada teniendo en cuenta que se puede relacionar de forma analítica con la capacidad de carga por plano cortante y elemento de fijación ($F_{v,Rk}$) tal y como indica la norma (DB SE M, 2009).
- Un sistema para la medición del deslizamiento en la unión expuesta a carga con un $\pm 1\%$ de precisión o superior. Se debe tener en cuenta que, si los deslizamientos son inferiores a 2 mm, la precisión debe ser al menos de $\pm 0,02$ mm.

5.3.3.2 Caracterización técnica de las máquinas empleadas para ensayos

En los ensayos controlados mediante velocidad constante de desplazamiento constante se ha empleado el modelo MTS Alliance RF200, fabricada por MTS Insight® Electromechanical Testing Systems, con una célula de carga de 200 kN, perteneciente a la Universidad de Salamanca, Departamento de Ingeniería Mecánica, ubicada en la E.T.S de Ingeniería Industrial (Béjar), junto con el software de adquisición de datos Test Works 4.0.

En los ensayos controlados mediante velocidad constante de carga se ha empleado el modelo Codein® en tracción y compresión, fabricada por la casa del mismo nombre, con una célula de carga de 300 kN, con calibración y emisión de certificado ENAC, perteneciente a Inzamac Asistencias Técnicas SL y ubicada en su centro de trabajo de Zamora. Presenta un sistema de adquisición de datos integrado, mientras que el sistema de aplicación de carga es de accionamiento electromecánico. En el ensayo de compresión, las probetas se apoyaron en un balastro de extensión para garantizar el contacto con toda la base de la probeta, que estaba colocado sobre el plato inferior que se

desplaza en sentido vertical y hacia arriba. El plato de compresión superior estaba fijado a un dintel que se mantenía fijo durante el ensayo, aunque se podía ajustar previamente a distinta altura para amoldarse a las dimensiones de la probeta.

En ambos casos, el uso habitual de las máquinas no era para ensayos en madera, sino para ensayos de tracción de acero y de compresión en hormigón, respectivamente, lo que hizo necesarios ciertos ajustes así como realizar un análisis detallado de las mismas.

5.3.3.2.1 Máquina empleada en ensayos controlados mediante velocidad de desplazamiento constante

La máquina MTS Insight 200 históricamente se ha empleado para realizar ensayos de tracción con probetas de acero. Se puede observar la arquitectura dimensional y las propiedades que la caracterizan en la Figura 5-29 (véase Tabla 5-7 y Tabla 5-8).

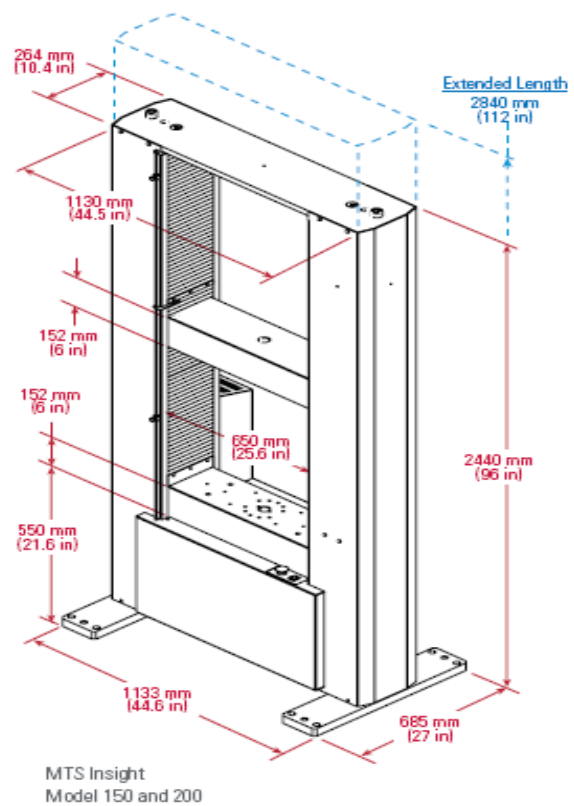


Figura 5-29. Máquina de ensayos MTS Insight 200.

Tabla 5-7. Parámetros generales de la máquina MTS Insight 200.

Configuración de columna	Doble
Capacidad de carga	200 kN
Espacios de trabajo	
Longitud estándar	1.200 mm
Longitud extendida	1.600 mm
Velocidad máxima de prueba	500 mm/min
Velocidad mínima de prueba	0,01 mm/min
Altura	
Altura estándar	2.440 mm
Altura extendida	2.840 mm
Ancho	1.133 mm
Fondo	685 mm
Peso	
Estándar	970 kg
Extendido	1.029 kg
Ejes de cubierta de la columna	650 mm
Espacio entre columnas	25,6 in
Requisitos de tensión	400 VAC trifásico

Tabla 5-8. Precisión de la máquina MTS Insight 200 y características de sistema electromecánico de ensayo.

Capacidad de trabajo en la prueba de velocidad máxima	100 % para MTS Insight 200
Velocidad máxima de prueba en capacidad nominal de trabajo	100 % para MTS Insight 200
Exactitud de la velocidad *	± 0,05 % de la velocidad máxima
Precisión de la posición *	0,01 mm
Resolución de la posición	0,001 mm
Motor y la unidad del sistema	Precisión en DC con servomotor
Control de velocidad	Onda sinusoidal para 100-300 Hz
Ball screws	Anti golpe
Cruceta Orientación	Dos guías por columna
Medición de posición	Encoder óptico
Canales de deformación	Dos canales de salida de resultados de deformación opcionales. Permite acondicionar un canal digital extensómetro de gran alargamiento
Requisitos ambientales	
Temperatura de funcionamiento	10 a 38 °C
Humedad de funcionamiento máxima	70 % sin condensación
Temperatura de almacenamiento	-18 a +49 °C
Humedad máxima de almacenamiento	90 %
<p>* Con el fin de seguir las normas ASTM, MTS recomienda calibraciones <i>in situ</i> por las normas pertinentes.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. El sistema de pesaje de carga cumple o supera las siguientes normas: ASTM E 4, BS 1610, DIN 51221, ISO 7500-1, EN 10002-2 y AFNOR_A03-501. 2. El sistema de medición de tensión cumple o supera las siguientes normas: ASTM E 83, BS 3846, ISO 9513, EN 10002-4. 3. Estos sistemas cumplen con todas las normas europeas en la materia y llevan la marca CE. 	

Los valores de las variables se deben programar en la máquina para el desarrollo del ensayo, mediante el *software* Test Works 4.0 en modo de compresión, según las indicaciones del fabricante (MTS, 2009). Estas variables alimentan la librería de ensayos integrada con el *software* de control y se exponen en la Tabla 5-9. Se debe tener presente que el procedimiento de carga descrito (Apartado 5.3.2) no está contemplado en la librería (a diferencia de lo que ocurre con otros ensayos más comunes como el de tracción simple en materiales metálicos). Aunque los parámetros básicos (como la velocidad de desplazamiento) sí se pueden introducir, es necesario separar los resultados de otra información calculada por el *software* (como la tensión) que no es aplicable a este ensayo. Afortunadamente, la máquina facilita estas entradas y suministra información que respeta las recomendaciones de la norma (UNE-EN ISO

6892-1, 2010) respecto al control del ordenador y permite señales de control analógicas, dando resultados de tiempo, carga y deslizamiento en unidades básicas del sistema internacional.

Tabla 5-9. Parámetros de ensayo descritos en el software Test Works 4.0.

Width, 20,000, "mm"	Header1, "", ""	YieldSegLength, 2,0, "%"
Comment, "", ""	Header2, "", ""	SlopeSegLength, 20,000, "%"
Thickness, 5,000, "mm"	Header3, "", ""	PlatenSeparation, 0,050, "mm"
Area, 100,0000, "mm^2"	SampleID, "", ""	SlackPreLoad, 30,000, "N"
LoadCellCapacity, 200000,000, "N"	TimeLimit, 10000, "s"	_MaxSpecimens, 999, ""
PeakLoad, 21326,301, "N"	LoadLimitLow, -4448, "N"	StrainPoint01, 0,050, "mm/mm"
SlackVal, 0,004, "mm"	StrainLimitLow, -10, "mm/mm"	SecantModStrainPt1, 0,050, "mm/mm"
OffsetYield, 26, ""	ExtLimitLow, -508, "mm"	StrainEndpoint, 0,100, "mm/mm"
Peak, 602, ""	_SampleName, "MuestraXX.mss"	BreakSensitivity, 90, "%"
Yield, 199, ""	_MethodName, "compresion1A.msm"	SetPlatenSeparationLoad, 44,482, "N"
Slope1, 1, ""	ExtLimitLow, -508, "mm"	SetPlatenSeparationPreLoadSpeed, 2,520, "mm/min"
Slope2, 26, ""	StressLimitLow, -207, "MPa"	BreakThreshold, 100,000, "N"
Break, ****, ""	LoadLimitHigh, 190000, "N"	YieldOffset, 0,002, "mm/mm"
Modulus, 0,929, "MPa"	StrainLimitHigh, 10, "mm/mm"	DataAcqRate, 50,0, "Hz"
Slope, 1858,9, "N/mm"	ExtLimitHigh, 508, "mm"	InitialSpeed, 20,00, "mm/min"
PeakStress, 213,3, "MPa"	StressLimitHigh, 207, "MPa"	

El tamaño, la capacidad de las células de carga y el sistema de adquisición de datos son aptos para las características de las probetas de uniones en madera, pero, al igual que ocurría con el *software*, los elementos de acoplamiento de la máquina a la probeta no lo son. Inicialmente la máquina está dotada de mordazas de accionamiento hidráulico de pequeño recorrido (adecuadas para las probetas del ensayo de tracción en acero) no aptas para el mayor volumen de las probetas de madera empleadas, que requieren (según se indicó en el Capítulo 3) dimensiones análogas a las uniones de tamaño real, en nuestro caso con secciones de hasta 200x400 mm (Figura 5-30).

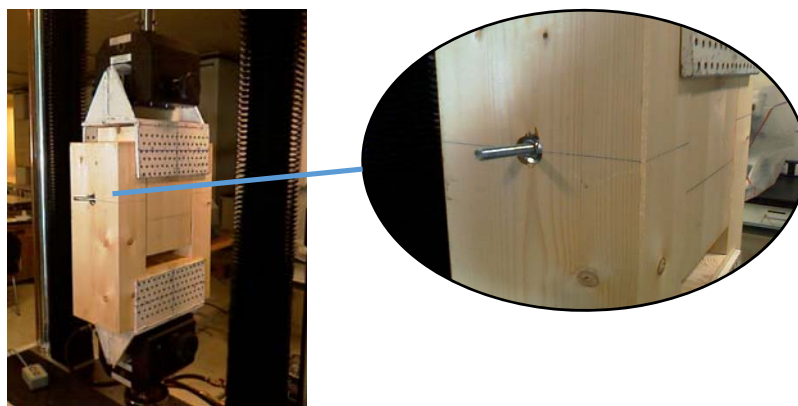


Figura 5-30. Máquina de ensayos MTS Insight 200 durante la ejecución de un ensayo.

El problema del acoplamiento a la máquina MTS Insight 200 se resolvió con un diseño de herrajes para adaptar la transición de la geometría de la madera a las mordazas, que permitió un ensayo de compresión sin riesgo de aparición de tensiones en otras direcciones que generasen una distorsión significativa en las muestras (Figura 5-31). Además, con dichos herrajes se mejoró el centrado y la manipulación de la pieza de madera en la etapa de precarga. Se diseñaron con matrices de taladros con la intención de reforzar, en caso necesario, con varillas pasantes la unión entre probeta y herraje.

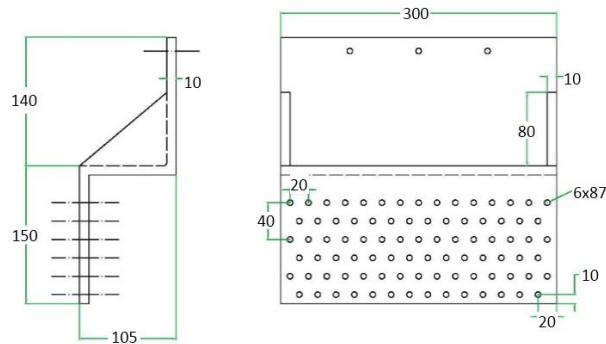


Figura 5-31. Planos de diseño de los herrajes.

La composición de los herrajes permite un desplazamiento de 10 mm para el agarre de las mordazas contra el herraje, lo cual rigidiza y ajusta también lateralmente la probeta, limitando los posibles problemas de excentricidad en los ejes. La unión definida en la Figura 5-16 con la piezas definidas en la Figura 5-17 se compone con los herrajes según la Figura 5-32.

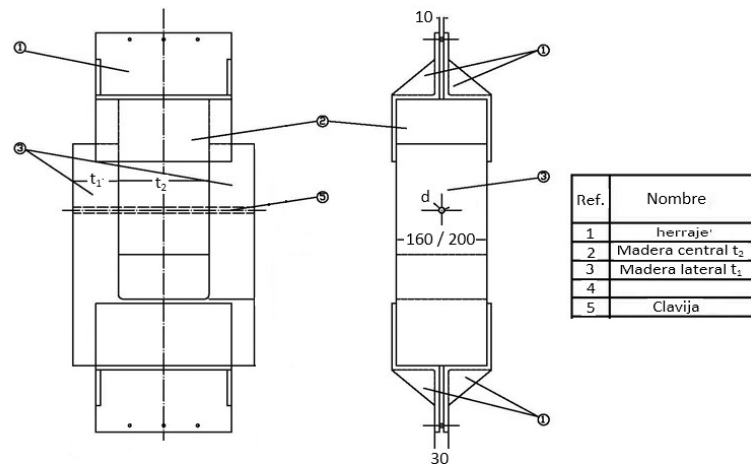


Figura 5-32. Extracto de planos de diseño y montaje de herrajes con probetas.

El material de los herrajes es un acero F114 propio del diseño de máquinas, con buena resistencia, que permite una fijación rígida a la madera. Entre las especificaciones de este tipo de acero están las siguientes:

- Soldadura: Electrodo básico o hilo CO₂. Se recomienda precalentamiento a 200-250 °C y enfriamiento lento.
- Plegado: Deficiente. Se puede mejorar la conformación aplicando recocido de ablandamiento o globular. Se recomienda conformar siempre en caliente.
- Mecanización: Precisa de tratamiento de recocido o estabilizado posterior al oxicorte para eliminar la dureza superficial resultante.
- Aplicaciones: Elementos de máquinas de buena resistencia, bloques hidráulicos, moldes y portamoldes. Templa bien. Se puede emplear para piezas templadas por inducción que requieran durezas superficiales de 55 HRC.
- Espesores de 15 a 150 mm con tratamiento normalizado.

Se optó por el montaje con placas soldadas de 10 mm de espesor, cuyas características quedan descritas en las cuatro tablas siguientes.

Tabla 5-10. Herraje de acoplamiento, acero F-114. Composición química.

C	Mn	Si	P	S	Carb. Equiv.
0.40-0.50	0.50-0.80	0.15-0.40	<0.035	<0.035	0.55

Tabla 5-11. Herraje de acoplamiento, acero F-114. Tratamientos térmicos.

Tratamiento	Temperatura	Enfriamiento
Recocido de ablandamiento	670 °C a 710 °C	Aire
Recocido globular	710 °C / 6 horas	10 °C / hora hasta 650 °C
	670 °C / 8 horas	
Normalizado	840 °C a 870 °C	Aire
Temple	830 °C a 850 °C	Agua
	840 °C a 860 °C	Aceite
Revenido	500 °C a 650 °C	Aire

Tabla 5-12. Herraje de acoplamiento, acero F-114. Equivalencias con normas.

IHA	CENIM	DIN	SAE/AISI	BS	UNI
F-114	F-1140/C45 K	CK45	1045	EN8	C-45

Tabla 5-13. Herraje de acoplamiento, acero F-114. Propiedades mecánicas.

f_u . (N/mm ²)	E. (N/mm ²)	A (%)	Dureza Brinell
600/750	330	17	175-220

Las matrices de taladros permiten la posibilidad de reforzar la unión con clavijas dispuestas de una forma escalonada para evitar desgarros o fendas. Para las uniones madera-acero que se dan entre herrajes y probeta se consideran las ecuaciones de dimensionado de la norma (DB SE M, 2009), realizando una diferenciación entre las placas de acero de espesor delgado y grueso. Debido a que una placa de espesor suficiente es capaz de impedir el giro libre de la clavija, funcionando como un empotramiento, puede por tanto llegar a formar una rótula plástica. Por el contrario, si la placa es delgada, el comportamiento es diferente, y puede producirse el giro libre.

En la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) se considera que una placa es gruesa cuando su espesor (t) es mayor o igual al diámetro de la clavija (d) y delgada cuando t es menor o igual a $0,5 \cdot d$. Para ambos extremos se desarrollan diferentes ecuaciones. Para las situaciones intermedias se admite una interpolación lineal entre ambos casos. Para el diseño de los herrajes se valoró el caso de cortadura simple en previsión de introducir tirafondos, y el de cortadura doble para introducir varillas roscadas pasantes a la madera que se fijarán en ambos extremos con tuerca y arandela. Aunque finalmente se optó por la segunda opción, en ambas situaciones se dimensiona con placas de acero gruesas porque los herrajes tenían un espesor de placa de 10 mm mayor que el del agujero ($t > d$). La capacidad resistiva para los posibles modos de fallo se indica en la Tabla 5-14.

Tabla 5-14. Modos de fallo en las uniones entre acero y madera y placas de acero de gruesas.

	$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{Fallo A} \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{Fallo B} \\ f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & \text{Fallo C} \end{cases}$ <p style="text-align: center;">Ecuación 5-16</p>
	$F_{v,Rk} = \begin{cases} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & \text{Fallo A} \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{Fallo B} \end{cases}$ <p style="text-align: center;">Ecuación 5-17</p>

En el modo de fallo por cortadura doble según la Ecuación 5-17, se produciría el agotamiento plástico para la madera (Fallo A) para un valor de carga $F_{v,Rk} = 5.203,43 \text{ N}$, y para el fallo por cortadura con agotamiento plástico de la varilla (Fallo B) para $F_{v,Rk} = 1.780,09 \text{ N}$. Por tanto, se deduce que se produce un agotamiento plástico de la varilla para una carga de $F_{v,Rk} = 1.780,09 \text{ N}$. Esta resistencia es para una sola varilla, de modo que para las 87 varillas será 154.870 KN para cada cara del herraje, muy por encima de las fuerzas estimadas de fallo (F_{est}) en la probeta objeto de ensayo.

Para la determinación de la distancia entre los agujeros de las varillas se toma como referencia la norma (DB SE M, 2009), que especifica las separaciones mínimas entre clavos (Tabla 5-15), donde el ángulo será $\alpha = 0$ y el diámetro $d = 4 \text{ mm}$.

Tabla 5-15. Separaciones en uniones con clavos para madera. Según [(DB SE M, 2009) Tabla 8.2].

Separaciones y distancias	Ángulo	Distancia mínima		
		Sin pretaladro		Con pretaladro
		$\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$	$420 \text{ kg/m}^3 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$	
a_1 (paralela a la fibra)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$d < 5 \text{ mm}; (5+5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$ $d \geq 5 \text{ mm}; (5+7 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(7+8 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(4+ \cos \alpha) \cdot d$
a_2 (perpendicular a la fibra)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$5 \cdot d$	$7 \cdot d$	$(3+ \sin \alpha) \cdot d$
a_{3t} (testa cargada)	$90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$(10+5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(15+5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$(7+5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$
a_{3c} (testa no cargada)	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$10 \cdot d$	$15 \cdot d$	$7 \cdot d$
a_{4t} (borde cargado)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$d < 5 \text{ mm}; (5+2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d \geq 5 \text{ mm}; (5+5 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$d < 5 \text{ mm}; (7+2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d > 5 \text{ mm}; (7+5 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$d < 5 \text{ mm}; (3+2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ $d > 5 \text{ mm}; (3+4 \cdot \sin \alpha) \cdot d$
$a_{4,c}$ (borde no cargado)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$5 \cdot d$	$7 \cdot d$	$3 \cdot d$

La distancia fijada entre las varillas en dirección a la carga de ensayo (a_1) es de 40 mm , mientras que en dirección perpendicular a la carga de ensayo (a_2) se toma 20 mm , dando lugar a la matriz de agujeros y a la configuración de los herrajes de la Figura 5-33.



Figura 5-33. Distancias entre los agujeros de varillas en los herrajes de acoplamiento y matriz resultante.

En la práctica, las testas de la probeta se asientan contra las pletinas horizontales de los herrajes en la etapa de precarga, manteniendo un centrado perfecto con el eje de carga y sin deformaciones en la zona de transmisión de cargas, ya que la superficie de contacto es muy amplia y transmite cargas en casi la totalidad de la sección transversal de la madera. En consecuencia, el asentamiento de la probeta con los planos horizontales del herraje hizo innecesario reforzar la rigidez en la zona entre herraje y probeta con las matrices de varillas.

5.3.3.2.2 Máquina empleada en ensayos de carga constante

Para los ensayos con velocidad de carga constante se empleó una máquina Codein de 30 t (Modelo MCO-30 con nº de serie 05013). Se justifica el cambio a esta máquina frente a la anteriormente descrita al incrementarse el número de probetas, así como por limitaciones de disponibilidad de la MTS, menor distancia a la que se haya localizada desde nuestro centro de trabajo y calibración de los elementos de medición. Aunque se usa habitualmente para ensayos de hormigón, resultó bastante fácil adaptarla a las dimensiones de las probetas de madera, de mayor dimensión en uno de sus extremos que en el otro, mediante el uso de una chapa colocada en el apoyo inferior de gran rigidez (de 5 cm de espesor y acero de alta resistencia) que descansa directamente sobre el plato inferior. El plano superior ya disponía de un plato con la rótula de autoajuste para las dimensiones de estas probetas estudiadas. De cara a validar resultados sobre las muestras de transición, se realizaron ensayos de contraste las dos máquinas, MTS y Codein, una en control de deslizamiento y otra en carga. No se apreciaron diferencias significativas en los resultados, lo que permitió también validar las mediciones en las máquinas. Se muestran la arquitectura y las propiedades características de la máquina Codein en la Figura 5-34 y en la Tabla 5-16.



Figura 5-34. Máquina de ensayos Codein 30 para tracción y compresión.

Tabla 5-16. Parámetros generales de la máquina Codein 30 t.

Marco de ensayo	600 mm de luz.
Husillo actuador	400 mm de recorrido.
Cabezal superior	Movimiento manual con rótula de autoajuste.
Célula de carga	30 t de tracción compresión.
Sistema de transmisión	Electromecánico, formado por un reductor y dos poleas que le permiten al sistema un mantenimiento mínimo. El ruido que provoca es también muy reducido.
Motor	Motor de corriente continua MO 600.
Alimentación	Monofásica 230 V
Fuente de regulación de velocidad	Continua y regulando la velocidad del motor al enviarle el equipo de medida y control digital una señal, previamente seleccionada por el operario, antes de comenzar el ensayo.
Equipo de medida y control	Digital controlado por ordenador. El programa dispone de dos controles de medida, un control por fuerza y un control por recorrido. Al encenderse el equipo está en control por recorrido; esto permite, mediante un desplazamiento del husillo, acercar la muestra para realizar el ensayo. Además, se pueden realizar ensayos en control por recorrido y seleccionar la velocidad de ensayo.
Retorno	Automático, hasta la configuración de estado de posición inicial.

La Figura 5-35 muestra una disposición de la probeta sobre la máquina de ensayo mucho más simple que con la MTS, así como el marcado CE de la máquina, la célula de carga PHI 300 y los registros de calibración de los equipos de medida.



Figura 5-35. Máquina de ensayos Codein. Detalles de célula de carga, balastro de apoyo, certificación y calibración.

Como era de esperar, esta máquina tampoco disponía de un programa de ensayo adecuado al caso que nos ocupa entre la librería de ensayos que contiene, por lo que se hizo necesario manejarla de un modo semimanual para aplicar el programa de carga según lo indicado en el Apartado 5.3.2. En el Anexo D, correspondiente a los informes de ensayo, se describen los parámetros del procedimiento de carga específico en cada probeta y, por extensión, su agrupación en muestras.

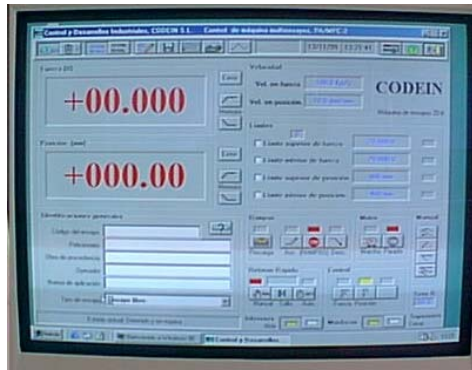


Figura 5-36. Programa de gestión de parámetros de ensayo para la máquina Codein 30 t.

5.3.4 Salidas de resultados

5.3.4.1 Descripción de la gráfica carga-deslizamiento

La información extraída de los ensayos experimentales permite realizar análisis mediante gráficos carga-deslizamiento de la unión, y puede ser mostrada con valores relativos de la carga respecto de la estimada F/F_{est} (Figura 5-37) según indica la norma (UNE-EN 26891, 1992). En la gráfica de Figura 5-38 se identifican las fases documentadas por distintos autores (Dorn et al., 2013) y (Dong Phuong, 2006), que introducen variaciones sobre el ensayo la norma (UNE-EN 26891, 1992) al añadir más ciclos de carga con la intención de hacer un estudio más detallado en el comportamiento a rigidez en estos ciclos.

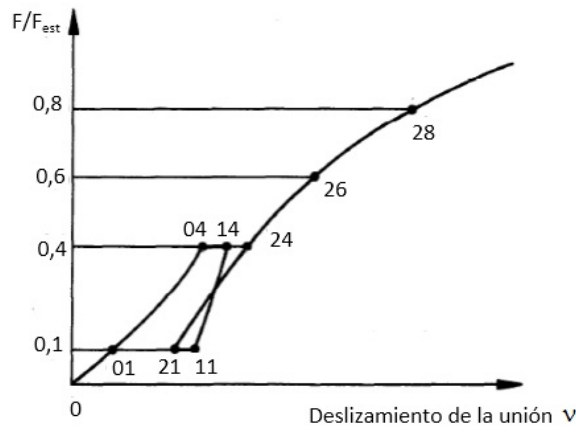


Figura 5-37. Curva teórica de carga-deslizamiento (UNE-EN 26891, 1992).

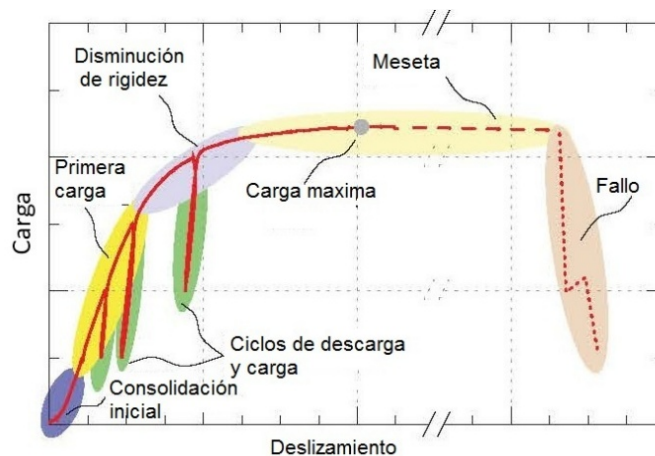


Figura 5-38. Desarrollo del ensayo carga-deslizamiento en una unión tipo clavija con distintas fases de carga.

En la gráfica se identifica la evolución del comportamiento de la unión en distintas etapas de carga (desde la formación inicial del contacto entre la madera y la clavija, hasta la transición de la zona elástica a un comportamiento plástico que se relaciona con una reducción de la rigidez). El nivel de la carga máxima se identifica en la meseta de una zona posterior, para llegar a un fallo final y definitivo. La rigidez de la unión es diferente durante los ciclos de carga y descarga como se puede ver en la Figura 5-37. La pendiente formada por la recta de unión entre los puntos 14-11 no tiene por qué coincidir con la formada por los puntos 21-24; aunque en la práctica, si se fija un mayor conjunto de puntos, la trayectoria presenta un aspecto de bucle que puede estar influido por las velocidades de carga y descarga y los tiempos de relajación hasta una nueva recarga (espacio entre los puntos 11 y 21). Los ensayos buscan identificar los efectos de variaciones del diseño de la conexión, como por ejemplo, aquellos cuyo motivo es la introducción de una fuerza axial en la clavija (como el acople de tuerca y arandela en los extremos de la clavija, o el aumento de su rugosidad o de su adherencia). El objetivo final es identificar el grado de precisión y los límites en los que se aplican las normas de diseño actuales, así como la interacción de distintos efectos.

La relación entre los espesores de las piezas de madera, el diámetro de la clavija y las propiedades de los materiales (tales como la densidad de la madera o la tensión última del acero) se usan en la ecuación que permite determinar la capacidad de carga de la unión para los distintos tipos de fallo; sin embargo, no tiene en cuenta la relación carga desplazamiento que se da a lo largo de todo el ensayo, centrándose en dar solo el punto de fallo final. Esta relación es muy interesante y un objetivo secundario del ensayo es identificar la misma y compararla con la resultante en los modelos numéricos de simulación, identificando las etapas de carga que se describen a continuación:

- Consolidación inicial. Habitualmente, las uniones conexiones muestran muy baja rigidez al comienzo del proceso de carga, no alcanzando una rigidez alta hasta que se aplica una carga y desplazamiento significativos. Esta baja rigidez inicial es causada por el contacto imperfecto entre clavija y madera, que resulta de la aspereza geométrica de las imperfecciones de las superficies de contacto debidas a que:
 - El eje del agujero no puede trazarse siempre en una línea recta perfecta, dando lugar a curvaturas y en ocasiones, excentricidades entre las piezas de madera.
 - La dirección de la carga y la dirección del eje longitudinal de la clavija pueden no estar en ángulo recto exacto.
 - Las condiciones de la superficie de la clavija y de las superficies de los agujeros en las piezas de madera con las que van a entrar en contacto también afectan en esta etapa de establecimiento de la transmisión de la carga.
 - Dependiendo de la velocidad de perforación, la precisión y el desgaste de la herramienta de taladro aparecen más o menos imperfecciones en los agujeros de las piezas de madera que también afectan a la consolidación inicial.
 - Las superficies que reciben las cargas externas de la máquina de ensayo en la madera pueden no ser planas. Por ejemplo, puede existir alguna ondulación de la madera por heterogeneidades intrínsecas a la propia naturaleza de este material (por ejemplo madera temprana y tardía se comportan de manera diferente ante variaciones de humedad y pueden dar lugar a este tipo de imperfecciones), o alguna rugosidad debido a fibras que no se cortan perfectamente.

Las imperfecciones geométricas conducen a un valor de rigidez más bajo e irregular en los primeros estados de carga, debido al asentamiento del conjunto.

- Primera carga. Se refiere a la fase que sigue directamente al proceso de consolidación inicial, y en la que se alcanza la rigidez máxima (salvo que se proceda a realizar procesos de descarga y recarga donde se dan valores de rigidez superiores). La curva carga-desplazamiento describe una trayectoria no lineal en esta fase, que no obstante se puede aproximar por una línea recta, más aún si se trata de secciones pequeñas o de comportamiento muy rígido, como el caso de la clavija con adhesivo epoxi. La linealidad perfecta no se puede esperar, ya que en los primeros estadios de esta fase la consolidación está aún en curso, mientras

que por el contrario en los últimos estadios comienza a afectar y el comportamiento plástico no lineal de la madera.

- Ciclos de descarga y carga. La rigidez en la descarga y recarga supera significativamente la rigidez máxima durante la primera carga. A diferencia de la primera carga, la gráfica en esta fase muestra un comportamiento elástico aproximadamente lineal. Las deformaciones por plastificación se mantienen tanto en la madera como el acero y la recuperación que puede tener la unión se debe al comportamiento elástico que presentan los materiales, lo que se traduce en una relación entre carga y deslizamiento más cercana al comportamiento lineal. Durante la recarga, la clavija llega a adaptarse a la madera por las formas de plastificación alcanzadas anteriormente, lo que elimina la fase de consolidación inicial (de baja rigidez) a la vez que parte de un punto que ya presenta deformaciones permanentes. Por este motivo, la recarga supone un menor deslizamiento y presenta una rigidez mayor que durante la primera carga (Figura 5-39). Cuando la carga supera las plastificaciones logradas previamente (anteriores a la descarga) la curva toma la pendiente previa al ciclo de descarga. Este comportamiento es muy parecido si se realizan ciclos de carga y descarga sucesivos, independientemente de la densidad o de los espesores de las piezas de madera.



Figura 5-39. Detalle de un ciclo de descarga y carga.

- Disminución de la rigidez y meseta. Con el incremento de carga, la rigidez disminuye drásticamente, y se alcanza la capacidad máxima de la unión. La disminución de rigidez se origina al llegar la resistencia de compresión a provocar la plastificación de la madera en regiones de ancho (b_1 y b_2) sensiblemente constante. Además, en esta parte de la curva se incrementa la tendencia a formarse rótulas plásticas en la clavija en conexiones con esbeltez media y alta. Esto es, los modos de fallo con rótula central y doble rótula en la clavija descritos en el Capítulo 2. El máximo nivel de carga y la ductilidad dependen significativamente de la densidad, del comportamiento de fricción y de las restricciones laterales que se planteen como refuerzo. Los desplazamientos hasta el fallo final difieren considerablemente, y en algunos especímenes (por ejemplo, con madera muy densa) la meseta con plastificación apenas existe. En el caso de una meseta larga, esta suele finalizar con una rotura frágil en la madera (fallo por cortante), que, sin embargo, no afecta el comportamiento global que tiene más ductilidad que en madera muy densa por que se producen grandes deslizamientos con capacidad para recoger más energía y llegando a posiciones donde no la unión no suele trabajar al limitar el ancho de aplastamiento y en consecuencia el deslizamiento. Por lo tanto, el fallo que se puede dar por cortante tras largas mesetas de plastificación es en realidad una característica interesante, por implicar mecanismos de fallo dúctil en la unión y evitarse de este modo la rotura frágil que aparece sin previo aviso y es más peligrosa.
- Fallo. La última etapa del diagrama de carga-desplazamiento es la correspondiente al fallo final, que se produce de forma repentina y lleva a una súbita caída de carga. El modo de fallo se puede ver afectado por distintas variables como la densidad, la fricción o los refuerzos laterales. Por ejemplo, las fijaciones con tuerca-arandela consiguen reducir el deslizamiento a medida que aumenta la carga (atenuando la zona de meseta), y en consecuencia el fallo repentino de rotura frágil se transforma en favor de plastificaciones en las superficies de contacto con el refuerzo (la arandela lateral).

Por otro lado y ampliando los modos de fallo contemplados en la normativa (DB SE M, 2009), se pueden identificar otras posibilidades de fallo final (Dorn et al., 2013) representados en la Figura 5-40:

- Separación lateral: se produce por la baja fricción entre la madera y el pasador, debido a la alta densidad de la madera. Se trata de un modo de fallo altamente frágil causado por las elevadas fuerzas de tracción, en sentido normal al plano de simetría de la conexión originada por la flexión de la clavija. La superficie de fractura definitiva no tiene que darse justo en el plano medio, sino que los planos de fallo aparecen coincidiendo con la presencia de algún anillo de crecimiento, que marca la transición entre la madera temprana (más débil) y la madera más densa y dura correspondiente a los anillos de crecimiento más maduros.
- Fallo por cortante: generalmente se presenta en combinación con los esfuerzos de tracción en dirección lateral. Los planos de fallo son paralelos al plano de simetría de la conexión que pasa por el eje longitudinal de la clavija, en una distancia de aproximadamente dos tercios del radio de la clavija, respecto al centro geométrico de la misma, según se observa en la Figura 5-40. En principio, este modo de fallo es frágil.

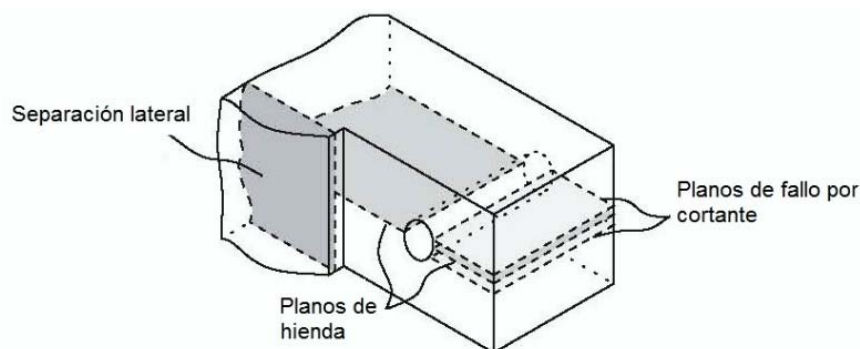


Figura 5-40. Planos de fallo en la madera (Dorn et al., 2013).

Se observa fallo por cortante en probetas con alta fricción entre pasador y madera y en las conexiones con refuerzo lateral; también en madera laminada, en las líneas de encolado coincidentes con las zonas de máximo esfuerzo, aspecto que no siempre es fácil de eludir debido a la fabricación en simetría de este tipo de madera encolada y a la colocación de las clavijas. Este tipo de fallo se ve favorecido en los casos en los que se limita la separación lateral. Bajo estas condiciones las grietas no se propagan a lo largo de la sección de la madera, y las tensiones que derivan en fallo por cortante disipan gran cantidad de energía y provocan grandes deslizamientos antes de que aparezca el fallo total.

- La división de la sección transversal completa: es el modo de fallo final cuando se evita la división lateral. Se produce primero un fallo por cortante local. Este tipo de fallo permite grandes deformaciones y está asociado a un comportamiento dúctil. Finalmente, la clavija doblada impulsa la madera a separarse, propagando una grieta de modo que las fuerzas de tracción se desarrollan en el plano de hienda completo identificado en la Figura 5-40. Se desarrolló con más detalle en el Apartado 2.7.7.

5.3.4.2 Informe del ensayo

5.3.4.2.1 Normalización de resultados

En términos generales, un informe debe dar cuenta de los resultados de los ensayos efectuados, incluyendo alguna explicación que permita comprenderlos. La estructura de la información que se ha empleado en este caso sigue la normativa correspondiente (UNE-EN 26891, 1992), donde se indica que el informe del ensayo deberá incluir lo siguiente:

- a) La especie, densidad y propiedades de resistencia significativas de la madera.
- b) La calidad, propiedades de resistencia y acabado de la superficie de los materiales de los elementos de fijación (incluyendo la protección anticorrosión).
- c) Las dimensiones de las uniones, tamaño y número de los elementos de fijación, así como detalles de las holguras que existan entre las piezas.
- d) El acondicionamiento de la madera y de las probetas antes y después de la fabricación, el contenido de humedad en el momento de la fabricación y del ensayo, fendas, etc.
- e) El procedimiento de carga empleado, así como todas las desviaciones que puedan presentarse.
- f) Los resultados del ensayo individual y cualquier información pertinente relacionada con los ajustes, valores medios y desviaciones normalizadas, así como la descripción de las formas de rotura.

La estructura anteriormente expuesta presenta matices en otras normas, como la que se emplea para la determinación de la resistencia al aplastamiento y del módulo de aplastamiento para los elementos de fijación tipo clavija (UNE-EN 386, 2002), que identifica como puntos a incluir en el informe:

- a) Procedimiento de toma de muestras.
- b) Especificación y calidad de los materiales: especie, densidad, dirección de la fibra u orientación principal, propiedades de resistencia.
- c) Tipo, diámetro, características mecánicas y tratamiento superficial del elemento de fijación (incluyendo la protección anticorrosión).
- d) Dimensiones de las probetas, diámetro del pretaladro y modo de instalación del elemento de fijación en la probeta.
- e) Acondicionamiento de las probetas, antes y después de su elaboración, y contenido de humedad durante el ensayo.
- f) Resultados de ensayo e información relativa a los ajustes, valores medios y desviaciones estándar, y descripción de las formas de rotura.
- g) Cuando la diferencia de los resultados de dos pesadas sucesivas efectuadas en un intervalo de 6 h es menor o igual al 0,1 % de la masa de la probeta.

En la práctica, se debe considerar que, cuando el número de ensayos alcanza un valor significativo, se requiere un sistema que gestione toda esta información y pueda recoger además múltiples aspectos como:

- La incorporación de imágenes (por ejemplo el corte transversal de la probeta tras el ensayo, que permita demostrar el modo de fallo producido).
- La inclusión de las gráficas completas del ensayo. Aunque, como se vio en el Apartado 5.3.2.2, la norma (UNE-EN 26891, 1992) indica que es suficiente registrar los valores de carga para de deslizamientos v_{01} , v_{04} , v_{14} , v_{11} , v_{21} , v_{24} , v_{26} , v_{28} , y el deslizamiento de la carga máxima estimada (véanse Figura 5-28 y Figura 5-37), un estudio detallado del ensayo puede aportar más información que estos puntos limitados.
- El resultado estadístico de muestras, especialmente datos como el 5º percentil.
- La agrupación de probetas, repetición y las particularidades que se dieron en cada fase: materiales de origen, composición y fabricación de la unión, ejecución del ensayo y tratamientos posteriores (como el corte transversal de la probeta tras el fallo).
- La energía recogida en la unión.

Y, en términos generales, la composición de datos estructurados que sirvan como herramienta para deducir conclusiones del estudio y plantear futuros trabajos.

5.3.4.2.2 Sistema de gestión de informes

Se ha investigado la existencia de herramientas informáticas que gestionen los datos de entrada y salida de los ensayos aunque, de forma similar a lo que ha ocurrido con los programas de carga a emplear en las máquinas de ensayo, no se ha encontrado aplicación específica para este tipo de ensayo, por lo que se ha optado por un diseño personalizado y a medida. Para el esquema del medio generador de informes se ha optado por un sistema gestor de bases de datos basado en tablas relacionales. La base de datos (o banco de datos) diseñada permite clasificar en un conjunto los datos pertenecientes al mismo contexto y almacenarlos sistemáticamente para su posterior uso (Figura 5-41). El sistema diseñado integra:

- Los contactos de organizaciones intervinientes en el proceso de investigación.
- El control documental de este trabajo.
- Las fuentes bibliográficas.
- Los informes de ensayo de probetas
- La agrupación de resultados de probetas de muestras correspondientes al mismo diseño de unión.

The screenshot shows a web application interface for document and test control. At the top, there is a navigation bar with 'ARCHIVO', 'INICIO', 'CREAR', 'DATOS EXTERNOS', and 'HERRAMIENTAS DE BASE DE DATOS'. A left sidebar lists various tables under 'Tablas', including '07TbDirectorio', 'TbIContactos', 'TbICronograma', 'TbIDocumentos', 'TbIDocumentosNormativa', 'TbIEnsayos', 'TbIFuentesDeBusquedas', 'TbIProbetasMuestras', 'TempMuestrasDeProbetas', '01Ensayos', '02Descriptor de probeta', '03Calculos', and '04CalculDeEnsayos'. The main content area is titled 'Sistema de control de documental y de ensayos' and features a banner with the text 'TRANSFIRIENDO CONOCIMIENTO ...'. Below the banner, there are three main sections: 'CONTROL Y MANTENIMIENTO' (with sub-sections 'Listados' and 'Fichas'), 'SELECTORES' (with a form for selecting organization, document, source, test, and sample), and 'DOCUMENTADOR' (with sub-sections 'Doc. de trabajo' and 'Informes'). The bottom of the page displays logos for 'Escuela superior de Zamora' and 'UNIVERSIDAD DE SALAMANCA'.

Figura 5-41. Programa de gestión para tratamiento de informes de ensayos.

En el Anexo D se pueden ver todos los informes de probetas y muestras ensayadas. El informe de ensayo puede considerarse un nivel de salida, en la base de datos, que ofrece múltiples ventajas:

- Disminuye la complejidad de la información a tratar.
- Disminuye la redundancia de datos e inconsistencias.
- Potencia un control centralizado para la creación y definición de los datos.
- Mejora la flexibilidad del sistema, ya que estructura los distintos datos y permite hacer composiciones con ellos.
- Disminuye los costes de mantenimiento y desarrollo.
- Integra el sistema gestor de bases de datos con un potente paquete de aplicaciones más amplio, como hojas de cálculo y procesadores de texto.
- Incrementa el acceso y disponibilidad de la información, permitiendo el trabajo simultáneo de varios usuarios.

- Disminuye la dependencia entre los datos, los programas de cálculo y el análisis de resultados. Se establecen niveles de ordenación por capas, es decir, la base de datos se puede guardar en un servidor, los programas de cálculo pueden recoger y/o volcar datos sobre ellas en determinados momentos y la estructura de tablas facilita la ejecución de consultas y agrupaciones en función de las necesidades de análisis y los informes o gráficos a realizar.
- Potencia la generación de datos elaborados de análisis, como las consultas, filtros, funciones analíticas y gráficos de resultados.

Este sistema elude los problemas de otros sistemas documentales, como las fichas y plantillas de texto base que hubieran supuesto limitaciones para su tratamiento futuro y múltiples inconvenientes como:

- Redundancia de datos.
- Falta de flexibilidad.
- Seguridad pobre, ya que es difícil:
 - Limitar el tipo de datos que se introduce en un determinado lugar (por ejemplo un texto en un lugar que requiere valores numéricos para poder ser calculados).
 - Restringir el acceso de usuarios a distintas partes de la información.
- Limitaciones para compartir datos.
- Baja disponibilidad porque no permite el acceso simultáneo de varios usuarios para su modificación.
- Limitaciones para reagrupar y recomponer información.

Para el diseño del sistema gestor de informes y las ventanas de entrada-salida de resultados (Figura 5-42), se ha partido de un mapa de datos que integra la traza del trabajo, desde la composición de la probeta hasta su almacenamiento definitivo, y que permite vincular la información que relaciona cada muestra y las probetas que la componen de una forma rápida a través de formularios. El sistema gestor y su contenido son facilitados en soporte digital en el Anexo E.

Panel de navegación

Cod. descriptor	Nº de Mue	Especie	Densi teórica (k	Densi real (kg/m	Tipo madera
100_200_16_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosca zinc 5.6	M10	Abeto	500		QLH-24 (S10)
100_200_16_0_no_no_rosca zinc 5.6	M11	Abeto	500		QLH-24 (S10)
100_200_20_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosca zinc 5.6	M12	Abeto	500		QLH-24 (S10)
100_200_20_0_no_no_rosca zinc 5.6	M13	Abeto	500		QLH-24 (S10)
100_200_24_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosca zinc 5.6	M14	Abeto	500		QLH-24 (S10)
100_200_24_0_no_no_rosca zinc 5.6	M15	Abeto	500		QLH-24 (S10)
100_200_30_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosca zinc 5.6	M16	Abeto	500		QLH-24 (S10)
100_200_30_0_no_no_rosca zinc 5.6	M17	Abeto	500		QLH-24 (S10)

Formulario de muestra

Muestra: M21 t1_t2_d_Alfa_tornillo_Adhesivo_Expansion
 80_160_10_0_Conector interc. no_no_rosca zinc 5.6

Johansen norma (N) 9.147,37 con densi real (N) 9.730,68
 Modo fallo norma 4 con densi real

1) Fmax (N) 26.257,64
 2) Fest (N) 27.936,98
 3) deslizamiento inicial (mm) 2,02
 4) deslizamiento inicial modificado (mm) 1,73
 5) asiento de la unión (mm) 0,28
 6) deslizamiento elástico (mm) 0,47
 7) módulo de deslizamiento inicial (N/mm) 4.892,43
 8) módulo de deslizamiento (N/mm) 0,46
 9) deslizamiento a 0,6 Fmax (mm) v26 2,97
 10) deslizamiento modificado a 0,6 Fmax (mm) 2,62
 11) deslizamiento a 0,8 Fmax (mm) v28 4,28
 12) deslizamiento modificado a 0,8 Fmax (mm) 3,94

Probetas de la muestra 3

Probeta 140
 Johansen (N): 9.792,38
 1) Fmax (N): 26.242,50

Probeta 141
 Johansen (N): 9.723,82
 1) Fmax (N): 26.393,90

GRÁFICA DE ENSAYO
 carga (N)

Formulario de Ensayo Probeta P140 t1_t2_d_alfa_fijación lateral_adhesivo_expansion
 L60_10_0_Conector interc. no_no_rosca zinc

a) Especie, densidad y propiedades de resistencia significativas de la madera

Tipo madera Abeto Densi teórica (kg/m3) 380
 GLh-24 Densi real (kg/m3) 435

b) Calidad, propiedades de resistencia y acabado de la superficie de los materiales de los elementos de fijación (incluyendo la protección anticorrosiva)

Perno rosc zinc 5.6 fuk perno (N/mm2) 500 IdEnsayo: 142

c) Dimensiones de las uniones, tamaño y número de los elementos de fijación, detalles de las holguras que existan entre las piezas

t1 (mm) 80 Alfa t1-t2 (º) 0 Expansión no Observaciones a la unión:
 t2 (mm) 160 d (mm) 7,9 Fijación lateral Conector interc.

Figura 5-42. Formulario de datos para muestras y detalle de ensayos.

Se ha incluido la información requerida por la norma (UNE-EN 26891, 1992) así como otra que resulta de interés para las particularidades de este estudio. Se describe en los apartados siguientes:

- Especie, densidad y propiedades de resistencia significativas de la madera, identificando su tipo y densidad, tanto la teórica como la real, obtenida mediante pesado.
- Calidad, propiedades de resistencia y acabado de la superficie de los materiales de los elementos de fijación (incluyendo la protección anticorrosión).
- Dimensiones de las uniones, tamaño y número de los elementos de fijación, detalles de las holguras que existan entre las piezas, espesores de piezas de madera laterales (t_1), espesores de piezas de madera central (t_2), diámetro de clavija (d) o diámetro interior de rosca en el caso de clavijas roscadas, ángulo de orientación de la fibra (α), diámetros de agujero y tipo de kit expansivo si se hubiera empleado.
- El acondicionamiento de la madera y de las probetas antes y después de la fabricación, el contenido de humedad en el momento de la fabricación y del ensayo, fendas, etc.

- e) Procedimiento de carga empleado y referencia a la norma, parámetros de ensayo (por ejemplo las velocidades de deslizamiento o carga aplicados, la fuerza estimada (F_{est}) o los tiempos de reposo) y las desviaciones que haya podido haber.
- f) Resultados del ensayo individual, información de valores medios, descripción de modos de fallo, comparando el modo de fallo real con el analítico calculado con la norma (DB SE M, 2009), ya que en alguna ocasión (por ejemplo en la probeta P028) no coincide el modo de fallo del cálculo analítico con el que realmente sucede en el ensayo, aspecto que parece especialmente relacionado con los márgenes de seguridad que se aplican a la densidad característica de la madera (ρ_k) utilizada en el cálculo analítico (frente a los que son aplicados a la clavija) en comparación con el ensayo real. En este apartado también se indican las particularidades derivadas del ensayo (por ejemplo en la probeta P091 apareció un fallo por hienda localizada en un plano de encolado tras la generación de rótula y para un deslizamiento avanzado de $u = 17$ mm). También se muestra otra información de interés, como la imagen de la sección transversal que ratifica el modo de fallo y la gráfica carga-desplazamiento.

Como resultado final de este capítulo, el conjunto de informes generados se incluye en el Anexo D, correspondiente a todas y cada una de las probetas ensayadas, así como su agrupación en muestras. A modo de ejemplo, se expone el informe de la probeta P053 (Figura 5-43).

Informe de ensayo

Probeta
P053

t1_t2_d_alfa_fijación lateral_adhesivo_expansión

80 160 10 0 no Epoxi HIT-RE 500 no Lisa alta res.

a) Especie, densidad y propiedades de resistencia significativas de la madera.

Tipo madera Densi teórica (kg/m3)
 GLh-24 Densi real (kg/m3)

b) Calidad, propiedades de resistencia y acabado de la superficie de los materiales de los elementos de fijación (incluyendo la protección anticorrosiva).

Perno fuk perno (N/mm2) (N/mm2)

c) Dimensiones de las uniones, tamaño y número de los elementos de fijación, detalles de las holguras que existan entre las piezas.

t1 (mm) Alfa t1-t2 ° Expansión Observaciones a la unión:
 t2 (mm) Fijación lateral
 d (mm) d (aguj.) (mm) Encolado

d) El acondicionamiento de la madera y de las probetas antes y después de la fabricación, el contenido de humedad en el momento de la fabricación y del ensayo, fendas, etc.

Humedad de fabricación Acondicionamiento: Observaciones a la madera en inspeccion visual:

e) Procedimiento de carga empleado con referencia a norma, parámetros de ensayo y desviaciones.

Modo ensayo Fecha de ensayo
 Carga en 2 min hasta 0.4·Fest se mantiene 30 s y descarga en 1.5 min Humedad en ensayo
 hasta 0.1·Fest se mantiene 30 s se vuelve a cargar a razón de 0.2·Fest por minuto Máquina de ensayo

f) Resultados del ensayo individual, información pertinente relacionadas con los ajustes valores medios y desviaciones normalizadas, descripción de modos de fallo.

Variables de cálculo de dimensionado:

Resisten. EC5 (N) con densi real (N)

Modo fallo EC5 con densi real

Trabajo teórico (J)

Variables de ensayo

Modo fallo real

Trabajo en ensayo (J)

b1 (mm) u (mm)

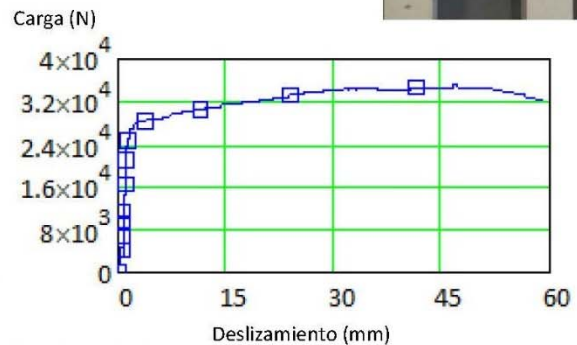
b2 (mm) Theta (°) (°)

1) Fmax	31.275,30 (N)
2) Fest	29.079,31 (N)
3) deslizamiento inicial	0,74 (mm)
4) deslizamiento inicial modificado	0,45 (mm)
5) asiento de la unión	0,28 (mm)
6) deslizamiento elástico	0,31 (mm)
7) módulo de deslizamiento inicial	15.718,54 (N/mm)
8) módulo de deslizamiento	25.658,21 (N/mm)
9) v26, deslizamiento a 0,6 Fmax	0,99 (mm)
10) deslizamiento modif. a 0,6 Fmax	0,65 (mm)
11) v28, deslizamiento a 0,8 Fmax	1,53 (mm)
12) deslizamiento modif. a 0,8 Fmax	1,19 (mm)

Sección transversal tras ensayo



GRÁFICA DE ENSAYO



Observaciones al ensayo:

Figura 5-43. Informe de salida de resultados de una probeta.

6 Resultados

6.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para los diferentes modelos estudiados desde tres enfoques:

1. Análisis de la influencia de las variables fundamentales en la mejora de la resistencia de la unión, con un tratamiento analítico de los resultados obtenidos al modificar la geometría y la disposición de distintos elementos.
2. Estudio de las propiedades mecánicas de la unión:
 - a. Tensiones dentro de la unión.
 - b. Análisis de la zona de aplastamiento.
 - c. Evolución del ángulo de deformación de la clavija.
 - d. Parámetros del ensayo, especialmente carga frente a deslizamiento.
 - e. Energía recogida en la unión.
3. Estudio de la mejora que supone la introducción de elementos de refuerzo:
 - a. Adhesivos epoxi y poliuretano.
 - b. Refuerzos con tuerca-arandela.
 - c. Rugosidad en la zona de adherencia.
 - d. Conectores en las intercaras de madera.
 - e. Expansión de clavija.

Posteriormente, se examina de forma independiente la influencia de distintos factores que intervienen en la resistencia de la unión, y de cómo los diferentes parámetros geométricos interactúan, tratando de forma secuencial los siguientes elementos condicionantes de resistencia:

- Flexión de clavija.
- Aplastamiento en la madera por la clavija.
- Efectos soga, derivados de las distintas composiciones en la unión:
 - Aplastamiento por tuerca-arandela en caras exteriores.
 - Adherencia derivada de la inyección de adhesivo.
 - Adherencia originada por la fricción madera-clavija.
- Expansión de clavija.
- Efectos de intercaras de madera:
 - Fricción en intercaras de la madera.
 - Fijación por placa clavo, particularmente conectores dentados.

Para concluir con el desarrollo de ecuaciones que permiten identificar la resistencia y la rigidez que presenta la unión en distintas situaciones.

6.2 Influencia de variables que afectan a la unión

En este apartado se pretende identificar la influencia de los elementos que se conjugan en la unión, especialmente sobre la resistencia y el deslizamiento, partiendo de las propuestas normativas (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). Se centra en las distintas variables de diseño, especialmente las geométricas, y en cuáles de ellas se debe poner atención por presentar una influencia más relevante.

Se ha fijado un modelo de base (desarrollado en el Apartado 4.1), cuyas propiedades más relevantes se sintetizan en la Tabla 4-1. Sobre dicho modelo se introducen variaciones de los parámetros de diseño (como variables independientes) orientadas a describir la evolución de la capacidad de carga ($F_{v,Rki}$) (como variable dependiente).

Tabla 6-1. Datos de partida para modelo de cálculo analítico de la unión.

Composición de nudo: unión madera-madera con clavija, en simetría y cortadura doble (Figura 4-1)	
• Clase resistente de madera, según Tabla 3-1 de la norma [(DB SE M, 2009) Tabla E.3] y (UNE-EN 1194, 1999).	GL24 h conífera
• Densidad característica.	$\rho_{g,k} = 380 \text{ kg/m}^3$
Geometría para escuadrías disponibles de fabricante según Tabla 3-5.	
○ Espesor de piezas laterales.	$t_1 = 80 \text{ mm}$
○ Espesor de pieza central.	$t_2 = 160 \text{ mm}$
• Coeficiente parcial de seguridad para la resistencia de aplastamiento en la madera (Argüelles et al., 2003).	$\gamma_m = 1,3$
• Ángulo que forman las direcciones de la fibra de madera entre las dos piezas.	$\alpha = 0^\circ$
• Factor de deformación, según Tabla 2-22.	$k_{def} = 0,8$
Clavija.	
• Acero según la norma UNE-EN ISO 898-1 (Tabla 3-21).	calidad 5.6
• Diámetro de clavija.	$d = 10 \text{ mm}$
• Tensión de límite fluencia en el acero.	$f_{y,k} = 300 \text{ N/mm}^2$
• Tensión última del acero.	$f_{u,k} = 500 \text{ N/mm}^2$
• Coeficiente parcial de seguridad para el acero (Argüelles et al., 2003).	$\gamma_a = 1,1$
Estado de carga.	
• Clase de servicio 1 con madera laminada y duración de carga media, según Tabla 2-17.	$k_{mod} = 0,8$
Efecto sogas por elementos de refuerzo.	
• Pernos de varilla roscada con tuerca-arandela en sus extremos.	No
• Adherencia en axil en la clavija propagada desde el adhesivo.	No
Fricción en zonas de contacto.	
• Fricción en la superficie madera-clavija.	$\mu_{m-a} = 0$
• Refuerzos en la superficie de las intercaras de madera por la superposición elementos (placas clavo, conectores o similares).	No
• Fricción en la superficie de las intercaras de la madera.	$\mu_{m-m} = 0$

Las variaciones de los parámetros de diseño se plantean dentro de rangos característicos de uniones ejecutables, habituales en uniones estructurales reales. Por ello se proponen los siguientes rangos para estudiar la variación de los de los resultados:

- Diámetro de clavija (d), desde 8 a 30 mm, junto con las siguientes variaciones:
 - Espesor de madera lateral (t_1), desde 30 a 110 mm; en este caso se analizarán con más detalle los cambios relativos a diámetros, sección y momento de inercia en el eje de flexión de la clavija.
 - Espesor de madera central (t_2), desde 130 a 210 mm.
 - Orientación de la fibra de la madera en la pieza central (α), desde 0° hasta 90° .
 - Relación entre la densidad de la pieza central y las piezas laterales (β), desde 0,7 hasta 1,7.
 - Densidad característica de la madera (ρ_k), desde 290 hasta 900 kg/m^3 .
 - Resistencia última a tracción del acero de la clavija ($f_{u,k}$), desde 150 hasta 800 N/mm^2 .

- Espesor de la pieza central (t_2), desde 130 a 210 mm, frente a los espesores (t_1) de las piezas laterales, desde 30 a 110 mm.

Posteriormente, en consideración a los límites de servicio, se muestran los resultados de deslizamiento de la unión en relación con la carga.

Las variaciones de parámetros se representan definiendo los resultados en los siguientes formatos:

- Tabla con el valor numérico de la capacidad de carga de la unión ($F_{v,Rki}$) (mínimo de los cuatro modos de fallo planteados en diseño), frente a las variables independientes (el color de fondo expone el modo de fallo producido). Se resaltarán en negrita los valores del modelo de base expuesto en la Tabla 4-1, y en cursiva la línea que dará lugar al análisis bidimensional, esto es, una sección transversal a la superficie de fallo que refleja la evolución de los cuatro modos de fallo (como ejemplo, véase la Tabla 6-3).
- Gráfica tridimensional, derivada de la tabla con valores numéricos, donde se muestran los mismos datos pero en tres dimensiones. Dado que en ellas es más complicado hacer lecturas de los valores (por la perspectiva de la gráfica 3D), se muestra también como diagrama de contorno (como ejemplo, véase la Figura 6-1 y siguientes), representándose las líneas de nivel para diferentes valores de la capacidad de carga.
- Gráfica bidimensional (sección transversal de la anterior), donde se añade la evolución de los cuatro modos de fallo y la transición entre ellos reflejada por los valores mínimos (como ejemplo, véase la Figura 6-2).
- De forma particular, en algunos de los casos se realizará un análisis adimensional, con valores relativos y porcentuales al modelo, para definir el interés en la mejora de cada una de las variables dependientes (como ejemplo, véase la Tabla 6-4).

Como leyenda, en la Tabla 6-2, se expone con códigos de colores y numeración el modo de fallo que propone el modelo analítico, sombreándolo sobre el esquema de la unión clavija.

Tabla 6-2. Relación entre el modo de fallo analítico y el código de color.

$F_{v,Rk1}$	Rojo	Modo fallo 1	Aplastamiento de las piezas laterales de espesor t_1 .	
$F_{v,Rk2}$	Azul	Modo fallo 2	Aplastamiento de la pieza central de espesor t_2 .	
$F_{v,Rk3}$	Verde	Modo fallo 3	Aplastamiento local en las esquinas de las piezas de madera con fallo por flexión en el centro de la clavija.	
$F_{v,Rk4}$	Naranja	Modo fallo 4	Aplastamiento local en las esquinas de las piezas de madera con fallo por flexión en el centro y extremos de la clavija.	

6.2.1 Variables geométricas

6.2.1.1 Capacidad de carga de la unión en función de d y t_1

Los resultados de la variación de diámetro de clavija frente a espesor de piezas laterales de madera se exponen en la Tabla 6-3. En ella se puede identificar la transición entre tres modos de fallo:

- Fallo en modo 3, que supone rótula de la clavija en la pieza central de madera, con datos en color verde.
- Fallo en modo 4, a medida que se incrementa el espesor de las piezas de madera laterales, se produce el fallo por rótula de la clavija en laterales y centro.
- Con pequeños espesores de la madera lateral y mayores diámetros de clavija tiene lugar el fallo por aplastamiento en la pieza lateral, es decir, modo de fallo 1.

Tabla 6-3. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de t_1 y d.

		Diámetro de clavija, d (mm)												
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
t_1 (mm)	30	1.593	2.403	3.375	4.510	5.804	7.249	8.491	9.204	9.871	10.493	11.068	11.597	12.080
	40	1.871	2.706	3.677	4.788	6.040	7.432	8.958	10.612	12.389	13.990	14.757	15.463	16.107
	50	2.028	3.071	4.069	5.185	6.423	7.785	9.269	10.871	12.589	14.415	16.344	18.368	20.134
	60	2.028	3.368	4.519	5.662	6.908	8.261	9.723	11.291	12.964	14.738	16.608	18.569	20.615
	70	2.028	3.368	4.978	6.193	7.465	8.828	10.284	11.834	13.478	15.213	17.036	18.944	20.931
	80	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399
	90	2.028	3.368	4.978	6.834	8.720	10.142	11.629	13.184	14.809	16.503	18.267	20.099	21.995
	100	2.028	3.368	4.978	6.834	8.917	10.861	12.379	13.953	15.585	17.276	19.026	20.834	22.698
	110	2.028	3.368	4.978	6.834	8.917	11.207	13.167	14.769	16.416	18.112	19.856	21.650	23.490

La representación en 3D de la Figura 6-1 muestra cómo la pendiente es mayor para el eje de incremento de diámetro, mientras que resulta más suave para incrementos de las escuadrías de madera en los laterales. Por otro lado, los modos de fallo que dieron lugar al aplastamiento de la madera lateral tienen valores de carga sensiblemente más bajos, lo que parece no hacer aconsejable en diseño en el modo de fallo 1 (representado en la Tabla 6-3 con color rojo).

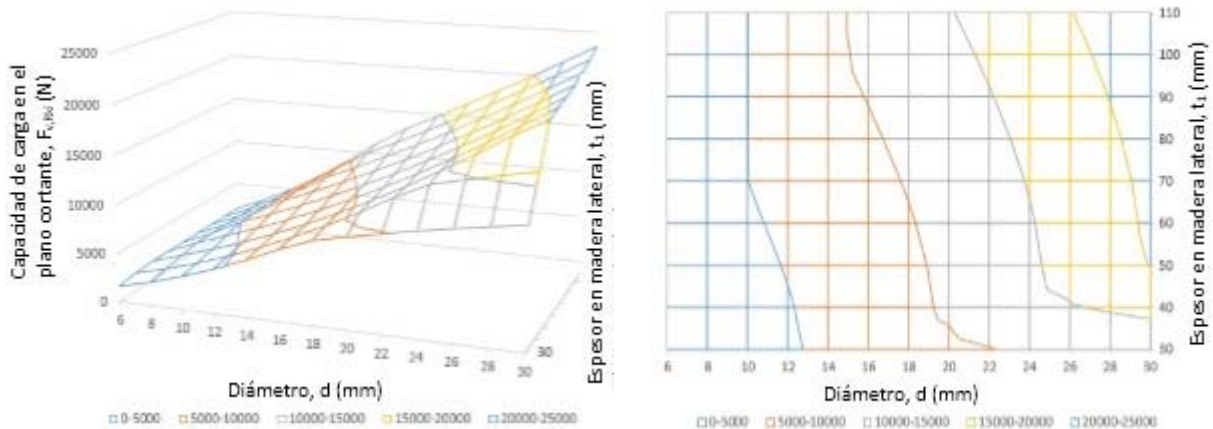


Figura 6-1. Capacidad de carga de la unión para variaciones de t_1 y d. Gráficos en 3D y de contorno.

La Figura 6-2 muestra un plano de corte vertical paralelo al eje de incremento de diámetro, para las condiciones de diseño de la Tabla 6-1 salvo por las variables geométricas estudiadas en este apartado (diámetro de la clavija y espesor de las piezas laterales de madera). En ella se puede analizar la cercanía de otros modos de fallo para el modelo. Como resulta previsible, con pequeños diámetros de clavija, el modo de fallo 4 es el más significativo; a medida que se incrementa el diámetro, se pasa a modo de fallo 3, siendo el 2 el más improbable. El modo de fallo 1, de aplastamiento en piezas laterales, es el dominante para diámetros cercanos a los 30 mm presentando pendientes menores. Esto supone que no mejora de forma significativa la capacidad de carga de la unión cuando se hace necesario aumentar el espesor (t_1) de las piezas de madera lateral para solventar este modo de fallo.

En los dos modos de fallo relacionados con la flexión de la clavija, las pendientes son mayores y crecientes (curvas convexas), lo que hace pensar que su incremento tendrá más impacto en la mejora de resultados para un buen dimensionado de la unión.

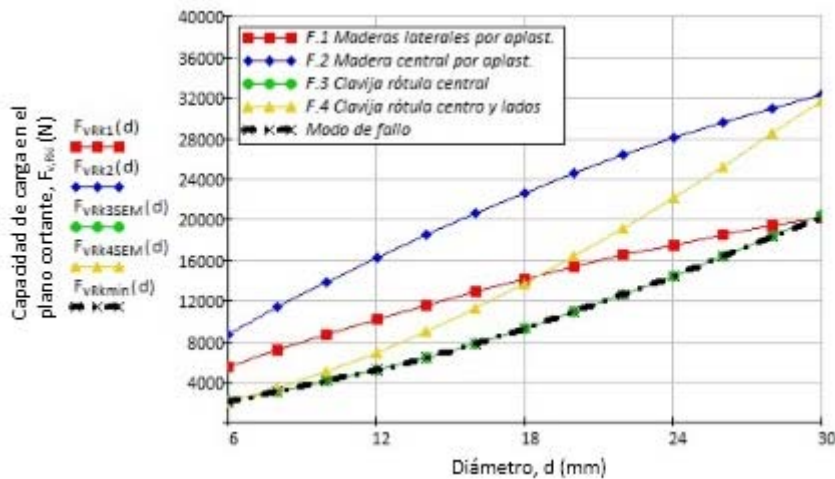


Figura 6-2. Capacidad de carga de la unión para variaciones de d, fijando t₁ en 40 mm.

Para valorar la influencia de las variaciones de diámetro, área y momento de inercia de la clavija sobre la capacidad de carga de la unión, se toma como referencia el modelo con diámetro d = 10 mm y t₁ = 110 mm (con capacidad de carga de F_{v,Rk4} = 4.978 N, según la Tabla 6-1). En la Tabla 6-4 se puede apreciar que el incremento de la capacidad de carga (F_{v,Rki}) de la unión está por encima del incremento del diámetro (como muestra la última fila). En cambio no llega a alcanzar la proporcionalidad con el área de la clavija, ni el momento de inercia en el eje de flexión, lo cual es acorde con las expresiones de resistencia por momento plástico de la clavija expuestas en el Apartado 2.7.5 y con la superficie de la zona de aplastamiento de la madera. También hay que resaltar el efecto que el incremento del diámetro de la clavija tiene sobre la mejora en la capacidad de carga de la unión, en coherencia con las representaciones gráficas anteriores (Figura 6-1).

Tabla 6-4. Variaciones porcentuales de las variables geométricas de la clavija frente a la capacidad de carga referidas a los modelos base.

d (mm)	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Área (mm ²)	28	50	79	113	154	201	254	314	380	452	531	616	707
I _z (mm ²)=(π·(d/2) ⁴)/4	64	201	491	1.018	1.886	3.217	5.153	7.854	11.499	16.286	22.432	30.172	39.761
d (%)=(d _i -d ₁₀)/d ₁₀	-40%	-20%	0%	20%	40%	60%	80%	100%	120%	140%	160%	180%	200%
Área (%)=(d _i -d ₁₀)/d ₁₀	-64%	-36%	0%	44%	96%	156%	224%	300%	384%	476%	576%	684%	800%
I _z (%)=(I _z _i -I _z ₁₀)/I _z ₁₀	-87%	-59%	0%	107%	284%	555%	950%	1.500%	2.243%	3.218%	4.470%	6.047%	8.000%
Carga (%)=(F _{v,Rki} - F _{v,Rk4(d10)})/ F _{v,Rk4(d10)}	-59%	-32%	0%	36%	62%	90%	119%	151%	183%	218%	253%	291%	330%
Carga (%) / d (%)	148%	162%	--	179%	155%	150%	149%	151%	153%	155%	158%	162%	165%

En la Tabla 6-5 se muestra la influencia del espesor t₁ de las piezas de madera lateral sobre la capacidad de carga de la unión en valores relativos. Así, con valores negativos, el excesivo debilitamiento de las piezas laterales, que es propio del modo de fallo 1, provoca las mayores caídas en la capacidad de carga. Por ejemplo, para t₁ de 30 mm (que supone una reducción del 63 % en el ancho de escuadría), la pérdida de carga se da en un 32 %; en cualquier caso, los cambios de espesor en la madera lateral (t₁) tienen menos influencia que los del diámetro.

Tabla 6-5. Variaciones porcentuales de espesor t_1 frente a la capacidad de carga referidas a los modelos base.

		Diámetro de clavija, d (mm)													
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
t_1	Variación, t_1 relativa	Variación de capacidad de carga relativa													
	30	-63%	-21%	-29%	-32%	-33%	-28%	-23%	-22%	-26%	-30%	-34%	-37%	-40%	-44%
40	-50%	-8%	-20%	-26%	-29%	-25%	-21%	-18%	-15%	-12%	-12%	-16%	-21%	-25%	
50	-38%	0%	-9%	-18%	-23%	-20%	-18%	-15%	-13%	-11%	-9%	-7%	-6%	-6%	
60	-25%	0%	0%	-9%	-16%	-14%	-13%	-11%	-9%	-8%	-7%	-6%	-5%	-4%	
70	-13%	0%	0%	0%	-8%	-8%	-7%	-6%	-5%	-4%	-4%	-3%	-3%	-2%	
80	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
90	13%	0%	0%	0%	1%	8%	7%	6%	6%	5%	4%	4%	3%	3%	
100	25%	0%	0%	0%	1%	10%	15%	13%	12%	11%	9%	8%	7%	6%	
110	38%	0%	0%	0%	1%	10%	18%	21%	18%	16%	15%	13%	11%	10%	

6.2.1.2 Capacidad de carga de la unión en función de d y t_2

La Tabla 6-6 permite comparar las variaciones en la capacidad de carga con el cambio en el diámetro de la clavija y con la variación del espesor de la pieza central (t_2). Se observa que la unión alcanza su máxima capacidad resistiva para el modo de fallo 4 con pequeños diámetros, y modo de fallo 3 tras sobrepasar los 12mm de diámetro. También se observa que, para un mismo diámetro de la clavija, la capacidad de carga no varía con t_2 , de manera que mayores espesores no suponen una mejora en la resistencia de la unión en este rango de escuadrías.

Tabla 6-6. Modo de fallo analítico y capacidad de carga (en N) de la unión para variaciones de t_2 y d.

		Diámetro de clavija, d (mm)													
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
t_2 (mm)	130	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399	
	140	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399	
	150	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399	
	160	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399	
	170	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399	
	180	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399	
	190	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399	
	200	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399	
	210	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399	

La Figura 6-3, como representación gráfica en tres dimensiones de la Tabla 6-6, resalta la nula sensibilidad de la capacidad de carga de la unión ante la variación de los espesores de madera. En los modos de fallo 4 y 3, las situaciones críticas de fallo de la clavija son insensibles ante las variaciones de escuadrías de madera. Pero, obviamente, con el incremento de diámetro hay una tendencia a que los fallos de aplastamiento en la madera se conviertan en críticos, aspecto que puede apreciarse en la Figura 6-4, y que hace prever la convergencia de los modos de fallo 1 y 2 con el modo de fallo 3.

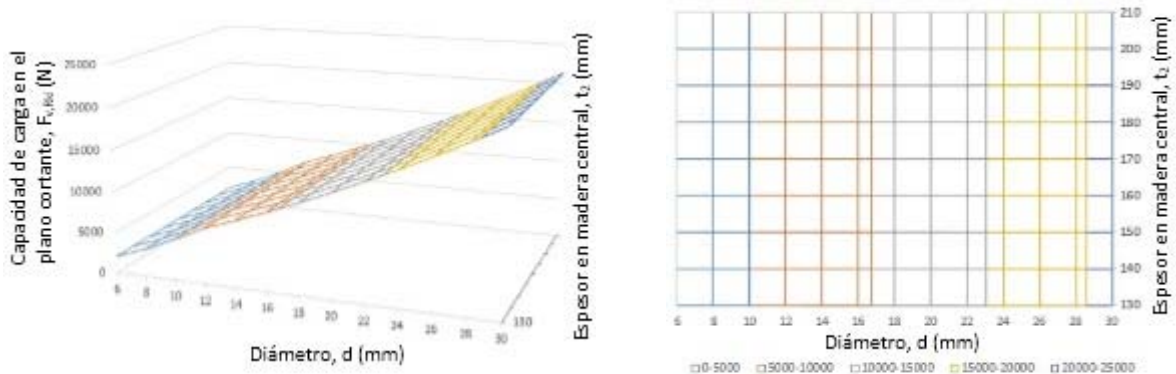


Figura 6-3. Capacidad de carga de la unión para variaciones de t_2 y d. Gráficos en 3D y de contorno.

Las curvas que marcan la capacidad de carga ante los modos de fallo 1 y 2 coinciden en este caso (como se puede apreciar en la Figura 6-4), puesto que presentan escuadrías de madera grandes con igual espesor entre las piezas de madera laterales y centrales ($t_2 = 2 \cdot t_1$). De forma semejante a lo visto en la Figura 6-2, el modo de fallo 4 de rótula en zonas laterales y central presenta más pendiente y se da con pequeños diámetros, para luego pasar a ser más crítico el modo de fallo 3.

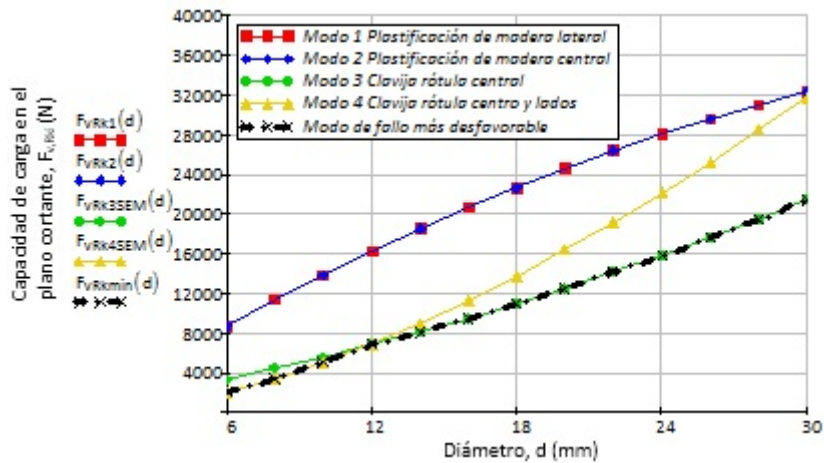


Figura 6-4. Capacidad de carga de la unión para t_2 constante e igual a 160 mm cuando varía d .

6.2.1.3 Capacidad de carga de la unión en función del diámetro (d) y el ángulo de fibra (α)

La Tabla 6-7 combina la variación del diámetro de la clavija con la variación de la orientación de la fibra de la madera. En este caso se ha optado por variar la orientación de la fibra solo en la pieza central, aunque el hacerlo en las piezas laterales da lugar a consecuencias semejantes, desde un punto de vista analítico. El modo de fallo 4 es predominante para diámetros de clavija pequeños; pero, a medida que se incrementa éste, pasamos a un rango de modo de fallo 3, donde la orientación de la fibra de la madera tiene mayor efecto; hasta llegar a un modo de fallo 2 (de aplastamiento en la madera de la pieza central) para diámetros grandes y ángulos cercanos a 90° , donde la orientación desfavorable de la fibra hace que ésta sea el modo de fallo más débil.

Tabla 6-7. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de α y d .

		Diámetro de clavija, d (mm)														
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30		
α (Rad)	α (°)	0,0000	0	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399
		0,1745	10	2.022	3.356	4.959	6.742	8.048	9.428	10.886	12.424	14.042	15.740	17.516	19.366	21.288
		0,3491	20	2.003	3.323	4.907	6.687	7.977	9.339	10.776	12.290	13.880	15.546	17.287	19.098	20.977
		0,5236	30	1.975	3.273	4.829	6.606	7.873	9.208	10.614	12.093	13.643	15.265	16.955	18.711	20.528
		0,6981	40	1.942	3.216	4.739	6.488	7.751	9.055	10.426	11.865	13.371	14.942	16.576	18.270	20.019
		0,7854	45	1.925	3.186	4.693	6.422	7.689	8.978	10.331	11.750	13.233	14.779	16.385	18.049	19.764
		0,8727	50	1.909	3.157	4.649	6.358	7.628	8.902	10.239	11.638	13.100	14.622	16.202	17.836	19.520
		1,0472	60	1.879	3.106	4.568	6.242	7.518	8.766	10.072	11.437	12.861	14.341	15.875	17.458	19.087
		1,2217	70	1.856	3.065	4.505	6.152	7.433	8.660	9.943	11.282	12.677	14.125	15.624	17.169	18.757
		1,3963	80	1.842	3.040	4.466	6.096	7.379	8.593	9.861	11.185	12.561	13.990	15.467	16.989	18.551
1,5708	90	1.836	3.031	4.452	6.077	7.360	8.570	9.834	11.151	12.522	13.944	15.414	16.928	18.481		

La Figura 6-5 viene a ratificar la misma apreciación: con diámetros pequeños de clavija, la unión es menos sensible a la orientación de la fibra, mientras que, a medida que se incrementa el diámetro (acercándose a los modos de fallo de aplastamientos de la madera), la orientación de las fibras de madera adquiere mayor importancia por debilitarse la capacidad resistiva de la madera en estas otras direcciones de esfuerzo. En la banda amarilla de la Figura 6-5, que

representa la zona de igual capacidad de carga de la unión en la zona de la derecha para la Figura 6-6, se puede apreciar claramente cómo de una tendencia sensiblemente vertical se inclina con mayor intensidad.

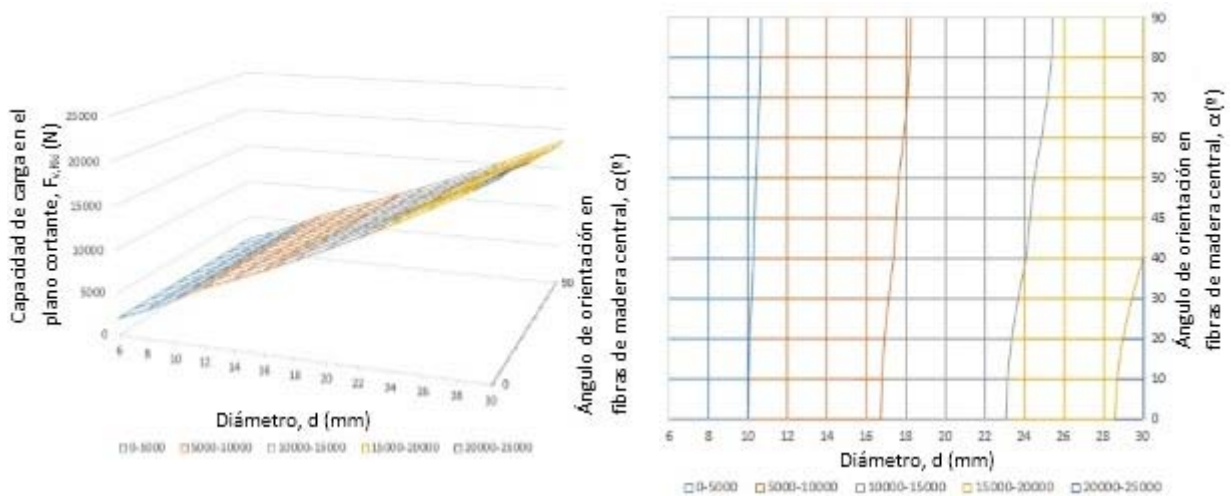


Figura 6-5. Capacidad de carga de la unión para variaciones de α y d . Gráficos en 3D y de contorno.

Como en las anteriores gráficas de proyectante vertical (Figura 6-2 y Figura 6-4), se ha tomado el modelo de unión descrito en la Tabla 6-1, pero fijando la orientación de la fibra en 90° (a diferencia de los casos anteriores donde estaba a 0°) y variando el diámetro de la clavija. En la Figura 6-6, se puede apreciar una transición de modo de fallo 4 a modo de fallo 3, a medida que aumenta el diámetro. Resulta interesante comparar esta gráfica con la de la Figura 6-4, en la que los modos de fallo 1 y 2 eran coincidentes, mientras que en ésta se puede apreciar que, a medida que se incrementa el diámetro de clavija, el modo de fallo 2 diverge más del modo de fallo 1, hasta convertirse en el más desfavorable.

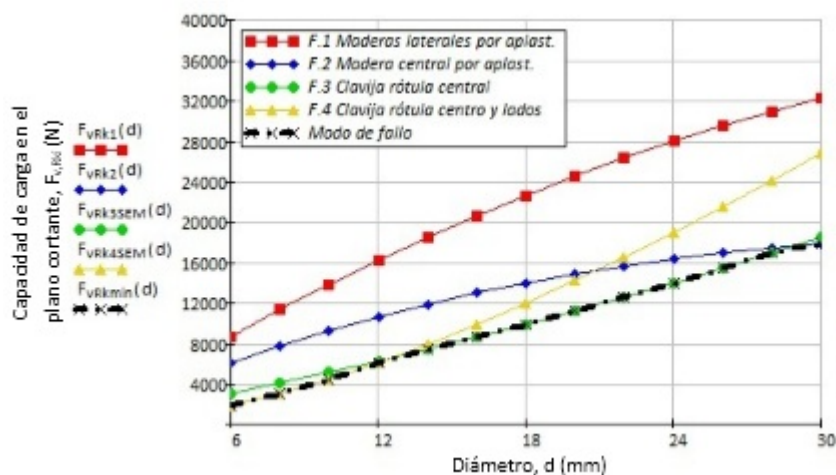


Figura 6-6. Capacidad de carga de la unión para variaciones de d con $\alpha = 90^\circ$.

Viendo la tendencia en los modos de fallo 1 y 2, resulta más interesante modificar el ángulo en la pieza de madera que aumentar la escuadría, siempre que sea posible elegir, porque ambas opciones suelen estar condicionadas por el diseño previo de la estructura en su conjunto. Atendiendo a la fijación con elementos de efecto soga (adhesivos o tuerca-arandela), es más interesante procurar que las piezas laterales estén alineadas con la dirección de la carga, porque debido a la combinación de esfuerzos (con los de efecto soga) pueden estar sometidas a situaciones más desfavorables, mientras que la pieza central de madera no sufre tensiones en la dirección de la clavija por la disposición en simetría. Por otro lado, el uso de materiales inyectados que mejoren el contacto de las fibras de madera (como la impregnación de adhesivos) resulta más significativo en las piezas de madera menos resistentes.

En definitiva, la orientación de la fibra es un aspecto delicado que puede presentar resultados más particulares que no están contemplados en el modelo analítico de la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) que se desarrolla en este apartado.

Tabla 6-8. Variaciones porcentuales de la capacidad de carga referidas a los modelos base frente a variaciones de α .

Variación, α	Diámetro de clavija, d (mm)												
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-1%
20	-1%	-1%	-1%	-1%	-1%	-1%	-1%	-1%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%
30	-3%	-3%	-3%	-2%	-2%	-3%	-3%	-3%	-3%	-3%	-4%	-4%	-4%
40	-4%	-5%	-5%	-4%	-4%	-4%	-5%	-5%	-5%	-5%	-6%	-6%	-6%
45	-5%	-5%	-6%	-5%	-5%	-5%	-5%	-6%	-6%	-7%	-7%	-7%	-8%
50	-6%	-6%	-7%	-6%	-6%	-6%	-6%	-7%	-7%	-8%	-8%	-8%	-9%
60	-7%	-8%	-8%	-8%	-7%	-7%	-8%	-8%	-9%	-9%	-10%	-10%	-11%
70	-8%	-9%	-10%	-9%	-8%	-8%	-9%	-10%	-10%	-11%	-11%	-12%	-12%
80	-9%	-10%	-10%	-10%	-9%	-9%	-10%	-10%	-11%	-12%	-12%	-13%	-13%
90	-9%	-10%	-11%	-10%	-9%	-9%	-10%	-11%	-11%	-12%	-12%	-13%	-14%

6.2.1.4 Capacidad de carga de la unión en función de los espesores de las piezas de madera (t_1 y t_2)

En la Tabla 6-9 y la Figura 6-7 se exponen los resultados que implican las variaciones de t_1 y t_2 . La capacidad de carga no se modifica con la variación de espesores de madera, como ya se comentó en el Apartado 6.2.1.2, pasando del modo de fallo 3 al modo de fallo 4 sin mejorar en resistencia.

Tabla 6-9. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de t_1 y t_2 .

		t_2 (mm)								
		130	140	150	160	170	180	190	200	210
t_1 (mm)	30	3.375	3.375	3.375	3.375	3.375	3.375	3.375	3.375	3.375
	40	3.677	3.677	3.677	3.677	3.677	3.677	3.677	3.677	3.677
	50	4.069	4.069	4.069	4.069	4.069	4.069	4.069	4.069	4.069
	60	4.519	4.519	4.519	4.519	4.519	4.519	4.519	4.519	4.519
	70	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978
	80	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978
	90	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978
	100	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978
	110	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978	4.978

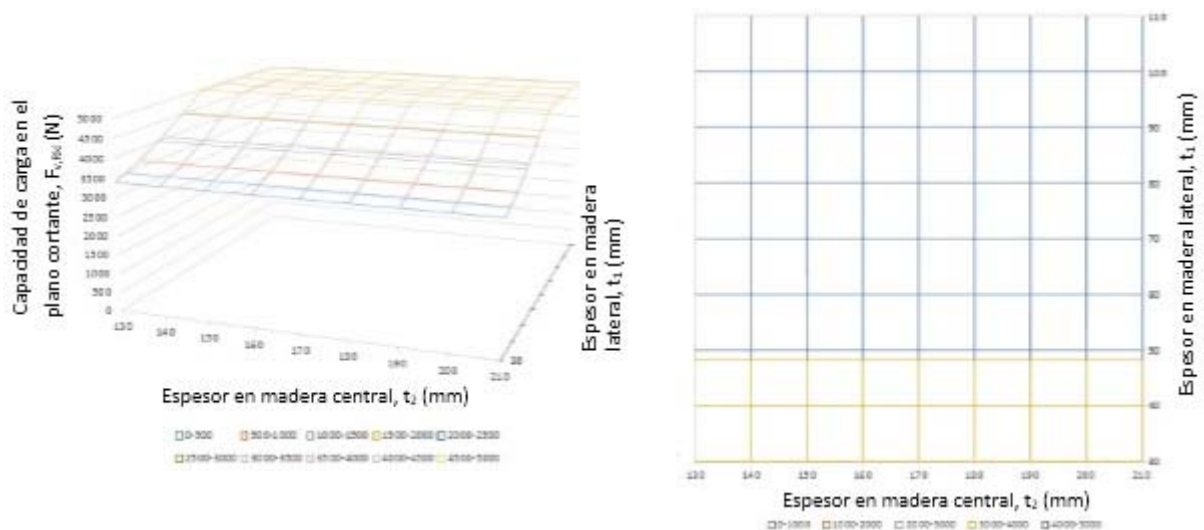


Figura 6-7. Capacidad de carga de la unión para variaciones de t_1 y t_2 . Gráficos en 3D y de contorno.

Al tener las curvas correspondientes a los modos de fallo 3 y 4 pendientes poco acentuadas, la capacidad de carga se mantiene baja, como se puede ver en la Figura 6-8.

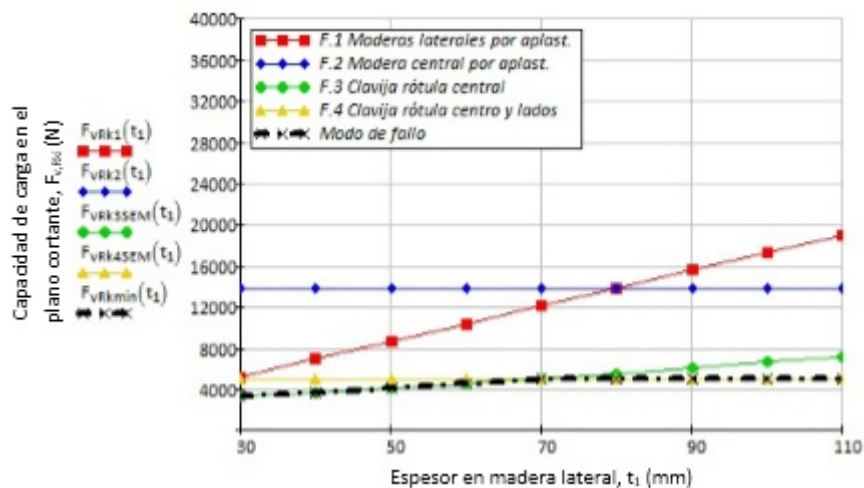


Figura 6-8. Capacidad de carga de la unión para variaciones de t_1 .

6.2.1.5 Consideraciones respecto al diámetro de la clavija

Se debe destacar que el modelo analítico propuesto en la normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) trata un único diámetro de la clavija (d), que emplea para distintas magnitudes geométricas, ya que en la práctica se distinguen tres diámetros distintos, que afectan de manera diferente a cada uno de los elementos resistentes de la unión:

- Diámetro del agujero final (d_{fin}), que es el correspondiente a la sección de madera sometida a aplastamiento una vez consolidada la unión. Por ejemplo, el exterior cuando se plantean holguras para facilitar la entrada del adhesivo, o el resultante de un sistema de expansión.
- Diámetro de diseño (d), empleado en las ecuaciones analíticas, y que toma el valor del taladro con el que se hacen los agujeros en la madera.
- Diámetro interior de la clavija (d_{int}), que por ejemplo, en sistemas roscados, se refiere al interior de la rosca, que corresponde a la sección más débil a efectos de resistencia a flexión de la clavija. Para complicar más la situación, el diámetro interior presenta una influencia más significativa en varillas roscadas de pequeño

diámetro, ya que es distinta (y variable) a efectos de la inserción de las fibras de madera entre los planos del filete, el cálculo de las resistencias al aplastamiento de la madera y del momento plástico de la clavija por efecto entalla en el interior de la rosca.

En aquellas clavijas en que los diámetros son mayores, el error relativo entre el diámetro del agujero final (d_{fin}) y el diámetro interior de la clavija (d_{int}) es menor. Estas diferencias no son tratadas en la normativa, lo que puede provocar modificaciones entre el modo de fallo analítico o esperado y el real, como se puede ver en la exposición de los resultados de los ensayos. Incluso pueden aparecer otros modos de fallo, como el de rotura por tracción en la clavija expuesta a efecto soga (que se dio en los ensayos de las probetas de la muestra 28).

6.2.2 Variables de propiedades resistentes del material

6.2.2.1 Capacidad de carga de la unión en función de la densidad de la madera (ρ_k)

Dado que la densidad está ligada con la resistencia de la madera y la zona de aplastamiento de la clavija, en la Tabla 6-10 se exponen los resultados analíticos de la capacidad resistiva de la unión en función de las variaciones del diámetro y de la densidad (que a su vez está relacionada con la clase resistente), dando lugar a una distribución no lineal. Por ello, cabe esperar que la variación de la capacidad resistiva sea mayor para las clases resistentes altas, donde la diferencia de densidades es más acentuada. Las variaciones numéricas en la densidad (ρ_k) permiten hacer una correlación a los distintos tipos de madera, que se expresa a la izquierda de la Tabla 6-10. Se puede apreciar que el modo de fallo 4 (característico de pequeños diámetros de clavija) prevalece con maderas de mayor densidad; esta situación se da sobre todo en maderas frondosas, donde las clases resistentes presentan mayor densidad.

Tabla 6-10. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de ρ_k y d.

Clase resistente	ρ_k	Diámetro de clavija, d (mm)												
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
C14	290	1.772	2.942	4.349	5.404	6.515	7.706	8.978	10.332	11.768	13.284	14.878	16.545	18.281
C16	310	1.832	3.042	4.496	5.707	6.863	8.098	9.414	10.812	12.292	13.853	15.492	17.205	18.989
C18	320	1.861	3.091	4.568	5.858	7.036	8.293	9.631	11.051	12.553	14.136	15.797	17.533	19.340
C20	330	1.890	3.139	4.639	6.009	7.209	8.488	9.847	11.289	12.813	14.417	16.100	17.858	19.688
C22	340	1.919	3.186	4.709	6.159	7.382	8.683	10.064	11.527	13.071	14.697	16.402	18.182	20.034
C24	350	1.947	3.232	4.777	6.310	7.555	8.877	10.280	11.764	13.330	14.977	16.702	18.504	20.378
C27	370	2.002	3.324	4.912	6.611	7.901	9.266	10.711	12.236	13.844	15.532	17.300	19.144	21.061
C30 y GL24h	380	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399
C35	400	2.081	3.456	5.107	7.012	8.418	9.847	11.355	12.942	14.611	16.360	18.189	20.094	22.072
GL28h	410	2.107	3.499	5.171	7.099	8.590	10.041	11.569	13.177	14.866	16.635	18.483	20.408	22.407
C40	420	2.133	3.541	5.233	7.185	8.762	10.234	11.783	13.411	15.120	16.909	18.777	20.722	22.740
GL32h	430	2.158	3.583	5.295	7.270	8.934	10.427	11.997	13.645	15.373	17.182	19.070	21.034	23.072
C45	440	2.183	3.624	5.357	7.354	9.106	10.620	12.210	13.878	15.627	17.455	19.362	21.345	23.402
GL36h	450	2.207	3.665	5.417	7.437	9.278	10.813	12.423	14.112	15.880	17.727	19.653	21.656	23.732
C50	460	2.232	3.706	5.477	7.519	9.450	11.006	12.637	14.345	16.132	17.999	19.944	21.965	24.060
D18	500	2.327	3.864	5.710	7.840	10.137	11.776	13.488	15.275	17.139	19.081	21.101	23.196	25.365
D24	520	2.373	3.940	5.823	7.995	10.431	12.161	13.912	15.738	17.640	19.620	21.676	23.807	26.011
D30	530	2.396	3.978	5.879	8.071	10.531	12.353	14.124	15.970	17.891	19.889	21.963	24.112	26.334
D35	540	2.418	4.015	5.934	8.147	10.630	12.545	14.336	16.201	18.141	20.157	22.249	24.416	26.655
D40	550	2.440	4.052	5.989	8.222	10.728	12.737	14.548	16.432	18.391	20.425	22.535	24.720	26.976
D50	620	2.591	4.302	6.359	8.730	11.390	14.079	16.029	18.046	20.134	22.294	24.527	26.831	29.205
D60	700	2.753	4.571	6.756	9.276	12.102	15.211	17.717	19.884	22.117	24.417	26.784	29.220	31.723
D70	900	3.122	5.183	7.661	10.518	13.723	17.247	21.065	24.458	27.043	29.681	32.373	35.120	37.923

En la Figura 6-9 se puede ver cómo el aumento de la densidad tiende a mejorar la capacidad de carga; en cualquier caso, sólo cuando se trata de maderas muy densas, las pendientes son comparables con las debidas al incremento de diámetro.

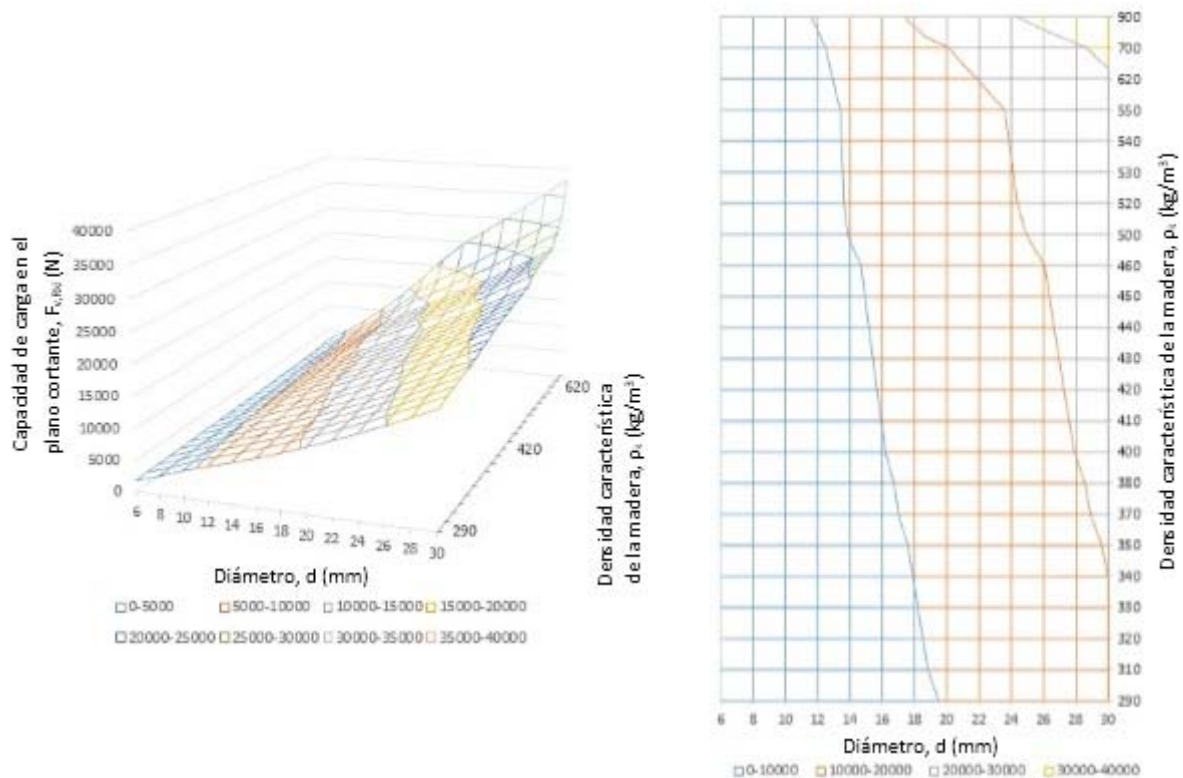


Figura 6-9. Capacidad de carga de la unión para variaciones de ρ_k y d . Gráficos en 3D y de contorno.

En la Figura 6-10 se analiza la variación de la capacidad de carga con el diámetro, para el modelo de unión de base de la Tabla 6-1, pero con un valor mayor de la densidad: $\rho_k = 540 \text{ kg/m}^3$, correspondiente a la clase resistente D35 de una madera frondosa. Al compararla con la Figura 6-4, en la que la madera tenía una densidad de 380 kg/m^3 , se puede apreciar que los modos de fallo 1 y 2 han incrementado sensiblemente su capacidad de carga, mientras que los modos de fallo 3 y 4 también lo hacen pero en menor proporción. Aunque se incrementa la densidad un 42 % (de 380 a 540 kg/m^3), la capacidad de carga lo hace en un 25 % en promedio.

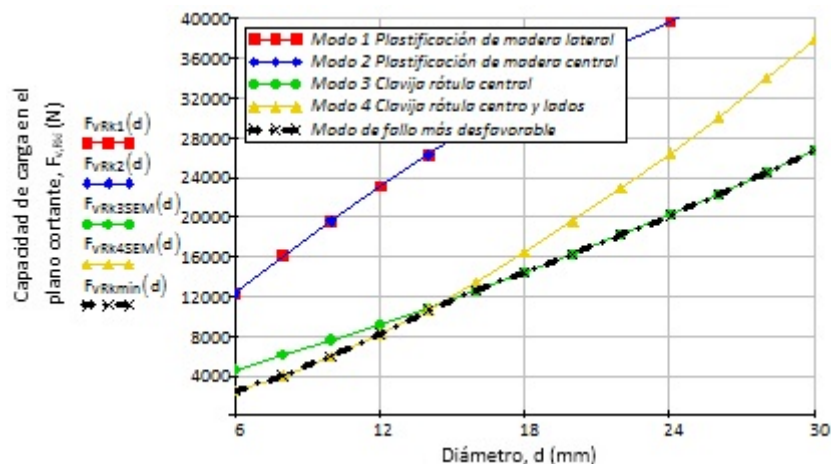


Figura 6-10. Capacidad de carga de la unión para variaciones de d , con D35 de $\rho_k=540 \text{ kg/m}^3$.

La relación entre incremento de densidad y capacidad de carga se analizó estadísticamente para el espectro de valores estudiado. La capacidad de carga mejora en una proporción menor al que lo hace el incremento de densidad

de la madera, estando entorno a un 62 % de promedio. Pero este incremento de capacidad es menos relevante a medida que se incrementa la calidad de la madera sometida al aplastamiento, como se puede ver en la Tabla 6-11.

Tabla 6-11. Mejora en la capacidad de carga relativa ante variaciones de densidad para distintos diámetros y en promedio.

Clase resistente	Variación ρ , relativa	Diámetro de clavija, d (mm)												Promedio	62%	
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28			30
C24	-8%	-4%	-4%	-4%	-7%	-6%	-6%	-6%	-6%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	67%
C27	-3%	-1%	-1%	-1%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	66%
C30 y GL24h	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	--
C35	5%	3%	3%	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	3%	65%
GL28h	8%	4%	4%	4%	5%	6%	6%	6%	6%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	64%
C40	11%	5%	5%	5%	6%	9%	8%	8%	8%	7%	7%	7%	6%	6%	7%	64%
GL32h	13%	6%	6%	6%	8%	11%	10%	10%	9%	9%	9%	8%	8%	8%	8%	64%
C45	16%	8%	8%	8%	9%	13%	12%	12%	11%	11%	10%	10%	10%	9%	10%	63%
GL36h	18%	9%	9%	9%	10%	15%	14%	14%	13%	13%	12%	12%	11%	11%	12%	63%
C50	21%	10%	10%	10%	11%	17%	16%	16%	15%	14%	14%	13%	13%	12%	13%	63%
D18	32%	15%	15%	15%	16%	26%	24%	23%	22%	22%	21%	20%	19%	19%	20%	62%
D24	37%	17%	17%	17%	18%	29%	29%	27%	26%	25%	24%	23%	22%	22%	23%	62%
D30	39%	18%	18%	18%	19%	30%	31%	29%	28%	27%	26%	25%	24%	23%	24%	62%
D35	42%	19%	19%	19%	20%	32%	33%	31%	30%	29%	28%	26%	25%	25%	26%	61%
D40	45%	20%	20%	20%	22%	33%	35%	33%	32%	30%	29%	28%	27%	26%	27%	61%
D50	63%	28%	28%	28%	29%	41%	49%	47%	45%	43%	41%	39%	38%	36%	38%	60%
D60	84%	36%	36%	36%	37%	50%	61%	62%	59%	57%	54%	52%	50%	48%	49%	58%
D70	137%	54%	54%	54%	56%	70%	82%	93%	96%	92%	88%	84%	80%	77%	75%	55%

6.2.2.2 Capacidad de carga de la unión en función de la relación de materiales de madera (β)

Con el conjunto de resultados mostrado en la Tabla 6-12 se estudia el uso de distinto tipo de madera a través del coeficiente de aplastamiento (β). Este cociente es una relación entre la resistencia característica al aplastamiento en la pieza de madera central ($f_{h,2,d}$) y la de las piezas laterales ($f_{h,1,d}$) (véase Ecuación 2-17). Los resultados parten de valores inferiores a la unidad ($\beta < 1$), lo que supone que la pieza central es más débil y de menor densidad (según las relación expuesta en la Tabla 2-15), para finalizar con madera central de mayor resistencia. Esta situación también da lugar a modos de fallo 4 en pequeños diámetros, y modo de fallo 3 a medida que se incrementa el diámetro.

Tabla 6-12. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de β y d.

Densidad de pieza t_2	β	Diámetro de clavija, d (mm)												
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
266	0,7	1.841	3.057	4.517	6.202	7.508	8.785	10.131	11.547	13.035	14.592	16.218	17.909	19.663
304	0,8	1.912	3.176	4.693	6.444	7.727	9.046	10.438	11.904	13.445	15.060	16.748	18.505	20.328
342	0,9	1.974	3.278	4.845	6.630	7.913	9.268	10.699	12.208	13.796	15.461	17.202	19.016	20.900
380	1	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399
418	1,1	2.076	3.447	5.095	6.877	8.213	9.628	11.123	12.703	14.367	16.115	17.945	19.854	21.839
456	1,2	2.119	3.518	5.199	6.978	8.336	9.775	11.298	12.907	14.603	16.385	18.252	20.202	22.229
494	1,3	2.157	3.581	5.293	7.067	8.446	9.907	11.453	13.089	14.813	16.627	18.527	20.512	22.578
532	1,4	2.191	3.638	5.377	7.147	8.544	10.024	11.593	13.252	15.002	16.844	18.775	20.792	22.893
570	1,5	2.222	3.690	5.453	7.219	8.632	10.130	11.718	13.399	15.173	17.040	18.998	21.046	23.178
608	1,6	2.250	3.737	5.523	7.284	8.712	10.226	11.832	13.532	15.327	17.218	19.202	21.276	23.437
646	1,7	2.276	3.780	5.586	7.344	8.784	10.314	11.936	13.654	15.469	17.380	19.387	21.487	23.675

La Figura 6-11 muestra mayores pendientes para incrementos de diámetro que para incrementos del coeficiente β , y, a medida que aumenta el diámetro de la clavija, el endurecimiento relativo de la madera central mejora la capacidad de carga.

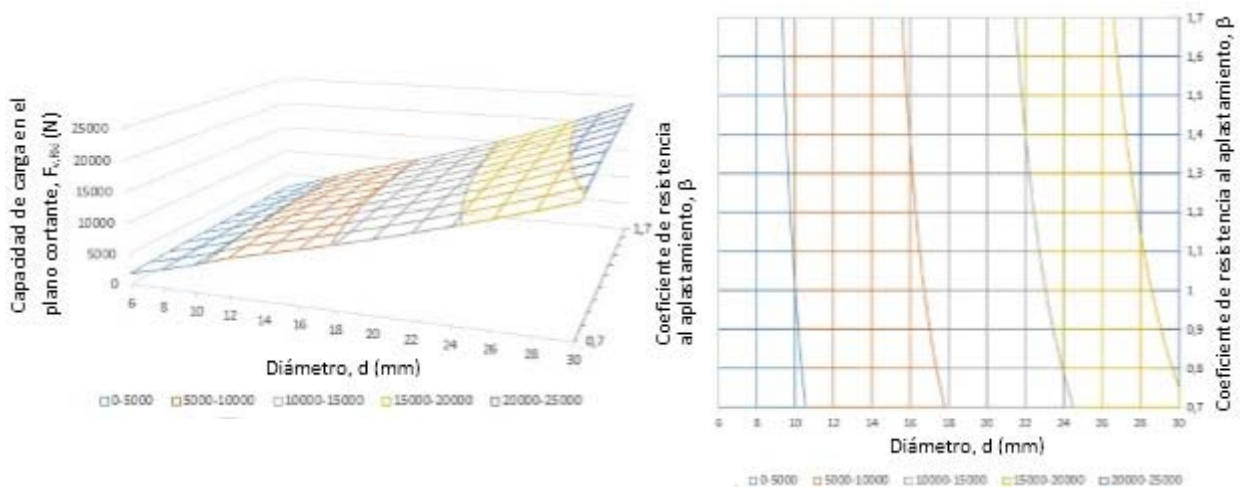


Figura 6-11. Capacidad de carga de la unión para variaciones de β y d . Gráficos en 3D y de contorno.

La Figura 6-12 muestra el plano proyectante vertical paralelo al eje donde varía el diámetro para $\beta = 1,3$. Dado que la pieza de madera central es más resistente al aplastamiento de la clavija, uno de los aspectos que diferencia este gráfico de los anteriores es la función asociada a la capacidad de carga de la unión ante el modo de fallo 2; este aspecto no resulta relevante a efectos de la capacidad de carga mínima porque se sigue presentando con las modos de fallo 4 y 3 a medida que aumenta el diámetro. Por lo tanto, sigue siendo el diámetro uno de los factores más sensibles para mejorar la capacidad de carga.

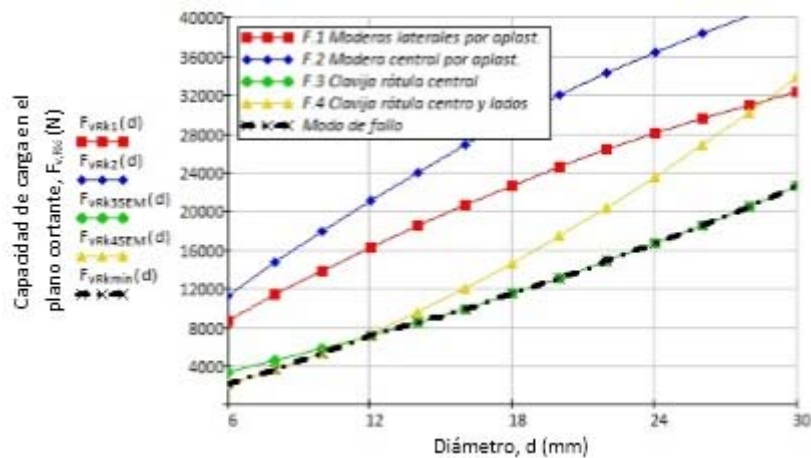


Figura 6-12. Capacidad de carga de la unión para variaciones de d , con $\beta=1,3$ constante.

Según se puede ver en la Tabla 6-13, la relación entre las densidades de las piezas de madera lateral y central, están vinculadas con la resistencia característica al aplastamiento y con el coeficiente de aplastamiento (β) y apenas supone mejoras significativas en el diseño de la clavija. Variaciones de un 40 % de la diferencia de densidades no suponen más de un 6 a un 8 % de la mejora de carga, con lo que la capacidad de carga no es muy sensible a este factor.

Tabla 6-13. Variaciones en la relación de densidades frente a la capacidad de carga (referidas al modelo base).

ρ_k	β	Variación relativa de β	Diámetro de clavija, d (mm)													Promedio	
			6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30		
266	0,7	-30%	-9%	-9%	-9%	-8%	-7%	-7%	-7%	-7%	-8%	-8%	-8%	-8%	-8%	-8%	25%
304	0,8	-20%	-6%	-6%	-6%	-5%	-4%	-4%	-4%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	23%
342	0,9	-10%	-3%	-3%	-3%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	21%
380	1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	--
418	1,1	10%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	19%
456	1,2	20%	4%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	18%
494	1,3	30%	6%	6%	6%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	6%	5%	17%
532	1,4	40%	8%	8%	8%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	7%	7%	7%	7%	6%	16%
570	1,5	50%	10%	10%	10%	7%	7%	7%	7%	7%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	15%

6.2.2.3 Capacidad de carga de la unión en función de tensión última del acero ($f_{u,k}$)

En este apartado se pretende comparar la influencia de la capacidad resistente de la clavija frente al diámetro del perno, Tabla 6-14. En este caso, clavijas de escasa resistencia implican una mayor prevalencia del modo de fallo 4; a medida que se incrementa la resistencia, se pasa a modo de fallo 3.

Tabla 6-14. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de $f_{u,k}$ y d.

		Diámetro de clavija, d (mm)												
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Resistencia última del acero $f_{u,k}$ (N/mm ²)	150	1.111	1.845	2.727	3.743	4.884	6.138	7.497	8.951	10.493	11.775	12.752	13.737	14.730
	200	1.283	2.130	3.148	4.322	5.640	7.088	8.657	10.239	11.308	12.396	13.504	14.633	15.783
	250	1.434	2.382	3.520	4.833	6.305	7.925	9.490	10.630	11.799	13.001	14.234	15.500	16.797
	300	1.571	2.609	3.856	5.294	6.907	8.601	9.786	11.012	12.279	13.589	14.943	16.338	17.776
	350	1.697	2.818	4.165	5.718	7.460	8.820	10.078	11.387	12.749	14.164	15.632	17.152	18.723
	400	1.814	3.013	4.452	6.113	7.766	9.036	10.365	11.755	13.208	14.724	16.303	17.943	19.641
	450	1.924	3.195	4.723	6.484	7.920	9.249	10.647	12.117	13.659	15.273	16.958	18.712	20.532
	500	2.028	3.368	4.978	6.762	8.073	9.460	10.926	12.472	14.100	15.809	17.597	19.462	21.399
	550	2.127	3.533	5.221	6.866	8.224	9.668	11.200	12.822	14.534	16.335	18.223	20.194	22.244
	600	2.222	3.690	5.453	6.969	8.374	9.873	11.470	13.165	14.959	16.850	18.834	20.909	23.068
	650	2.313	3.840	5.676	7.071	8.522	10.076	11.737	13.504	15.378	17.355	19.434	21.608	23.872
	700	2.400	3.985	5.783	7.173	8.669	10.277	12.000	13.837	15.789	17.851	20.021	22.292	24.659
	750	2.484	4.125	5.848	7.273	8.814	10.475	12.259	14.166	16.193	18.339	20.597	22.963	25.429
800	2.566	4.260	5.912	7.373	8.958	10.672	12.516	14.490	16.592	18.818	21.163	23.620	26.183	

En la Figura 6-13 se muestra de forma gráfica la capacidad de carga de la unión. En el caso del gráfico de contorno se puede apreciar que la pendiente de evolución de la resistencia es más acentuada que en el caso de las anteriores variables, salvo para el incremento del diámetro del perno.

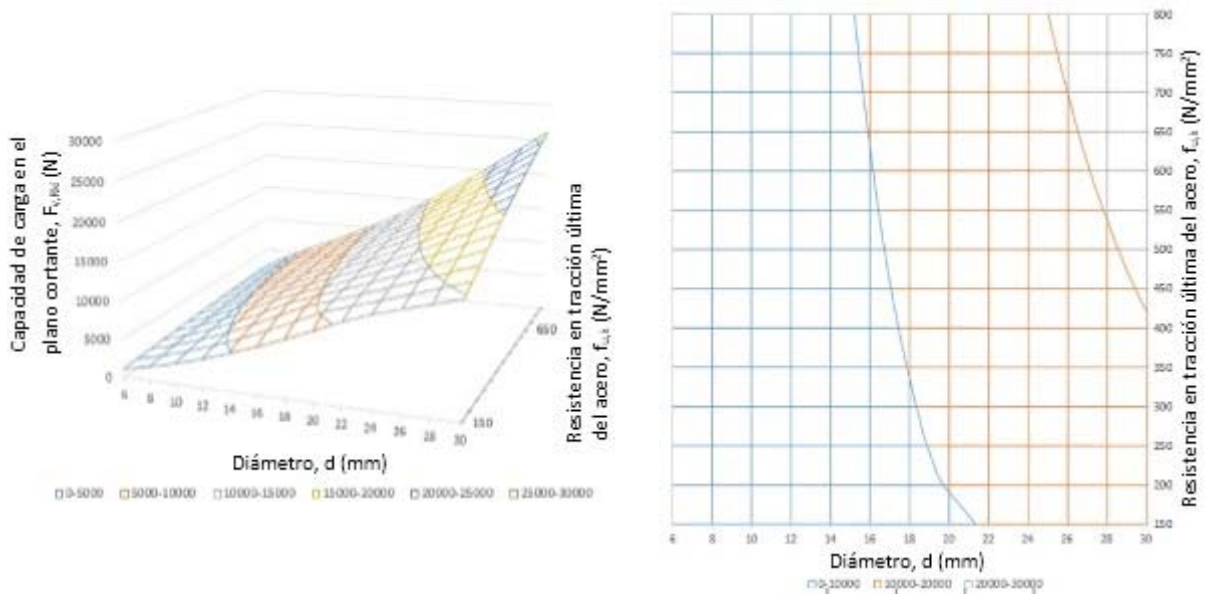


Figura 6-13. Capacidad de carga de la unión para variaciones de f_u y d . Gráficos en 3D y de contorno.

La Figura 6-14 muestra los resultados para el modelo de la Tabla 4-1, pero incrementando el valor de $f_{u,k}$ desde los 500 kg/m³ del caso base de partida hasta un $f_{u,k}$ de 800 kg/m³. Comparándolo con la Figura 6-4, para el caso de pequeños diámetros, la capacidad de carga no presenta incrementos significativos. Pero las pendientes de los modos de fallo 3 y 4 se incrementan rápidamente, acercándose a los modos de fallo por aplastamiento de la madera.

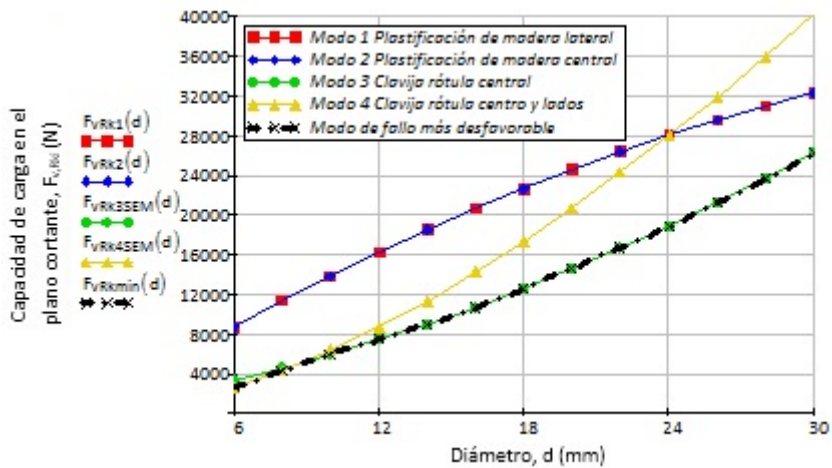


Figura 6-14. Capacidad de carga de la unión para variaciones de d , con $f_{u,k}=800 \text{ kg/m}^3$.

Revisando los incrementos relativos de la capacidad de carga para $f_{u,k} = 800 \text{ kg/m}^3$, al igual que en casos anteriores, sus valores están por debajo de los incrementos de la tensión última del material.

Tabla 6-15. Mejora en la capacidad de carga relativa ante variaciones de $f_{u,k}$ para distintos diámetros y en promedio.

	Variación de $f_{u,k}$ relativa	Diámetro de clavija, d (mm)														
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30		
		Variación de capacidad de carga relativa														
150	-70%	-45%	-45%	-45%	-45%	-40%	-35%	-31%	-28%	-26%	-26%	-28%	-29%	-31%	-35%	50%
200	-60%	-37%	-37%	-37%	-36%	-30%	-25%	-21%	-18%	-20%	-22%	-23%	-25%	-26%	-27%	46%
250	-50%	-29%	-29%	-29%	-29%	-22%	-16%	-13%	-15%	-16%	-18%	-19%	-20%	-22%	-21%	43%
300	-40%	-23%	-23%	-23%	-22%	-14%	-9%	-10%	-12%	-13%	-14%	-15%	-16%	-17%	-16%	40%
350	-30%	-16%	-16%	-16%	-15%	-8%	-7%	-8%	-9%	-10%	-10%	-11%	-12%	-13%	-12%	39%
400	-20%	-11%	-11%	-11%	-10%	-4%	-4%	-5%	-6%	-6%	-7%	-7%	-8%	-8%	-7%	37%
450	-10%	-5%	-5%	-5%	-4%	-2%	-2%	-3%	-3%	-3%	-3%	-4%	-4%	-4%	-4%	36%
500	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
550	10%	5%	5%	5%	2%	2%	2%	3%	3%	3%	3%	4%	4%	4%	3%	33%
600	20%	10%	10%	10%	3%	4%	4%	5%	6%	6%	7%	7%	7%	8%	7%	33%
650	30%	14%	14%	14%	5%	6%	7%	7%	8%	9%	10%	10%	11%	12%	10%	32%
700	40%	18%	18%	16%	6%	7%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%	15%	13%	32%
750	50%	22%	22%	17%	8%	9%	11%	12%	14%	15%	16%	17%	18%	19%	15%	31%
800	60%	27%	26%	19%	9%	11%	13%	15%	16%	18%	19%	20%	21%	22%	18%	30%

6.2.3 Influencia de las distintas variables desde un punto de vista analítico

Al hacer uso de distintas funciones analíticas para evaluar la capacidad de carga de la unión resulta difícil, en primera instancia, valorar la influencia de cada una de las variables. Los resultados expuestos en los Aparados 6.2.1 y 6.2.2 permiten identificar en qué elementos se debe poner foco para mejorar la capacidad de carga. Revisando las pendientes de las gráficas y los valores relativos vinculados con estas pendientes, se observa cómo la variación del diámetro es uno de los factores que más influyen.

Para sistematizar de modo tangible el efecto de las distintas variables, parece interesante introducir un factor adimensional que permita compararlas. Se propone para ello el coeficiente llamado rendimiento de unión (η_{variable}) para cada "variable" independiente; así, por ejemplo, el término variable puede ser el diámetro (d), el espesor (t_i) o la variación de ángulo de fibras de madera (α). Los coeficientes de rendimiento se calcularían como se expone de forma generalista en la Ecuación 6-1.

$$\eta_{\text{variable}} = \frac{\frac{\Delta F_{u,Rki}}{F_{u,RkRef}}}{\frac{\Delta \text{variable}}{\text{variable}_{Ref}}}$$

Ecuación 6-1

Siendo:

- η_{variable} rendimiento de diseño de la unión para el parámetro "variable".
- $F_{u,RkRef}$ carga admisible para la unión de referencia.

La unión de referencia ha quedado fijada a partir de una unión tipo, en este caso la expuesta en la Tabla 6-1, y los valores que la definen se han elegido de modo que permite valorar numéricamente cuáles son los parámetros en los que más puede interesar actuar para mejorar la capacidad de carga de la unión. En la Tabla 6-16 se sintetizan los resultados de los apartados anteriores, con los valores máximos y mínimos que se han de tomar para mejorar la capacidad de carga de la unión clavija. Para ello, como se indicó en el párrafo anterior, se define el concepto de "rendimiento de la unión". Se puede apreciar que en la mejora en la capacidad de carga de la unión tiene un gran

efecto el incremento del diámetro de la clavija, seguido de los valores medios en la densidad de las piezas de madera y, a continuación, de la capacidad resistente del material de la clavija. Mientras, las variaciones de espesor de la madera implican alteraciones significativas del rendimiento especialmente cuando la madera está debilitada en exceso.

Tabla 6-16. Rendimiento de la unión.

Variable	Diámetro (d)	Espesor (t ₁)	Orientación de fibra de madera (α)	Densidad de madera (ρ _k)	Coefficiente de densidades (β)	Tensión última del acero (f _{u,k})
Rendimiento de diseño de la unión	$\eta_d = \frac{\frac{\Delta F_{u,k}}{F_{u,kRef}}}{\frac{\Delta d}{d_{Ref}}}$	η_t	η_α	η_{ρ_k}	η_β	$\eta_{f_{u,k}}$
Máximo	179%	44/63=69%	0	67%	25%	50%
Mínimo	148%	0	-14%	55%	15%	30%

En consecuencia, teniendo en cuenta los parámetros analizados hasta ahora y sus variaciones, con los condicionantes analíticos expuestos, para mejorar el rendimiento se debe actuar preferentemente sobre:

1. El incremento de diámetro.
2. La mejora de la densidad de la madera.
3. La capacidad resistente de la clavija.

Se debe evitar la reducción en la sección de madera y en consecuencia el debilitamiento excesivo de las piezas de este material, así como el giro de la dirección de sus fibras.

6.2.4 Comentarios al modelo de Johansen

La introducción de modificaciones en la unión clavija puede hacer que la propuesta para su cálculo analítico basado en las expresiones de Johansen (véase Ecuación 2-53) pueda perder una base mecánica rigurosa; especialmente cuando la capacidad de carga de la unión (F_{v,Rk}) y el comportamiento a rigidez para los distintos estados de carga (relacionado con el módulo de deslizamiento instantáneo (K_{ser})) están afectados por otros complementos como:

- Los adhesivos inyectados en el agujero, porque modifican el contacto con las fibras de madera si son capaces de mojar y por lo tanto alterar la resistencia de aplastamiento, especialmente ante variaciones en la dirección de la fibra de madera respecto a la dirección de la carga.
- Las fijaciones en los extremos de la clavija, porque mejoran el comportamiento frente al deslizamiento de la unión y transmiten la plastificación a los extremos de la clavija recogiendo más trabajo a la vez que restringen el deslizamiento.
- Las variaciones superficiales de la clavija como el moleteado o el roscado, porque se modifican los coeficientes de fricción y las fibras de madera pueden verse expuestas a otros efectos distintos de los de aplastamiento simple.

En definitiva, existen distintos factores que pueden introducir alteraciones sustanciales en la unión de tipo clavija al ser combinados con el modelo simple (en el que se trata la clavija lisa expuesta a rótulas de plastificación).

El diseño de conexiones con varios pasadores parte de los mismos conceptos del diseño de conexiones de un solo pasador. Sin embargo, en el mismo, aparecen otros problemas mecánicos a resolver como la distribución estáticamente indeterminada o hiperestática y la distribución de fuerzas en las clavijas individuales a partir de su disposición relativa. Para determinar el número efectivo de clavijas que se necesitan se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- El espaciamiento entre las clavijas.
- Su capacidad para recoger cargas excéntricas.
- La distancia al borde.
- La exposición al fuego.
- La influencia de los cambios de humedad.

6.2.5 Evolución del efecto sogá

Atendiendo al análisis de los resultados que derivan de las propuestas analíticas, se debe considerar también el tratamiento del efecto sogá en el estudio de las capacidades resistentes de las uniones con clavijas (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009). Las ecuaciones que definen la capacidad de carga por plano de cortante y por elemento de fijación $F_{v,Rk}$ tienen una componente $F_{ax,Rk}$ que se suma al resto de la expresión, tal y como se desarrolló en el Apartado 2.7.6.1 (en el que se trataron las fuerzas de arranque que pueden aparecer en el elemento de fijación), y que se define considerando el tipo de clavija: clavos de distinta sección, tirafondos, pernos o pasadores. Para cada tipo de clavija se aplica un coeficiente reductor constante y distinto que actúa sobre el término de capacidad de carga a la extracción del elemento de fijación ($F_{ax,Rk}$) definido a partir de las ecuaciones desarrolladas para los clavos (Ecuación 2-74 y Ecuación 2-75). Se debe considerar toda la unión de tipo clavija y el efecto sogá como una contribución de este sistema de unión, lo que lleva a resaltar las particularidades o diferencias frente a la resistencia a extracción de los clavos:

- La capacidad de carga en la unión ($F_{v,Rk}$) es un vector que no actúa en la misma dirección que la capacidad de carga a extracción del elemento de fijación ($F_{ax,Rk}$), salvo que clavija y carga estén alineadas en la unión. Por lo tanto, se debería utilizar una proyección vectorial con una relación trigonométrica en función del deslizamiento, en lugar de una suma que no contempla la situación de la clavija plastificada en relación con la carga que soporta la unión en su conjunto.
- El diámetro inicial del agujero, si existe, frente al diámetro de clavija, porque puede haber diferencias de comportamiento a extracción dependiendo de si la clavija ha sido “clavada” o se trata de un perno que ya dispone de un hueco donde alojarse, especialmente en los de mayor diámetro.
- La geometría en los extremos de la clavija donde, por ejemplo, se pueden intercalar arandelas entre la cabeza del perno y el plano de contacto de la madera, o existan avellanados que modifiquen el comportamiento de la cabeza del perno frente a la plastificación de la madera.
- Los refuerzos de adherencia en la generatriz de la clavija; si se inyectan adhesivos se modifican las propiedades de contacto entre la clavija y la superficie de madera de una forma distinta a las ecuaciones descritas para la extracción.
- La deformación progresiva de las superficies de contacto entre madera y clavija derivada de las rótulas de plastificación de la clavija, que dan lugar a modificaciones en las superficies plastificadas y expuestas a extracción.

Teniendo presente estas particularidades, se retoman las expresiones vistas en el Apartado 2.7.6.1, que dan lugar a los resultados analíticos donde se identifica el efecto sogá como una función del diámetro de la clavija y la densidad de la madera. De forma más detallada, la Ecuación 6-2 tiene su origen en la resistencia de arranque tal y como indica la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) de “...un clavado perpendicular a la fibra [...] para clavos diferentes a los clavos lisos, como se definen en la Norma Europea 14592.” Al hacer uso de esta ecuación se debe tener cuidado con la configuración de la unión, porque aunque la norma indica que “debería tomarse como el valor menor de los dos obtenidos”, el modelo de la unión en cortadura doble con fijación en ambos extremos debe utilizar solo el relacionado con la resistencia de punzonamiento de la “cabeza del clavo” ($f_{head,k}$), que es función (según la Ecuación 6-3) del valor característico de la densidad de la madera (ρ_k), y a tratar el “diámetro de la cabeza del clavo” (d_h) como en la arandela interpuesta entre la cabeza del perno (o la tuerca) y la madera. En definitiva, no tiene sentido aplicar la relacionada con la resistencia a extracción ($f_{ax,k}$).

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 \end{cases}$$

Ecuación 6-2

$$f_{head,k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$$

Ecuación 6-3

En la Figura 6-15 se compara la evolución de los axiles relacionada con la capacidad a la extracción por punzando y por arranque según (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) teniendo presente que la de arranque no se aplica al modelo estudiado y que hay otras particularidades relacionadas con el efecto sogá. Las funciones no dependen del estado de carga ni de deformación al que se ve sometida la unión con clavija. Es decir, toman un valor constante para el modelo, independientemente de múltiples aspectos, como el pretensado al que se pudiera someter a la clavija comportándose como empaquetadura, entendiendo ésta como el sistema en el que la madera es el material intercalado entre las fijaciones con tuerca y arandela dispuestas en extremos de clavija. La Ecuación 6-2 tampoco considera con detalle la superficie expuesta a aplastamiento en los extremos de la clavija, ya que toma el diámetro en la cabeza del clavo (d_h) cuando sería más preciso un área (a modo de corona) descontando el diámetro de espiga. Todo ello remarca la necesidad de analizar el efecto sogá con más detalle.

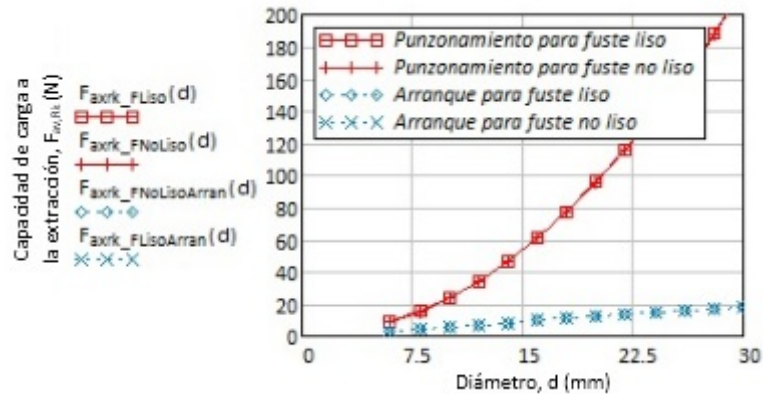


Figura 6-15. Capacidad de carga a la extracción según norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) .

En la Figura 6-16 se suma el 25% de la capacidad de carga a la extracción ($F_{ax,Rk}$), a partir del modelo descrito en Apartado 4.2.2.4 y generalizado para diámetros de 6 a 30 mm. La capacidad de carga por plano cortante ($F_{v,Rk}$) solo introduce el efecto sogá en las expresiones de los modos de fallo 3 y 4. Como se puede apreciar, las funciones son prácticamente coincidentes y la contribución por efecto sogá propuesta por el cálculo analítico de la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) es muy pequeña en comparación con la que corresponde a la misma unión sin fijaciones.

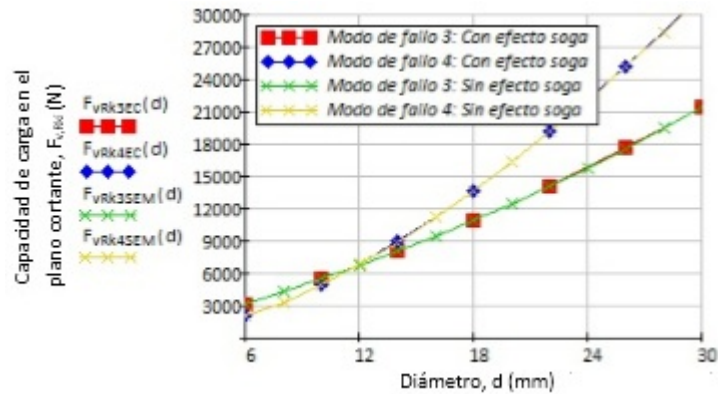


Figura 6-16. Superposición de la capacidad de carga a la extracción sobre el modelo de unión tipo clavija.

Aunque para el cálculo de la unión con clavija la norma hace referencia sólo a las ecuaciones vistas anteriormente se puede asociar el efecto sogá relacionado con la adherencia de clavija y agujero según lo visto el Apartado 3.6.5.1.1 y cuyos resultados para el modelo parten de la Ecuación 6-4.

$$F_{ax,Rk} = f_{ws} \cdot \rho_k \cdot d \cdot l_g^{1/2} \quad \text{para } l_g \geq 200 \text{ mm}$$

Ecuación 6-4. (Riberholt, 1988).

Existen otras propuestas definidas mediante la Ecuación 6-5 y la Ecuación 6-6.

$$F_{ax,k} = \pi \cdot d_{eq} \cdot l_g \cdot f_{v,\alpha,k}$$

Ecuación 6-5. Según pr EN 1995-1-1 (Eurocode 5 pr EN 1995-1-1, 1995).

$$F_{ax,k} = \pi \cdot d \cdot l_g \cdot \left(\frac{\rho}{380} \right)^{0,56} \cdot f_{v,\alpha,k}$$

Ecuación 6-6. Según (Gerold, 1992).

Para estudiar la evolución de las tres ecuaciones anteriores en la contribución del adhesivo a la unión clavija, se ha tomado un valor de longitud encolada (l_g) análogo al espesor de las piezas laterales de madera (t_1), descontando el ancho plastificado (b_1) y calculado a partir de los valores analíticos (Ecuación 2-52) derivados de los trabajos de investigación previos (Johansen, 1949). Con el modelo numérico base ya descrito (Tabla 6-1) se puede determinar un valor de la longitud de encolado constante ($l_g = t_1 - b_1 = 80 - 24 = 56 \text{ mm}$). En la Figura 6-17 se puede identificar la evolución de la carga de adherencia frente a la longitud encolada (l_g) en la gráfica de la izquierda y frente al diámetro de clavija (d) en la gráfica de la derecha, de forma análoga a como lo han hecho otros investigadores (Otero, 2009) (véase Figura 3-34). La propuesta de algunos autores (Gerold, 1992) descrita en la Ecuación 6-6, presenta valores favorables de capacidad de carga con longitudes de adherencia pequeñas, pero llega a estar penalizada frente a la norma (Eurocode 5 pr EN 1995-1-1, 1995) cuando la longitud es mayor. Ante variaciones de diámetro de clavija, la propuesta de Gerold es más optimista, como se aprecia en la Figura 6-17 pues se desarrolla (con línea marrón y círculos) por encima de la otras dos, mientras que la norma reflejada en la Ecuación 6-5 se sitúa (con línea verde y rombos) por el lado de la seguridad. Recordar, tal y como se indicó en el Apartado 3.6.5.1.1, que la Ecuación 6-5 no es asumida en las versiones definitivas del Eurocódigo 5 (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), ni en la trasposición a otras normas (DB SE M, 2009). Por otra parte, la influencia de la densidad puede no ser tan significativa (Otero, 2009), y el ancho de plastificación (b_1) puede variar a medida que plastifica la unión, lo que requiere un estudio vinculado con el deslizamiento de la unión y las particularidades de la superficie de contacto, especialmente la superficie de clavija, la capacidad de mojado con la que el adhesivo es capaz de penetrar entre las fibras de madera y la propia resistencia de cada adhesivo.

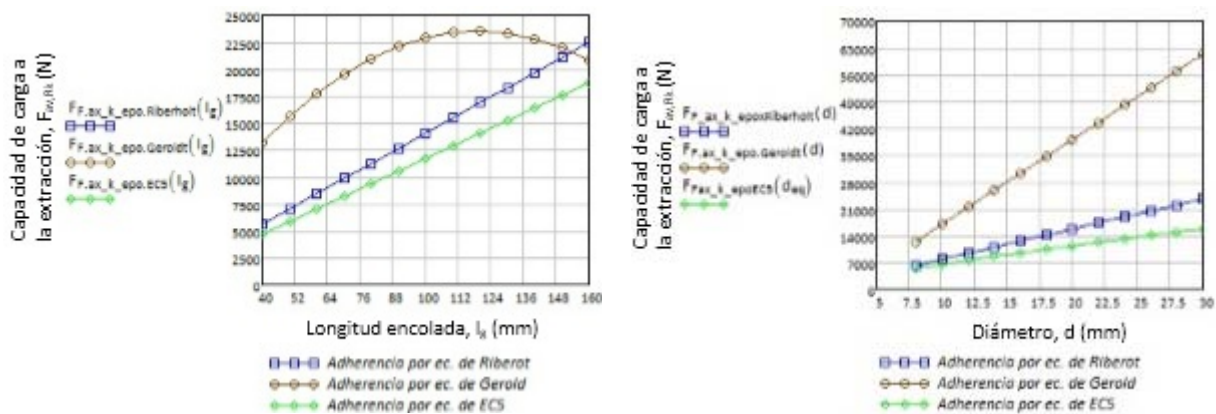


Figura 6-17. Capacidad de carga axil para completos de clavija.

Siendo necesario elegir una expresión de entre las distintas alternativas, la más adecuada parece la propuesta del borrador del Eurocódigo (Eurocode 5 pr EN 1995-1-1, 1995), dado que otros trabajos (Otero, 2009), (Riberholt, 1988) o (Gerold, 1992) tienden a centrarse en el estudio de la adherencia cuando la dirección de las fibras y de la clavija coinciden. El borrador del Eurocódigo, además de situarse del lado de la seguridad, contempla la variación en la orientación de las fibras de la madera con respecto a la clavija.

6.3 Resultados del modelo de elementos finitos en tres dimensiones

A continuación se muestran los resultados del modelo de elementos finitos (MEF) desarrollado en tres dimensiones con Abaqus® y cuya preparación fue expuesta en el 4.4.2. Este modelo tiene como objetivo simular el comportamiento de las probetas con las que se han realizado los ensayos, así como estudiar las tensiones y las deformaciones de trabajo en aquellas regiones donde pueden ser más críticas.

Los pasos establecidos (descritos en el Apartado 4.4.2.4) están orientados a simular el ensayo de compresión, manteniendo fijadas las piezas laterales de madera (de espesor t_1) mientras que se aplica una precarga con un pequeño deslizamiento (PASO1) en la testa de la pieza central, para posteriormente continuar aplicando el resto de la carga o el desplazamiento correspondiente al estado de la unión, estableciendo sucesivos *Steps* para estudiar con detalle tres estados particulares:

- Estado de fallo A), según la norma de dimensionado (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) donde se supone la aplicación de una carga $2 \cdot F_{v,Rk} = 9.956 \text{ N}$ (véase Ecuación 4-11) a modo de presión sobre la cuarta parte de la pieza central de madera de espesor t_2 . En el modelo estudiado debería suponer un modo de fallo 4 (con doble rótula). Se corresponde con el “PASO 2” del módulo *Step*.
- Estado de fallo B), según la norma de ensayo para uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos (UNE-EN 26891, 1992) donde se limita el deslizamiento en la unión ($u = 15 \text{ mm}$). Se corresponde con el “PASO 3” del módulo *Step*.
- Estado de fallo C), para una deformación muy avanzada ($u = 60 \text{ mm}$), con objeto de seguir estudiando el comportamiento de la unión para situaciones extremas de trabajo; aunque no hay referencias normativas para este deslizamiento tan alto, ya que las normas anteriores suelen estar del lado de la seguridad frente a un estudio completo de la unión, donde interesa llegar a estados límite. Se corresponde con el “PASO 4” del módulo *Step*.

6.3.1 Evolución del modelo numérico de unión y ajustes

En la Figura 6-18 se muestran los desplazamientos vertical y lateral que sufre la unión a medida que evoluciona el proceso de trabajo. Se exponen distintos fotogramas (i,j), donde “i” representa el paso en el proceso de carga y “j” representa el incremento dentro de ese paso. Se ha modificado el factor de escala en la representación lo que

permite acentuar las deformaciones, especialmente en las primeras etapas de trabajo. Aunque estas deformaciones no son proporcionales a las dimensiones de las piezas, permiten ver la tendencia en el comportamiento de la unión a medida que evoluciona el proceso de carga. En los primeros estados de carga, dentro del "PASO 1", donde se aplica un pequeño deslizamiento (-0,7 mm), [Fotograma (1,3)] se aprecia que la clavija presenta una flexión, con esfuerzos máximos en la zona correspondiente a la pieza central de madera con una deformación próxima a un modo de fallo tres, pero sin llegar a sufrir plastificación con la formación de rótulas en la clavija. La rigidez que presenta inicialmente la clavija provoca el acercamiento en los planos de contacto correspondientes a las intercaras de la madera de la pieza lateral y central [Fotograma (1,3)]. Este efecto de aproximación también se aprecia en los primeros momentos de la formación de rótulas plástica [Fotograma (3,10)], dando lugar a la aparición de reacciones perpendiculares en las superficies de las piezas de madera lateral y central debido al contacto y generando la aparición de la fricción entre ellas. A medida que evoluciona el deslizamiento en la unión, la madera comienza un proceso de aplastamiento contra la clavija. Los ángulos de giro (θ) en la misma se hacen mayores y las superficies de las piezas de madera dejan de presentar fuerzas normales para tender a separarse [Fotograma (3,53) y (4,98)]; esta separación está asociada con las componentes de las reacciones que se presentan en la dirección del eje "Y", y en consecuencia, con el aumento el ángulo de giro en la clavija (θ). La separación entre las intercaras de madera con deslizamientos avanzados supone la desaparición de las posibles fuerzas de fricción entre éstas, que podrían contribuir a la capacidad de carga de la unión, y resaltan la importancia de introducir factores de efecto sogá, por ejemplo con la colocación de tuerca y arandela en los extremos de la clavija, para evitar que las piezas de madera se separen con movimientos en el eje "Y", especialmente si hay ángulos de giro en la clavija significativos.

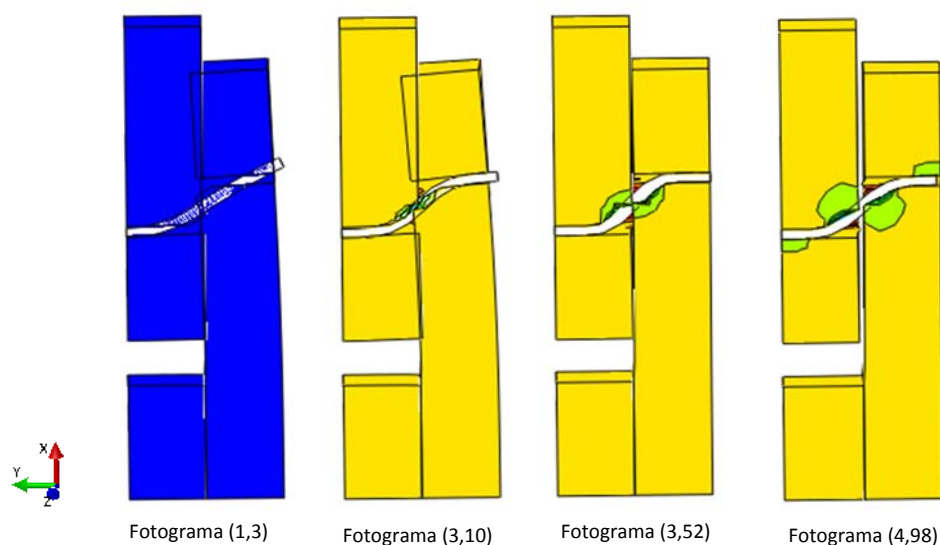


Figura 6-18. Evolución en las deformaciones de la unión con escalas en la opción de *Auto-compute*.

El modelo de elementos finitos (MEF) debe ser ajustado antes de proceder a estudiar las tensiones y deformaciones internas. Para ello se compara la evolución de la carga y el deslizamiento con los resultados de los ensayos experimentales descritos en el Capítulo 5. Los ensayos que responden al mismo diseño de unión estudiado con el modelo de elementos finitos están agrupados en la muestra [M25] (probetas P134, P135 y P136). El modelo desarrollado inicialmente (MEF 1), según se mostró en el Apartado 4.4, presenta pendientes en la zona plástica, tanto para la madera como para el acero, que son una fracción (1/20) de las pendiente correspondientes a la zona elástica (véase Figura 4-15). Para el estado de deformación de la clavija correspondiente al deslizamiento final ($u = 60$ mm), se puede apreciar que los anchos de aplastamiento en las piezas de madera (b_1 y b_2) son mayores en el MEF 1.



Figura 6-19. Deformación de la clavija en el modelo de elementos finitos inicial (MEF 1) y en la muestra de ensayo [M25].

Para poder determinar el efecto de la aproximación realizada al modelizar el comportamiento mecánico, tanto de madera como de acero, mediante dos rectas con diferentes pendientes, una para la zona elástica y otra para la plástica, se ha procedido a recalcular el modelo distintas veces, modificando los valores de la pendiente, en concreto la de la zona plástica. La Figura 6-20 muestra las curvas de carga frente a deslizamiento de los ensayos experimentales en comparación con los distintos MEF *i*, donde “*i*” representa los diferentes modelos utilizados, cada uno de ellos con diferentes pendientes en la zona plástica. En los ensayos se aprecia una mayor pendiente en la zona inicial y la meseta de plastificación se forma antes, manteniéndose en valores más bajos de carga que el modelo inicialmente planteado (MEF 1) y, aunque éste presenta una trayectoria cercana, al incrementar el deslizamiento se sitúa por encima de los valores de carga de los ensayos. La única excepción es la probeta P134 para deslizamientos mayores de 30 mm, donde el MEF 1 queda por debajo, y por tanto del lado de la seguridad.

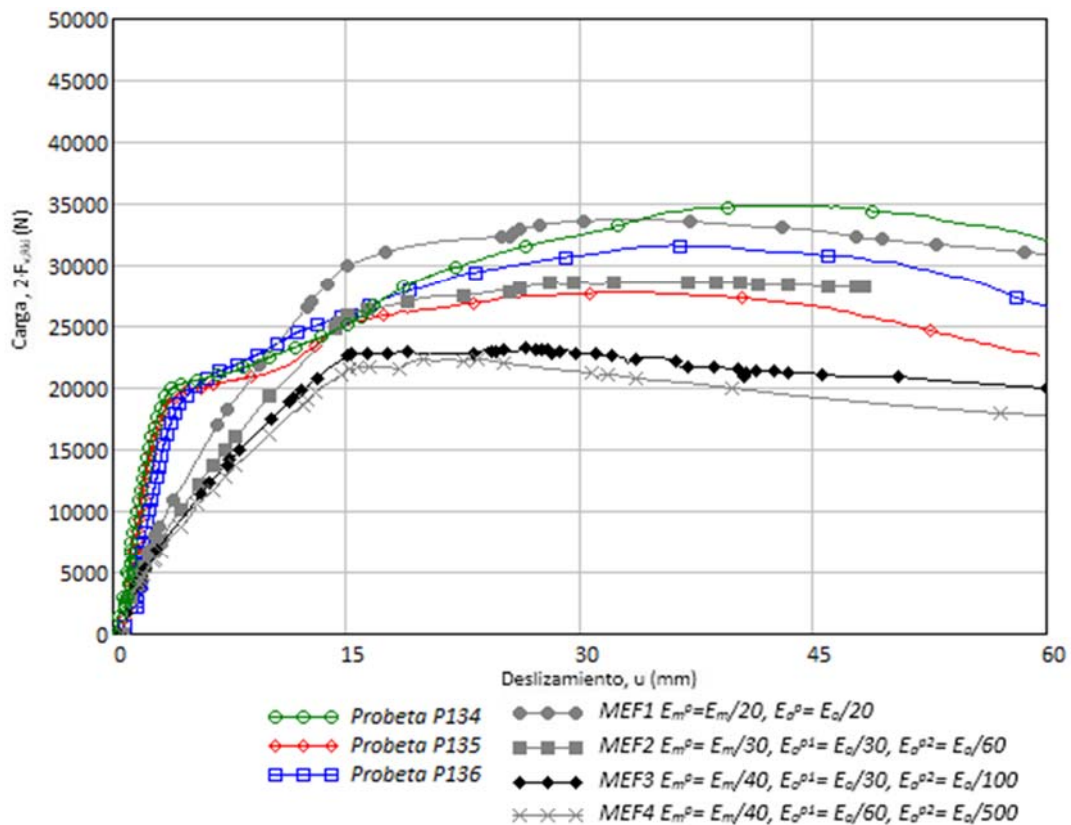


Figura 6-20. Evolución de la carga frente a deslizamiento y ajustes frente al comportamiento de plastificación para diferentes pendientes de la curva de modelización del comportamiento plástico.

Las curvas representadas en la Figura 6-20 demuestran el efecto significativo que la pendiente de la recta con la que se ha aproximado la zona de comportamiento mecánico tiene sobre los resultados. Es necesario, proponer un modelo cuyos resultados se aproximen lo máximo posible a los experimentales, pero que en cualquier caso queden por debajo, de manera que estemos del lado de la seguridad. Esta es la razón por la que el modelo se ha recalculado con varias pendientes para la recta que modeliza la zona de comportamiento plástico. Las características de estos otros modelos ensayados se comentan a continuación:

- MEF 2: se reduce la pendiente en la zona de comportamiento plástico de la madera ($E_m^p = E_m/30$) y se definen dos tramos de plastificación para el acero, uno entre las resistencias características de límite elástico (f_y) y de límite último (f_u) con una pendiente de transición ($E_a^{p1} = E_a/30$), y otro tramo por encima de la resistencia de límite último (f_u) con otra pendiente para las plastificaciones avanzadas ($E_a^{p2} = E_a/60$). Como puede comprobarse (Figura 6-20) la meseta de plastificación que aparece con un deslizamiento de $u = 15$ mm tiene una menor capacidad de carga. Aun así, se debe tener presente que el modelo de elementos finitos se utilizan los valores de resistencia característicos extraídos de norma, tanto para la madera (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), como para el acero (Eurocódigo 3. UNE EN 1993-1, 2013), que son más bajos que los obtenidos para estos materiales mediante ensayos experimentales.
- MEF 3: se ha bajado la pendiente de la zona plástica de la madera ($E_m^p = E_m/40$) y las pendientes en los dos tramos de plastificación del acero, en el primer tramo a un valor $E_a^{p1} = E_a/30$ y en el tramo por encima de la resistencia de límite último (f_u) a un valor $E_a^{p2} = E_a/100$.
- MEF 4: se ha mantenido la pendiente de la zona plástica de la madera ($E_m^p = E_m/40$) y se ha bajado aún más las pendientes en los dos tramos de plastificación del acero con valores $E_a^{p1} = E_a/100$ y $E_a^{p2} = E_a/500$.

Si se compara el resultado de la probeta P135 (a partir de $u = 15$ mm) con el MEF 2, éste sigue dando valores de carga mayores que los del ensayo. Además el proceso de cálculo numérico ha tenido problemas de convergencia interrumpiéndose en un deslizamiento avanzado ($u = 50$ mm). Se observa que los modelos de elementos finitos dan lugar a una meseta de plastificación con menos capacidad de carga a medida que se bajan las pendientes de plastificación en la madera y el acero. El MEF 3 y MEF 4 ya se ajustan mejor en la zona de la meseta de plastificación y se sitúan del lado de la seguridad. En el caso del MEF4, donde se ha disminuido significativamente la pendiente de la zona de plastificación del acero de la clavija, las variaciones en la altura de la meseta no son tan relevantes como las producidas con las disminuciones en la pendiente de la zona de plastificación de la madera. En los modelos de elementos finitos, al aplicar pendientes muy pequeñas en el acero ($E_a^{p2} = E_a/500$), se acentúa la pendiente negativa en la zona de meseta teniendo un aspecto lineal para valores altos de deslizamiento a diferencia de lo que ocurre en los ensayos donde es más curvada y cuyas causas serán estudiadas con detalle más adelante.

Para seleccionar las pendientes de plastificación de madera y acero más correctas se debe considerar que:

- La trayectoria en la curva de carga frente a deslizamiento y la zona de meseta que caracteriza la capacidad de carga máxima debe estar dentro de la zona de seguridad, es decir, situadas por debajo de la correspondiente a los ensayos, pero lo más aproximado posible a ella.
- Resulta aconsejable que la plastificación del acero presente una pendiente de transición (E_a^{p1}) en el segmento situado entre el comportamiento elástico y la plastificación avanzada. En las secciones de la clavija donde aparecen los esfuerzos flectores máximos, el acero puede trabajar en una zona de transición cercana a la resistencia de límite elástico (f_y) a medida que se va formando la rótula. Por ese motivo, y para contemplar una transición entre el comportamiento lineal y elástico del acero y el comportamiento de plastificación avanzado se plantea un periodo de transición en la plastificación del acero.

De entre los diferentes modelos MEF i , cada uno de ellos con distintas pendientes en la zona de plastificación, se toma el MEF 3 donde se establecen las pendientes de plastificación ajustadas en la madera con un valor $E_m^p = E_m/40$ y en el acero como dos tramos ($E_a^{p1} = E_a/30$ y $E_a^{p2} = E_a/100$) ya que estos valores están del lado de la seguridad si se

comparan con los distintos ensayos. Aunque también está del lado de la seguridad, se descarta el MEF 4 porque se aleja más de los resultados de los ensayos en los resultados de capacidad de carga.

Para los modelos numéricos mostrados en la Figura 6-20 se observa que en los primeros estados de deslizamiento las curvas evolucionan con una menor pendiente, lo que implica que sus resultados están menos ajustados al comportamiento real. Analizando los resultados del PASO 2, correspondiente al estado A) donde se aplica la carga ($2 \cdot F_{v,Rk} = 9.956 \text{ N}$), el programa resuelve este paso con pocas iteraciones y grandes desviaciones de carga frente a los ensayos. También hay que considerar en los primeros estados de aplicación de la carga las holguras que tiene la unión real. Mientras los ensayos muestran una consolidación inicial (véase Figura 5-38), que parece más grande para la probeta P136, el modelo de elementos finitos requiere una corrección añadida para contemplar los asentamientos iniciales asociados a la holgura. En la Figura 6-21 se puede comparar la evolución del MEF 3 (representado con línea gris y marca de rombo), en la zona correspondiente al PASO 2, frente al MEF (representado con línea negra y marca de triángulo), que es un nuevo modelo en el que partiendo del anterior sólo se consideran los pasos con deslizamiento y al que además se le ha aplicado una holgura inicial que desplaza toda la curva en 1,5 mm hacia la derecha una vez extraídos los resultados. Como se puede apreciar en la Figura 6-21, el MEF evoluciona con un comportamiento muy cercano al de los ensayos (P134, P135 y P136) y es este modelo el que da lugar a los resultados definitivos, una vez que se ha comparado y ajustado los resultados experimentales de modelos de uniones reales.

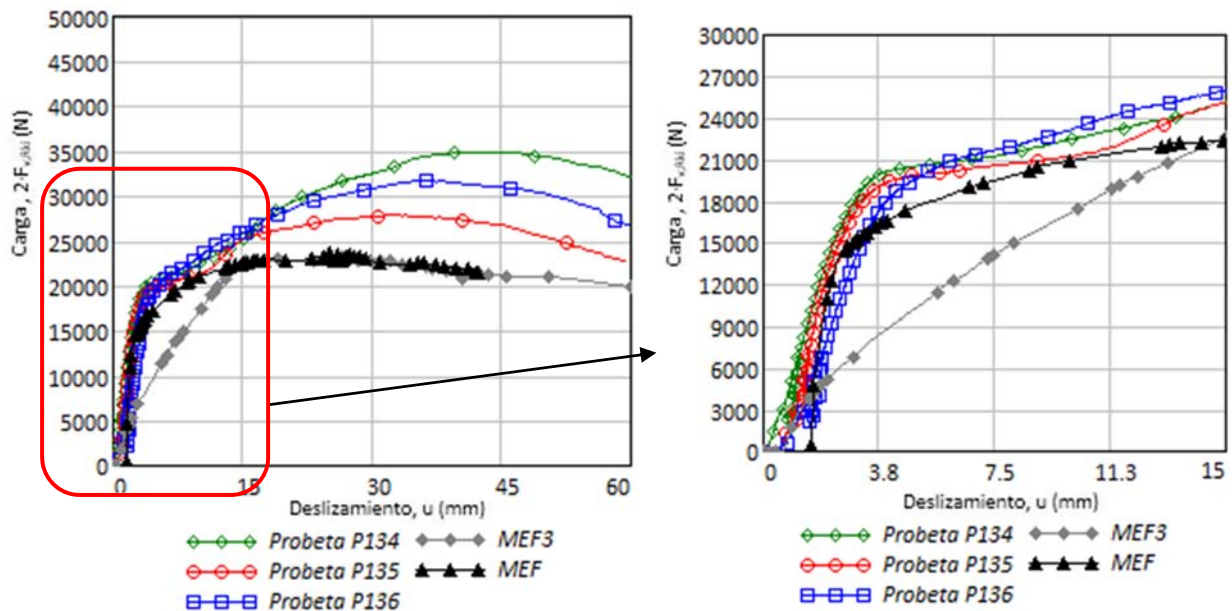


Figura 6-21. Evolución de carga frente a deslizamiento del modelo de elementos finitos ajustado a los resultados de los ensayos.

A continuación se analiza con más detalle la sección transversal de la unión, comparando los resultados de la probeta P136 con los correspondientes al método de los elementos finitos MEF (Figura 6-22), para el mismo deslizamiento ($u = 60 \text{ mm}$). Las deformaciones finales son muy parecidas. En ambos casos se identifica el modo de fallo cuatro, propio con la clavija plastificada con doble rótula, anchos de aplastamiento (b_1 y b_2) y un ángulo de giro en la clavija con valores semejantes. Se debe tener presente que el corte transversal hecho sobre la unión real ha sido posterior a la ejecución del ensayo, y por lo tanto, el resultado experimental se muestra con una recuperación elástica, lo que se puede apreciar, al salirse la clavija del agujero de madera donde estaba alojada. En cambio, el modelo de elementos finitos presenta la deformación correspondiente a la carga y deslizamiento finales, sin que se haya producido ninguna descarga elástica. Además, en la Figura 6-22 se está mostrando una situación con deslizamientos muy avanzados, correspondiente al estado C) mostrado en la Figura 6-23, donde ya se han sobrepasado los estados de fallo A) y B). En esta zona, en el comportamiento real del acero, la pendiente de plastificación es negativa (véase

Figura 3-24), mientras que en el modelo de elementos finitos, por motivos de convergencia el cálculo, la pendiente de plastificación para el acero debe ser siempre positiva, y en este caso concreto se ha tomado como constante.

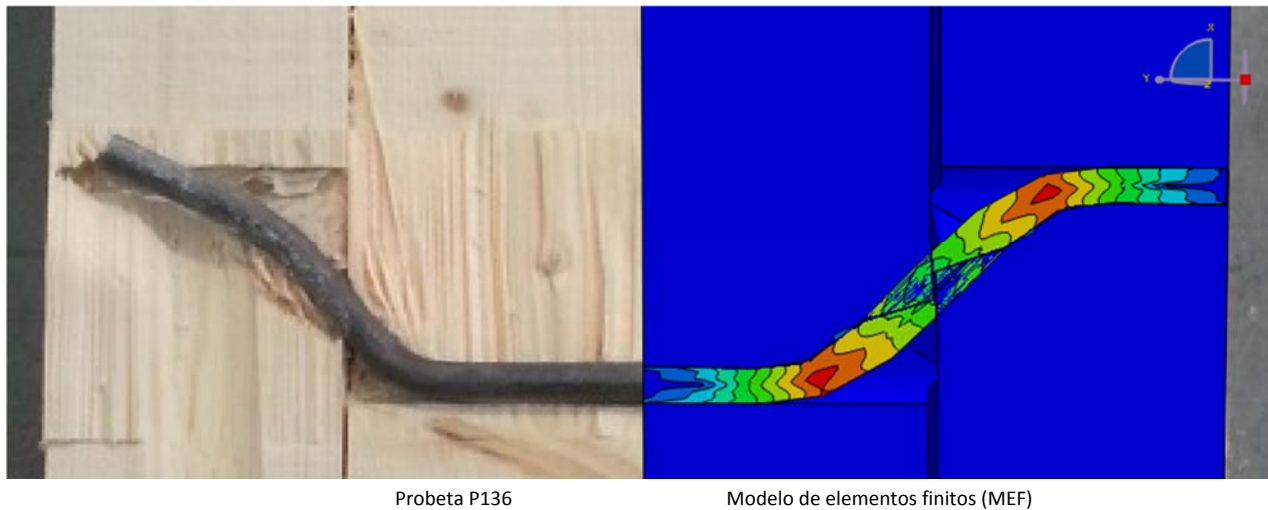


Figura 6-22. Sección transversal del estado final de la unión en un estado de plastificación avanzada ($u = 60$ mm).

En la Figura 6-23 se muestra el desplazamiento en la unión para los tres estados indicados. Las imágenes responden a la parte de la unión, limitada por los planos de simetría perpendiculares a los ejes “Y” y “Z”, que se ha utilizado para simplificar el modelo de cálculo. El desplazamiento total (U) que se ha producido en la unión viene expresado en milímetros con un factor de escala unitario, con lo cual es proporcional a la geometría de la unión. Los deslizamientos aplicados en la pieza central han sido de 15 y 60 mm para los estados B) y C) respectivamente en dirección 1 (U_1) y se aplican sobre la superficie superior de la pieza central de madera. Se puede apreciar que estos valores de desplazamientos se superan en determinadas zonas. Esto es debido a dos factores: por un lado el desplazamiento que se muestra es el total (U) que es una suma vectorial de las componentes en los tres ejes; por otro lado, la flexión que se produce en la clavija provoca un desplazamiento adicional hacia abajo en la madera que se encuentra justo bajo la sección central de ésta. El efecto se modifica a medida que evoluciona el diagrama de momentos flectores de la clavija y está asociado a la rigidez de la clavija, siendo menor cuanto menor es la rigidez que esta presenta. La pieza lateral de madera (de espesor t_1) junto con el taco muestra deslizamientos muy reducidos, mientras que la pieza de madera central (de espesor t_2) es la que asume los mayores deslizamientos, sobre todo a medida que se producen las rótulas de plastificación en la clavija.

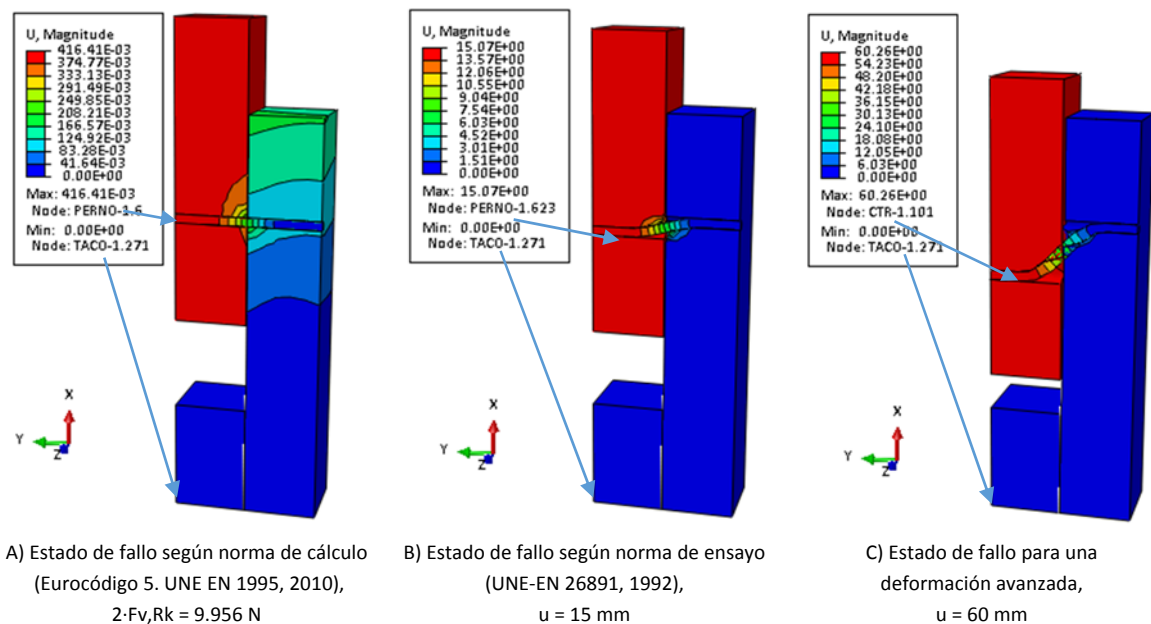


Figura 6-23. Valores de desplazamiento combinado en la unión (U).

Por su parte, la Figura 6-24 muestra la componente U1 de los desplazamientos para las mismas sollicitaciones representadas en la Figura 6-23. En la pieza de madera lateral se puede apreciar como la zona exterior, en el caso del estado A), está expuesta a pequeños desplazamientos positivos ($U_1 = 46,22 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$) que aumentan en el estado B) hasta ($U_1 = 77,05 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$) y en el estado C) hasta ($U_1 = 242,75 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$), mientras que el movimiento en la pieza central ocurre en sentido opuesto. Los grandes desplazamientos que sufre la clavija en los estados B) y C) son los correspondientes a la situación de plastificación en la unión, y por lo tanto, a la zona de meseta representada en la Figura 6-21.

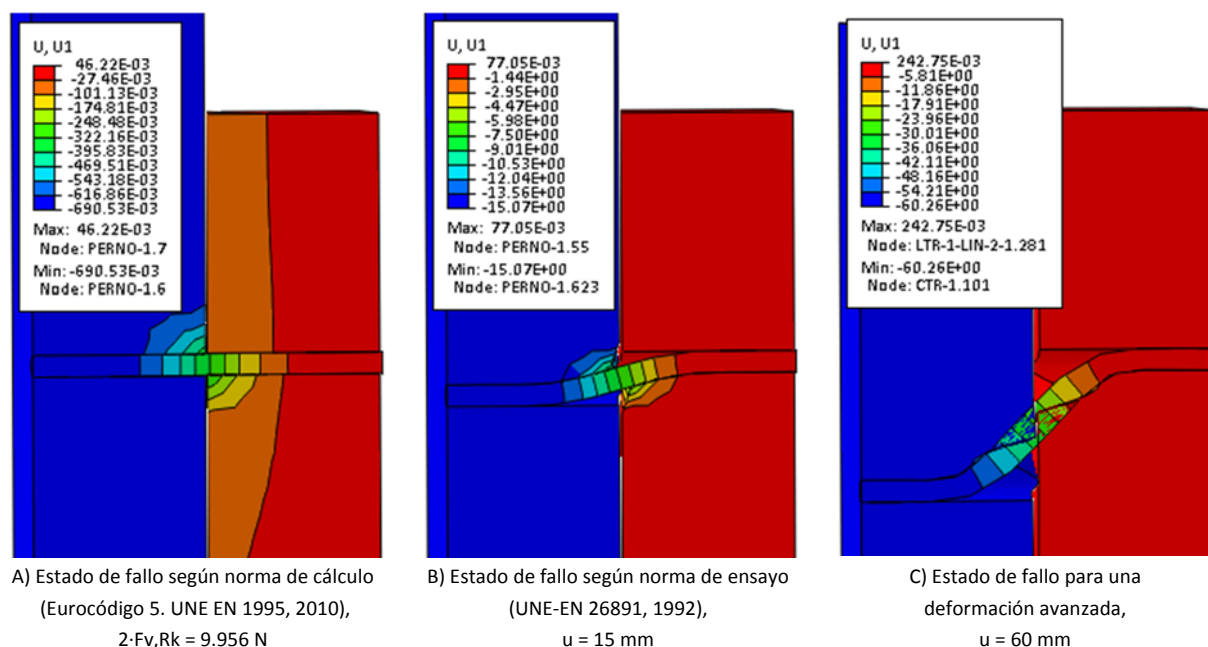


Figura 6-24. Detalle de movimientos de la unión en la dirección del eje "X".

Por su parte, en la Figura 6-25 se detallan los movimientos en la dirección de eje "Y". La pieza de madera lateral de espesor t_1 sufre ligeros desplazamientos en su parte superior ($U_2 = 0,178 \text{ mm}$ para el estado A), desplazándose hacia la pieza central. En cambio, para el caso B) y especialmente el C) el sentido del desplazamiento se invierte pasando

a ser de $U_2 = -2,24 \text{ mm}$ para este último caso en esta misma pieza, provocando la separación de las intercaras de madera.

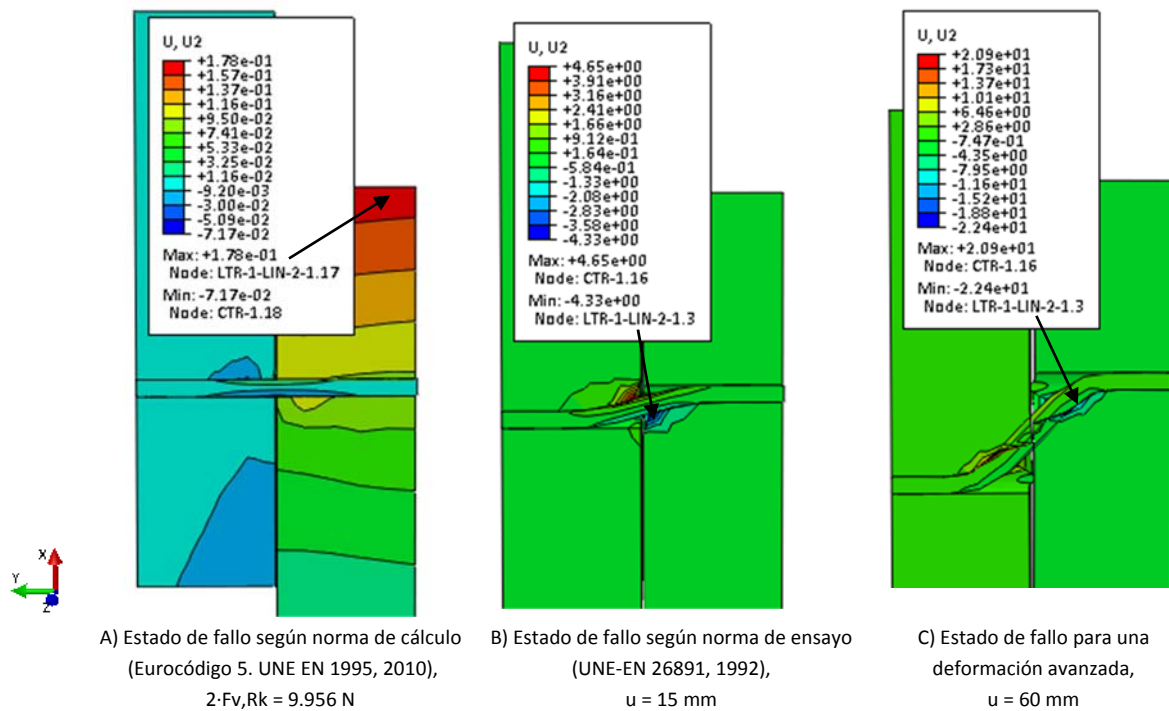


Figura 6-25. Movimientos de la unión en la dirección del eje Y.

6.3.2 Comportamiento de las piezas de madera en el modelo de elementos finitos

El comportamiento de la unión está condicionado por la capacidad de carga en las piezas que la componen. En este apartado se exponen los resultados de tensiones y deformaciones para las piezas de madera, comparándolos con la resistencia característica en tres estados distintos, a medida que se aplica la carga o el deslizamiento en la unión:

- Estado A: según la norma de dimensionado (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).
- Estado B: según el límite máximo de deslizamiento ($u = 15 \text{ mm}$) que es el permitido por la norma de ensayo para uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos (UNE-EN 26891, 1992).
- Estado C: con un deslizamiento ($u = 60 \text{ mm}$) muy avanzado.

Los estados descritos corresponden con desplazamientos progresivos a medida que evoluciona la carga sobre la unión, exponiéndose sólo los resultados para las piezas de madera. Esto permite reflejar con escalas adecuadas las tensiones y las deformaciones, especialmente en el interior de la madera, retirando de la visualización la clavija que, al trabajar con tensiones mucho más altas, condicionaría los valores máximos de escala. Se mantiene el sistema de referencia global, donde el eje "X" coincide con la dirección longitudinal de las fibras de madera (L) y con la dirección de aplicación de la carga ($F_{v,Rk}$); mientras los ejes "Y" y "Z" se asocian con las direcciones tangencial (T) y radial (R) respectivamente, manteniendo a la derecha la pieza lateral de madera de espesor t_1 y a la izquierda la pieza central del espesor t_2 . Todos los resultados corresponden con el modelo simplificado aplicando los planos de simetría.

6.3.2.1 Tensiones en las piezas de madera

Para el análisis de tensiones, se comparan las correspondientes al estado de trabajo de la unión con los valores característicos, recordando que se ha utilizado la clase resistente GL24h para el MEF. Abaqus® define las tensiones normales en la dirección "X" como S11, que se pueden comparar con la resistencia característica a tracción ($f_{t,0,k} = 16,7 \text{ N/mm}^2$) y a compresión ($f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$) para la madera establecida (GL24h). En la Figura 6-26 se puede apreciar que para el estado A las tensiones de compresión ($S11 = -17,45 \text{ N/mm}^2$) no sobrepasan la resistencia característica a compresión ($f_{c,0,k}$), mientras que para los estados B) y C) se alcanzan respectivamente los valores de

$S_{11} = -77,24 \text{ N/mm}^2$ (Zona $S_m 1$) y de $S_{11} = -127,12 \text{ N/mm}^2$, que sí sobrepasan la resistencia característica en compresión. En estos dos últimos casos, hay plastificación en la esquinas de las piezas de madera que están en contacto con la clavija. Por otro lado, hay tensiones de tracción (Zona $S_m 2$) en regiones cercanas a las de compresión. Estas tensiones de tracción se encuentran justo al lado a aquellas zonas donde las tensiones de compresión son más altas. Debe tenerse en cuenta que para la madera GL24h la resistencia a tracción bajo tensión uniaxial en la dirección de la fibra tiene una magnitud inferior que la correspondiente a compresión, $16,5 \text{ N/mm}^2$ con respecto a 24 N/mm^2 . Por tanto, aunque las tensiones que aparecen en tracción son inferiores a las de compresión, pueden significar situaciones más desfavorables.

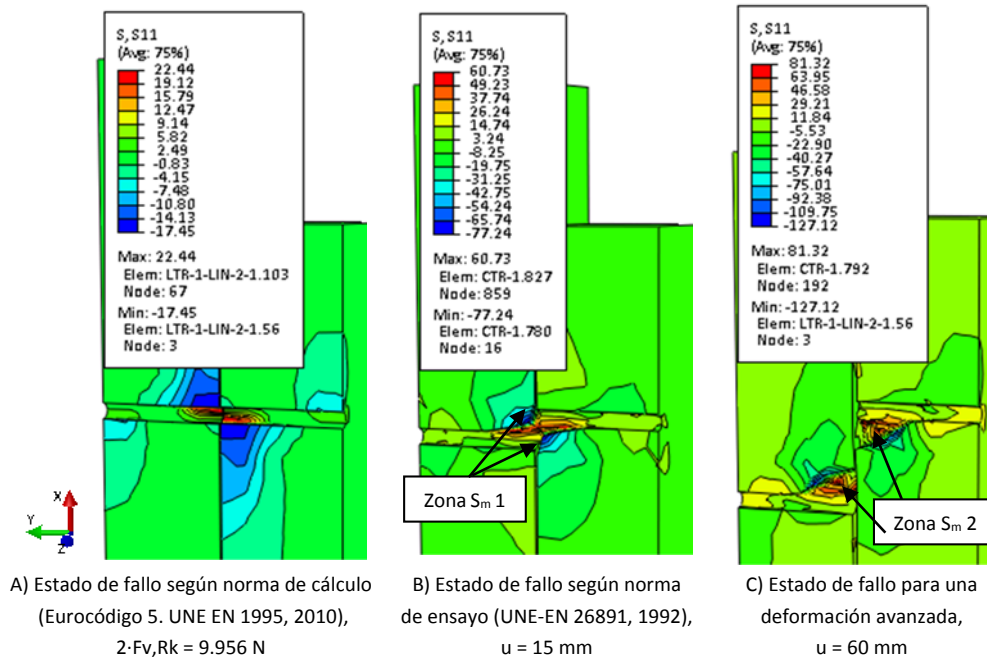


Figura 6-26. Tensión normal en la dirección del eje "X" [S_{11} (N/mm^2)].

Para estudiar con más detalle las tensiones normales en dirección del eje "X", en la Figura 6-27 se muestra únicamente la pieza de madera central. En el estado A) las tensiones de compresión en la zona situada por encima de la clavija tienen un valor de $S_{11} = -17,42 \text{ N/mm}^2$ y no presentan grandes gradientes, mientras que para los estados B) y C) donde ya se ha formado la rótula, existen grandes variaciones entre la zona plastificada y las zonas de la madera justo por encima de la misma, estando las curvas que indican los diferentes niveles de tensión muy próximas entre ellas. Por otro lado, en el estado B) , por debajo de la clavija (Zona $S_m 3$), aparece una zona con bajos valores de tensión de tracción ($S_{11} = 3,24 \text{ N/mm}^2$) debido a que las fibras todavía puedan transmitir esfuerzo a esas regiones, mientras que en el estado C) esto no ocurre, seguramente porque la madera que antes transmitían esfuerzos de tracción ha sufrido grandes plastificaciones y ya no puede llevar estados tensionales a esta zona $S_m 3$; en la práctica es equivalente a una situación de rotura en las fibras para el estado real de trabajo. Además, aparecen zonas expuestas a compresión a los lados de la clavija (Zona $S_m 4$), cuando la clavija se ha desplazado más en la zona plastificada de la madera.

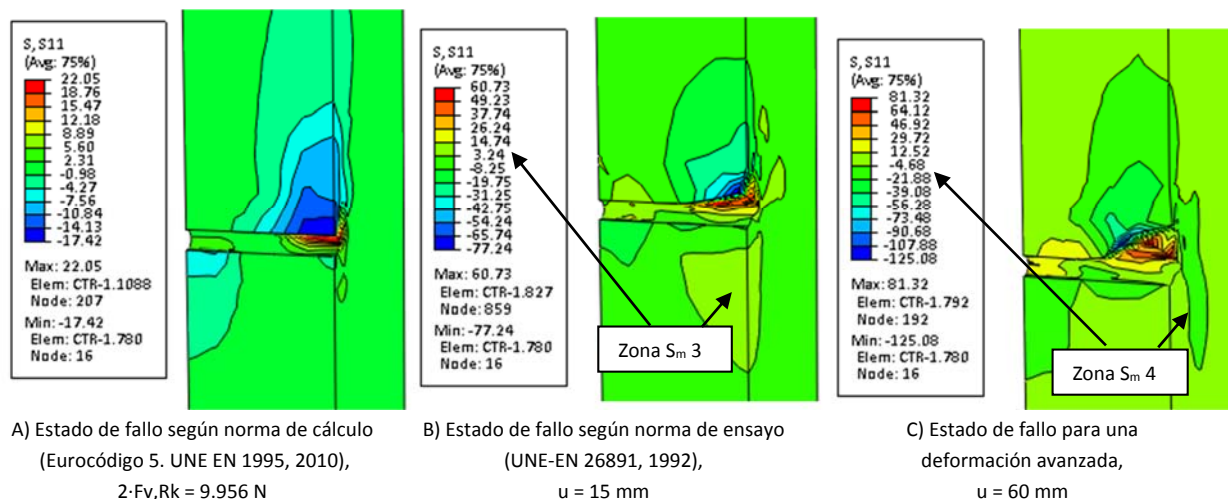


Figura 6-27. Tensión normal en la dirección del eje "X" [S11 (N/mm²)] para la pieza central.

También se puede apreciar cómo la Zona S_{m1}, expuesta a altos valores en la tensión de compresión, avanza hacia el interior del agujero a medida que la clavija tiene un ángulo de giro mayor. En la Figura 6-28 se amplía un detalle de la pieza de madera central (de espesor t₂) en el estado C). Cuando el desplazamiento ha llegado a un valor de 60 mm, ya ha habido procesos de tracción (Zona S_{m2}) con grandes plastificaciones en la madera donde la clavija ha tenido mayores movimientos y la madera sufre relajaciones, mientras que allí donde la clavija comienza a generar plastificaciones por el incremento del ángulo de giro en la clavija (θ) las tensiones de compresión pueden ser mayores. Por otra lado, se identifican tensiones de tracción (S11 = 12,52 N/mm²) en la Zona S_{m5}, como consecuencia del proceso de flexión en la clavija.

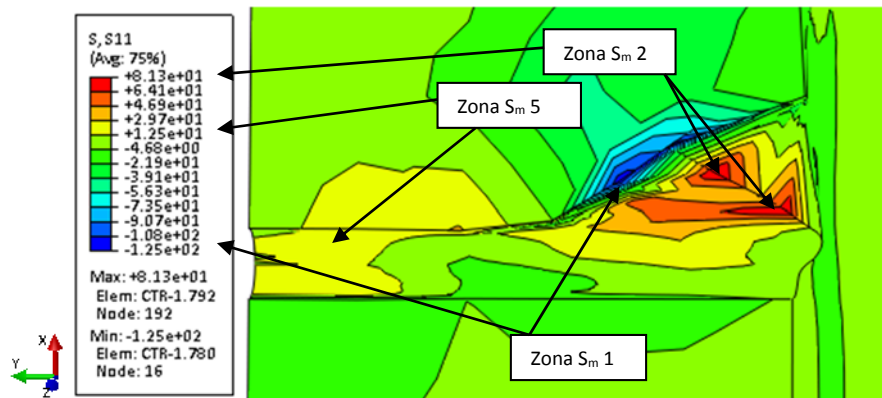


Figura 6-28. Tensiones normales en dirección de la fibra [S11 (N/mm²)] para un deslizamiento u=60 mm.

Las tensiones normales en dirección "Y" son definidas en Abaqus® con la variable S22, y se pueden comparar con la resistencia característica en dirección perpendicular a la fibra en tracción ($f_{t,90,k}=0,4$ N/mm²) y en compresión ($f_{c,90,k}=2,7$ N/mm²). Estos valores también sobrepasan las tensiones características en compresión ($f_{c,90,k}$) para el estado B), con magnitudes de S22 = 12,92 N/mm² y para el estado C), donde alcanzan valores mayores (S22 = 18,28 N/mm²); lo cual provoca que las fibras se desplacen en esta dirección (Zona S_{m6}), junto a que aparezcan plastificaciones que están relacionadas con las fuerzas que provocan movimientos de separación en las intercaras de madera en esta dirección (U2), como se puede apreciar en la Figura 6-18. Por su parte, las tensiones de tracción se mantienen en valores relativamente bajos, pero, debido a la baja resistencia del material bajo este tipo de esfuerzos, son suficientes como para que den lugar a plastificaciones.

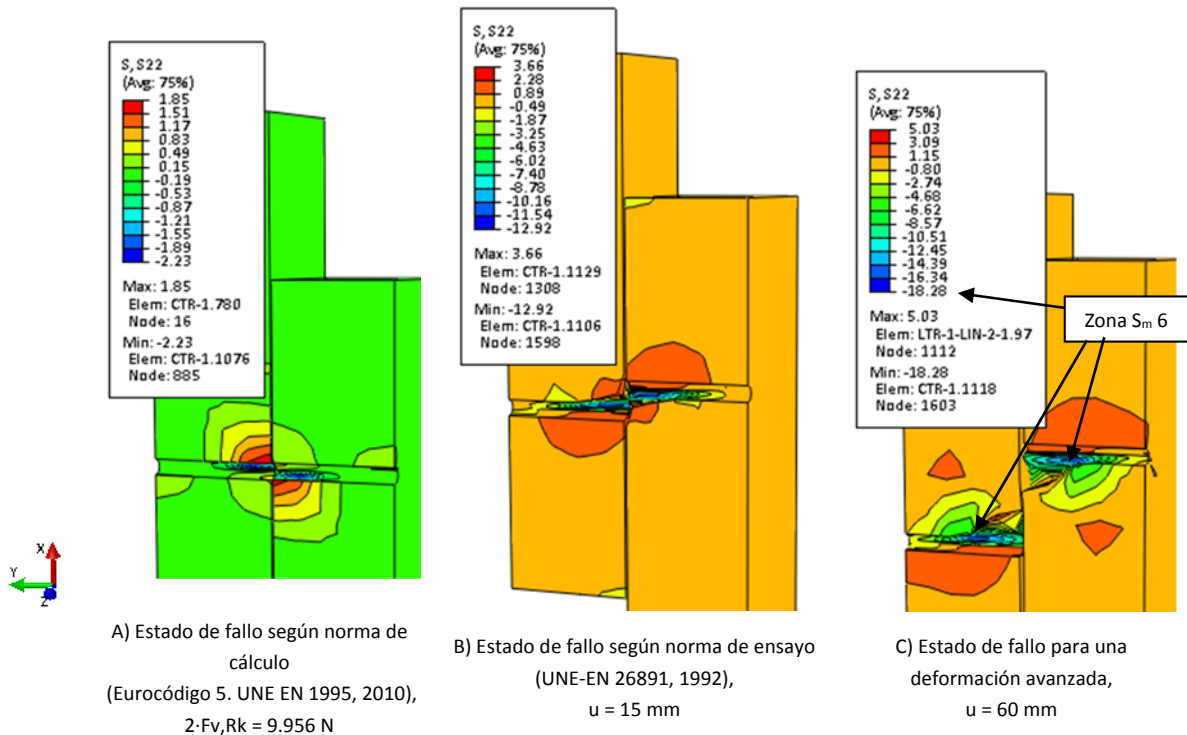


Figura 6-29. Tensiones normales perpendiculares a las fibras de madera [S22 (N/mm²)].

Para estudiar con más detalle las tensiones en el plano perpendicular al eje del agujero correspondiente a las intercaras de las piezas de madera, se muestra solo la pieza de madera central (Figura 6-30). Para el estado A) la sección transversal tiene tensiones $S_{22} = 1,85 \text{ N/mm}^2$ que sobrepasan la resistencia característica de tracción ($f_{t,90,k}$) y por lo tanto provocan la separación de las fibras en regiones muy cercanas (Zona S_{m7}), existiendo una inversión de sentidos que parece estar relacionada con el flujo que se requiere al material para ocupar el espacio desplazado, de forma similar a lo que ocurría en la Zona S_{m6} , cuando se presentaban tensiones de tracción en zonas cercanas a las de compresión máximas. En cualquier caso, afecta a regiones y magnitudes muy pequeñas, por lo que no son relevantes para el trabajo que puede recoger el conjunto de la unión.

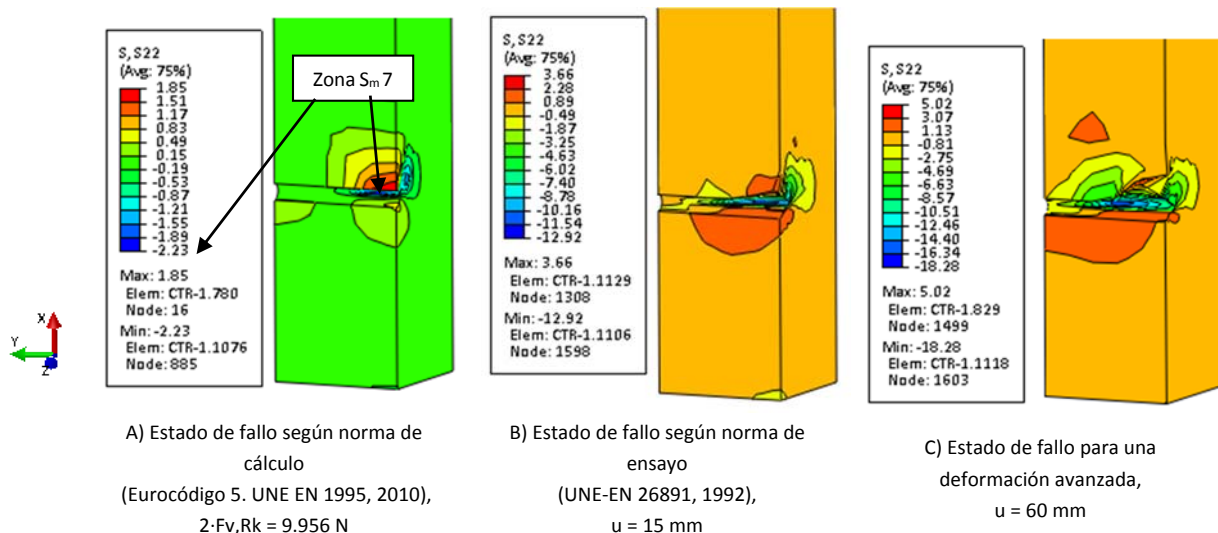


Figura 6-30. Tensiones normales en dirección perpendicular a las fibras de madera [S22 (N/mm²)] para la pieza central.

Las tensiones perpendiculares en la dirección del eje "Z", y la dirección radial (R) en la que se ha dispuesto la madera, también están relacionadas con las resistencia características $f_{t,90,k}$ y $f_{c,90,k}$. Según establece Abaqus® responden a la notación S33 y se muestran en la Figura 6-31. Estas tensiones son las principales responsables de efectos de hienda

(véase Apartado 2.7.7), por lo que se centra el estudio en una de las piezas de la madera, la central, en la esquina de la madera cercana a la zona de contacto con la clavija, donde se dan las tensiones de tracción que pueden iniciar la propagación de las grietas ($S_{33} = 1,83 \text{ N/mm}^2$), como puede apreciarse en el estado A). A medida que aumenta el deslizamiento, en los estados B) y C) los efectos de tracción se generalizan; llegando a aumentar también por debajo del agujero (Zona $S_m 7$), con valores de $S_{33} = 3,07 \text{ N/mm}^2$, a medida que avanzan las rótulas de plastificación en la clavija y provocan que aumente la probabilidad de la aparición de la hienda ante el avance relativo de la clavija que va plastificando la madera.

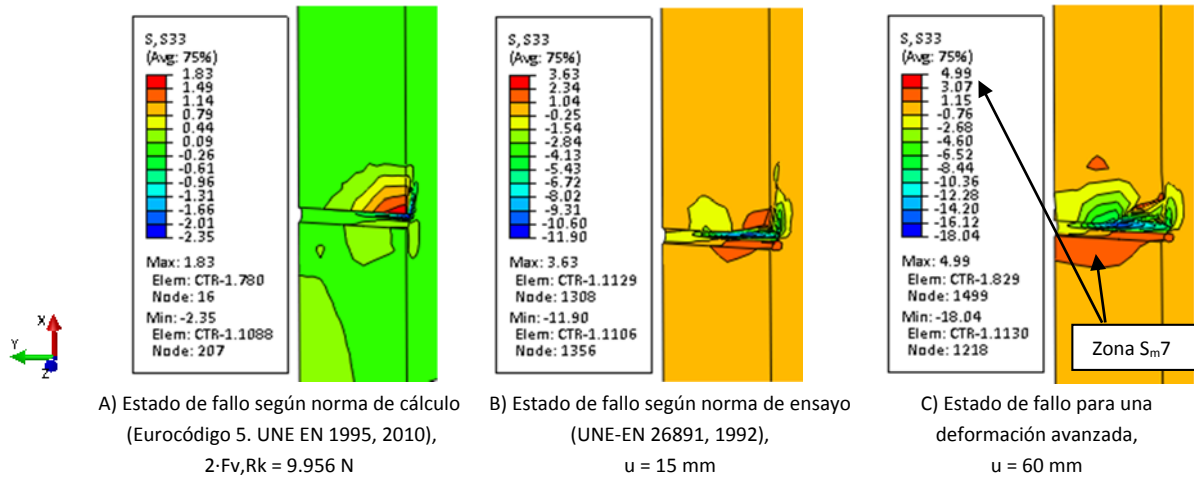


Figura 6-31. Tensiones normales en dirección radial [S_{33} (N/mm^2)] para la pieza central.

La resistencia característica a cortante para la madera GL24h vale $f_{v,k} = 3 \text{ N/mm}^2$, comparándose con ella las tensiones de trabajo S_{12} , S_{13} y S_{23} según la notación de Abaqus®. La Figura 6-32 presenta los resultados de estas tensiones cortantes para la pieza de madera central. Se puede apreciar cómo estas tensiones cortantes son especialmente elevadas en el estado C) para el caso de $S_{23} = 28,62 \text{ N/mm}^2$ y se desarrollan en zonas muy pequeñas de la superficie de contacto entre madera y clavija (Zona $S_m 8$).

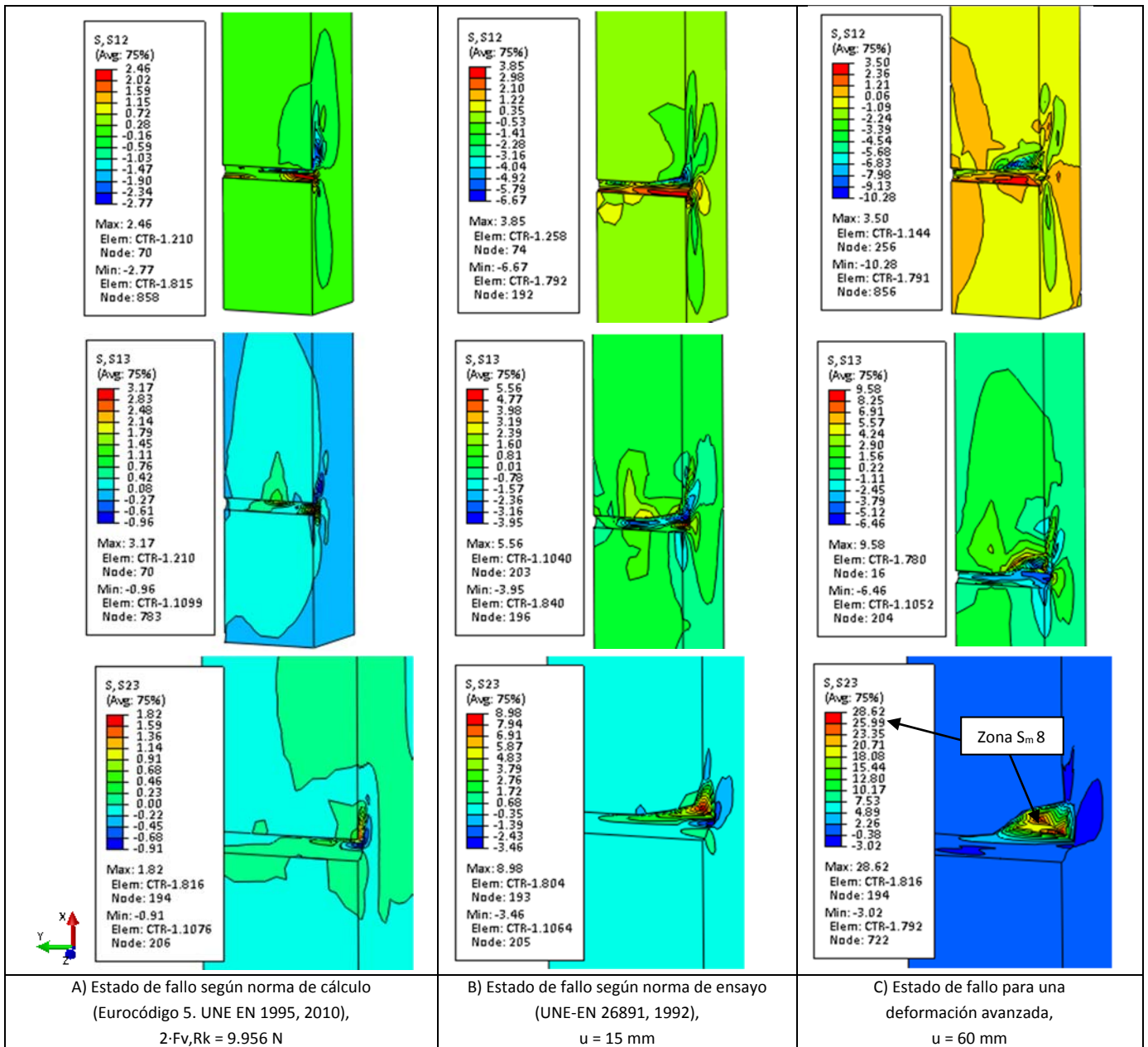


Figura 6-32. Tensiones cortantes para la pieza de madera central: S12, S13 y S23, en N/mm².

6.3.2.2 Deformaciones en las piezas de madera

Este apartado expone el estudio de las deformaciones en las distintas piezas de madera que componen la unión, centrando el análisis las deformaciones plásticas para los estados de fallo descritos anteriormente. Abaqus® utiliza las variables etiquetadas como “SDV” para mostrar los resultados de la subrutina utilizada para modelar el comportamiento de la madera según se describió en el Apartado 4.4.3. Las deformaciones longitudinales plásticas para la madera en dirección “X” quedan definidas en Abaqus® con la variable la variable SDV7, y dan lugar a las distribuciones mostradas en la Figura 6-33. Se puede apreciar cómo en el estado A) la madera presenta deformaciones plásticas pequeñas ($SDV7 = -2,9 \cdot 10^2$), a diferencia de las hipótesis tratadas en la norma de dimensionado (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010). A medida que evoluciona el deslizamiento, con los modos de fallo B) y C) se aprecia que la huella de la deformación de la clavija va aumentando. En el estado A) la madera ya presenta ligeras plastificaciones en las zonas del agujero en contacto con la clavija, que van aumentando desde $SDV7 = 6,42 \cdot 10^{-1}$ en el estado B) hasta $SDV7 = -1,22$ en el estado C).

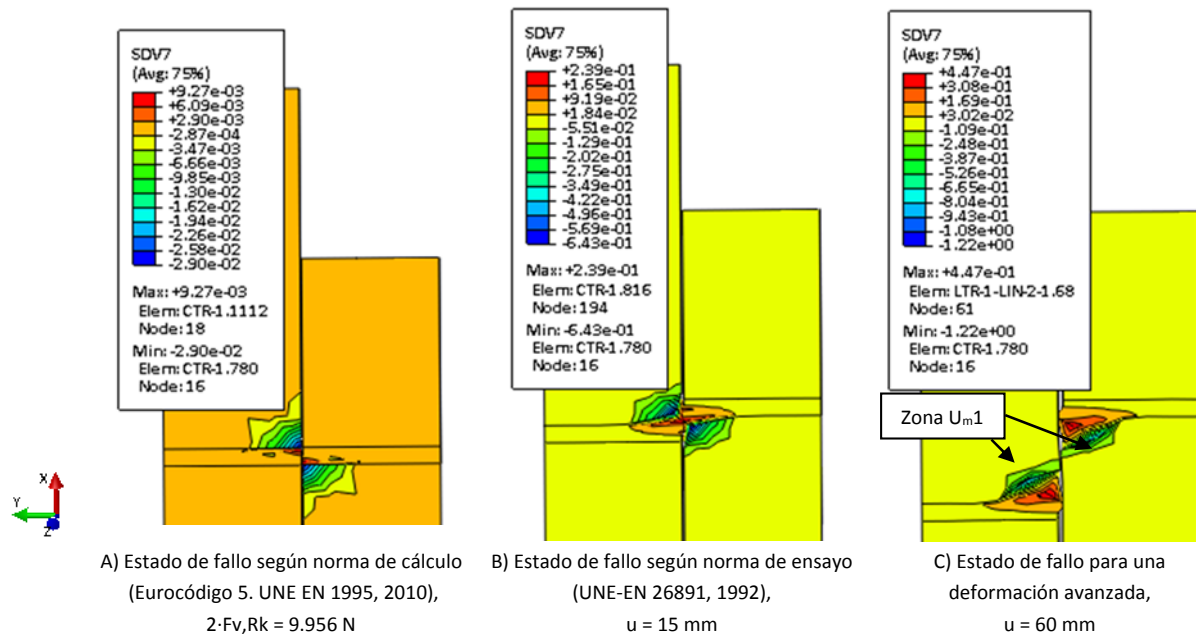


Figura 6-33. Deformaciones plásticas longitudinales en la dirección de eje "X" para la madera (SDV7).

Para el estado A) indicado en la norma de cálculo (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), donde la carga tiene un valor de $2 \cdot F_{v,Rk} = 9.956 \text{ N}$ los resultados de la Figura 6-33 muestran que debe estar del lado de la seguridad, porque la clavija no ha desarrollado rótulas plásticas, aunque la madera ha plastificado ligeramente. Mientras, el estado de fallo B) que se corresponde con la norma de ensayo (UNE-EN 26891, 1992) con un deslizamiento ($u = 15 \text{ mm}$) las plastificaciones ya se muestran más definidas.

En la Zona U_{m1} indicada en Figura 6-33, se pueden observar las zonas de deformaciones plásticas relacionadas con la anchura de aplastamiento interior en la pieza lateral (b_1) y en la pieza central (b_2). Al observar las mismas, se puede apreciar que son iguales, ratificando la relación $\beta = 1$. Además, tanto el ancho como el ángulo aumentan de forma significativa al pasar de un deslizamiento $u = 15 \text{ mm}$ hasta $u = 60 \text{ mm}$. Estas figuras permiten establecer una relación de proporcionalidad entre el ancho de las piezas de madera (t_1 y t_2) y su ancho de aplastamiento (b_1 y b_2) cuya medición resultaría complicada de realizar en los comprocesos experimentales. Al calcularse con estas relaciones de proporcionalidad se obtienen valores de $b_1 = 34 \text{ mm}$, frente al valor obtenido a partir de las hipótesis simplificadas de Johansen, las cuales se desarrollaron en el Aparato 2.7.3, y que darían un valor de $b_1 = 25 \text{ mm}$. Estas diferencias se deben a que el cálculo del ancho (b_1) se está haciendo con la aproximación que supone el método de los elementos finitos y en el espacio tridimensional sobre la intersección del plano de simetría con la generatriz superior de la clavija, lo que resulta una situación defavorable frente a los valores medios de la hipótesis de laja plana contemplada en la aproximación de Johansen.

Por su parte, la Figura 6-34 refleja las deformaciones plásticas longitudinales para la madera en la dirección del eje "Y" perpendiculares a la dirección de la fibra (SDV8). Las deformaciones plásticas se dan en las mismas regiones cercanas a las esquinas que las SDV7, pero también se puede apreciar cómo evolucionan a lo largo de la longitud del agujero para la clavija y toman valores de compresión en los flancos porque, a medida que la clavija incrementa su deformación, la madera se ve obligada a desplazarse bajo su empuje, lo que supone plastificaciones de compresión (SDV8), con valores de $-2,41 \cdot 10^{-2}$, $-3,91 \cdot 10^{-1}$ y $-6,77 \cdot 10^{-1}$ para los estados A), B) y C) respectivamente.

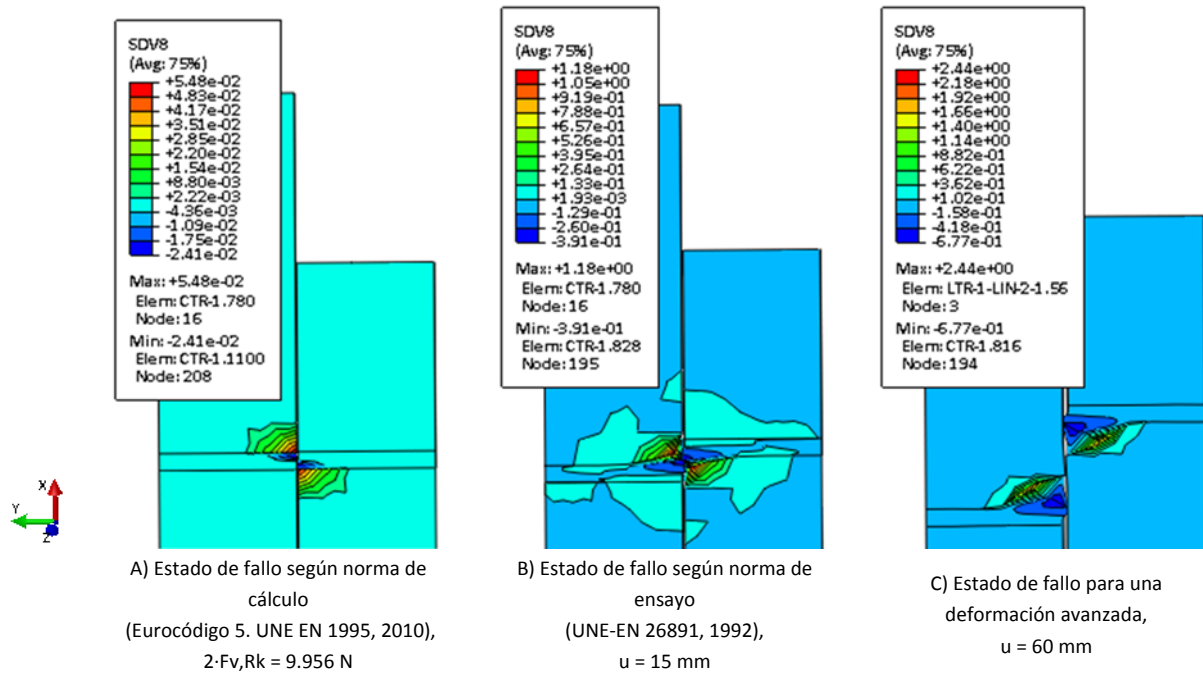


Figura 6-34. Deformaciones plásticas longitudinales en la dirección "Y" para la madera (SDV8).

Finalmente, en la Figura 6-35 se expone la deformación longitudinal por plastificación de la madera en la dirección "Z", definida en Abaqus® con la variable SDV9. Se pueden identificar regiones de plastificación negativa (Zona U_{m2}), relacionadas con las tensiones de compresión para el estado de fallo C) en el segmento del agujero para la clavija ubicado en el tramo entre las dos rótulas ($SDV9 = -7,2 \cdot 10^{-2}$) y que están asociadas con los movimientos de separación entre las intercaras de madera descritos en la Figura 6-24.

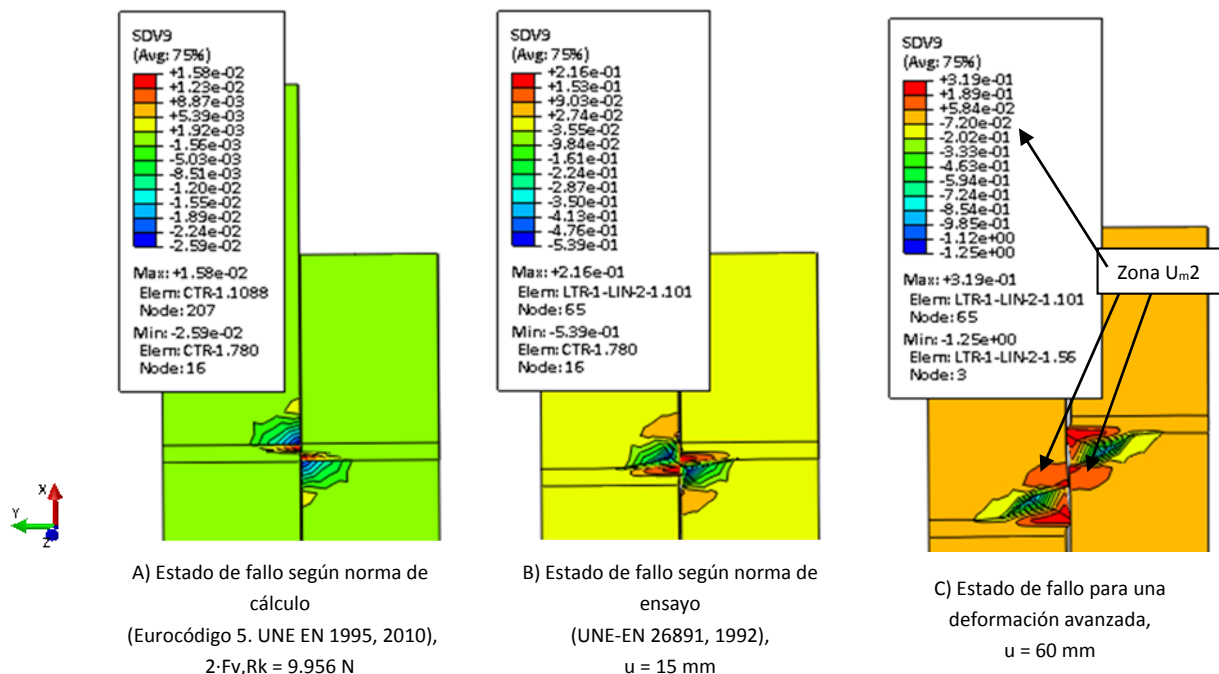


Figura 6-35. Deformaciones plásticas longitudinales en la dirección "Z" para la madera (SDV9).

Las deformaciones angulares plásticas asociadas a la plastificación de la madera γ_{xy} , γ_{yz} y γ_{zx} se describen en la Figura 6-36 con las variables SDV10, SDV10 y SDV12. Al igual que en los casos anteriores, las deformaciones angulares plásticas más altas se dan en las esquinas de la madera, ya que como se vio en la Figura 6-32, en los estados B) y C), en estas zonas, las tensiones tangenciales superan ampliamente las capacidades resistivas de la madera ante este tipo de esfuerzos.

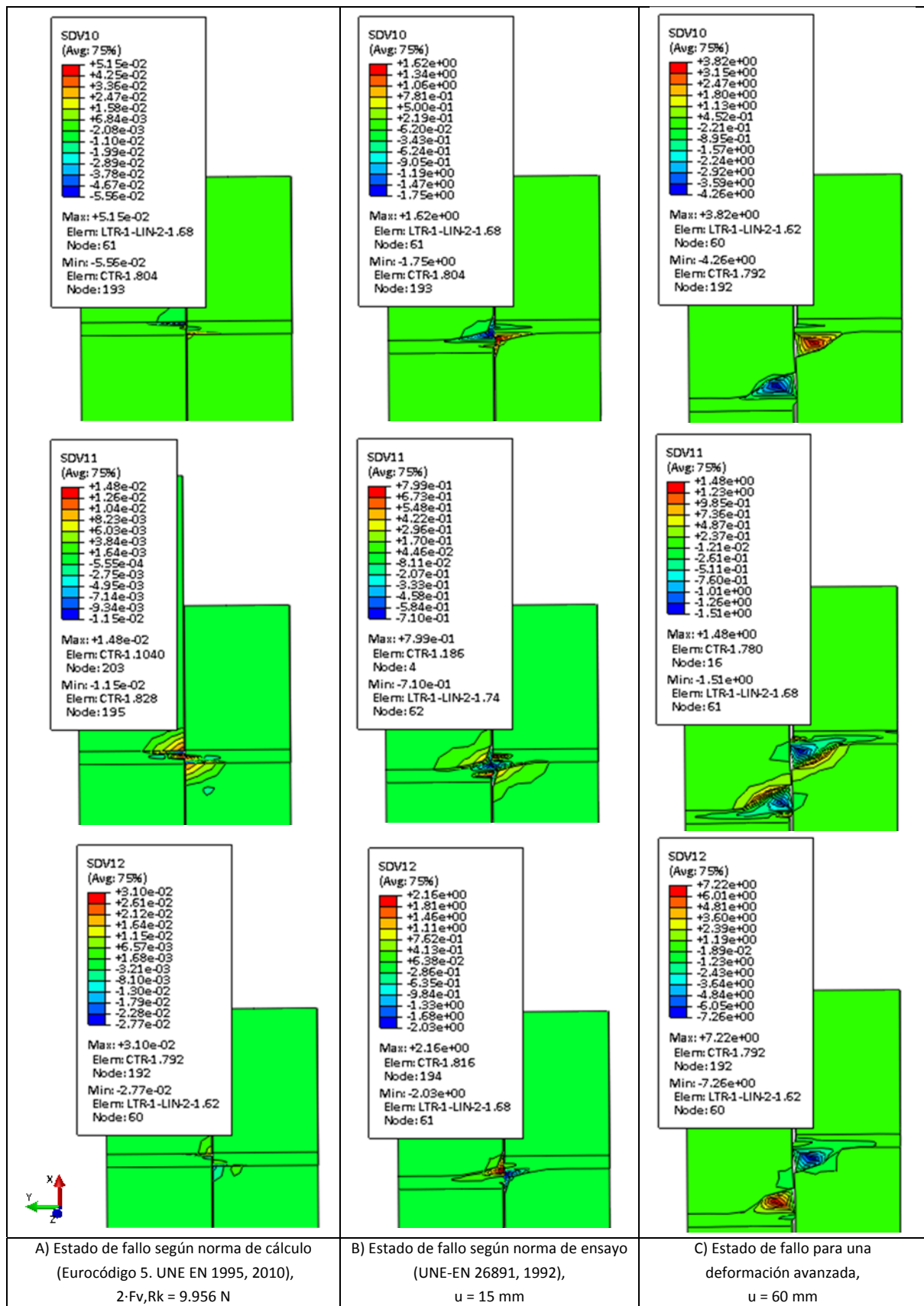


Figura 6-36. Deformaciones plásticas angulares en la madera (SDV10, SDV11 y SDV12).

6.3.3 Comportamiento de la clavija en el modelo de elementos finitos

En este apartado se estudian los resultados de tensiones en la clavija y las deformaciones que tienen lugar en ella. Como en el caso de la madera, se muestran los resultados para tres estados distintos a medida que se incrementa la carga o el deslizamiento en la unión:

- Estado A: según la norma de dimensionado (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).
- Estado B: según el límite máximo de deslizamiento ($u = 15$ mm) permitido por la norma de ensayo para uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos (UNE-EN 26891, 1992).
- Estado C: con un deslizamiento ($u = 60$ mm) muy avanzado.

En ese apartado se mostrarán únicamente los resultados de la clavija, ocultando las piezas de madera, para de esta manera poder trabajar con escalas que se ajusten a un rango más adecuado a las tensiones y deformaciones que afectan al acero. Las excepciones son las Figura 6-37 y Figura 6-42, donde sí se visualizarán las piezas de madera. Se mantiene el sistema de referencia global utilizado previamente; donde el eje "X" coincide con la dirección longitudinal de las fibras de madera (L) y con la dirección de aplicación de la carga ($F_{v,Rk}$), mientras que el eje "Y" se asocia con la dirección del eje longitudinal de la clavija (en su configuración sin deformar) y el eje "Z" es perpendicular a los dos anteriores en sentido *dextrosum*.

6.3.3.1 Tensiones en la clavija

La Figura 6-37 muestra los resultados de tensiones normales para la clavija en la dirección del eje "Y" S22, cuando se produce un deslizamiento ($u = 15$ mm) en la pieza central de madera según el estado B). Se identifican dos secciones en la clavija de tensiones máximas, una a la izquierda dentro de la pieza de madera de espesor t_2 y otra la derecha en la pieza lateral de madera de espesor t_1 .

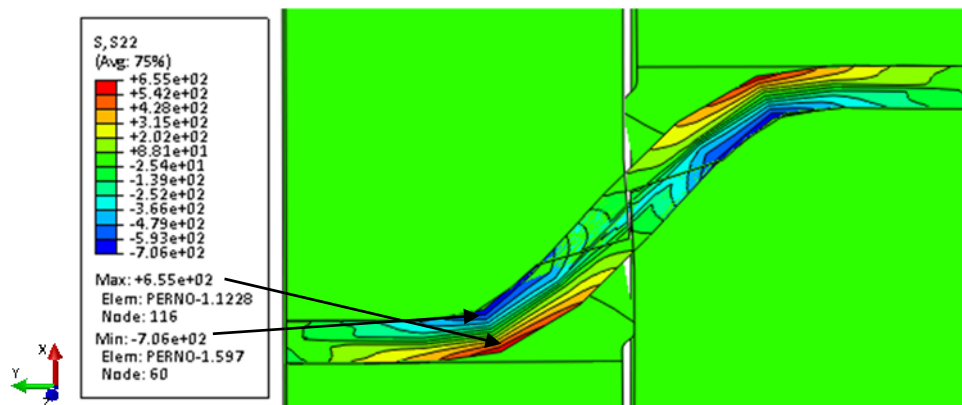


Figura 6-37. Tensiones normales para la clavija en la dirección del eje "Y" con deslizamiento $u = 15$ mm, en N/mm^2 .

Aunque estas tensiones son muy parecidas en ambas secciones, resultan ligeramente mayores la rótula alojada en la madera de la pieza central, lo cual indica que esta rótula es la primera en formarse según un modo de fallo 3. Las holguras entre el agujero de la madera y las clavija facilitan que, en los estados de consolidación inicial, la clavija forme la rótula en la pieza central de madera, con un efecto parecido al que se crea en las cizallas cuando trabajan en cortante. En consecuencia, la diferencia de las tensiones en la sección que corresponde a la rótula alojada en la pieza central están relacionadas con este efecto. Cuando los extremos laterales de la clavija entran en contacto con la madera, se limita su movimiento vertical y comienza el desarrollo de la rótula alojada en la pieza lateral de madera, disponiendo de más espacio para la formación de la misma, lo que provoca que el ancho de aplastamiento en la pieza lateral (b_1) pueda ser mayor. Dado que la posibilidad de movimiento libre (en la dirección del eje "X") para los extremos de la clavija es prácticamente nula, la diferencia en tensiones en ambas rótulas también es prácticamente despreciable. Este comportamiento se puede apreciar también en los ensayos. En la probeta P136 las rótulas alojadas en pieza central de madera son más nítidas y el ancho de aplastamiento en la pieza lateral (b_1) es

ligeramente mayor (Figura 6-22). Por otro lado, el tramo inicial de la curva de carga frente a deslizamiento se ha desplazado más hacia la derecha (Figura 6-21), lo que también indica holguras y asentamientos iniciales mayores.

Para analizar la evolución de la clavija, se consideran sus resistencias características que, para el acero de clase S275 según normas (UNE-EN 10025-2, 2006) y (Eurocódigo 3. UNE EN 1993-1, 2013) suponen un límite elástico $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$ y un valor de límite último $f_u = 410 \text{ N/mm}^2$, con los que se comparan las tensiones S22 en la Figura 6-38. Se han hecho pruebas en el MEF aumentando los valores de las resistencias características (f_y y f_u), porque los ensayos de tracción simple realizados sobre probetas del mismo acero que luego se ha utilizado para fabricar las clavijas (véase Apartado 3.5.4) han dado lugar a valores mayores que las resistencias características indicadas en las normas. El incremento de estos valores no ha supuesto modificaciones significativas en la capacidad resistente de la unión, motivo por el cual han respetado las resistencias características indicadas en la norma (UNE-EN 10025-2, 2006), considerando en todo caso que la modelización numérica debe estar del lado de la seguridad. Para el estado A) no se sobrepasan las resistencias características del límite elástico, mientras que para los estados B) y C), con deslizamientos en la unión de 15 y 60 mm respectivamente, sí que se han producido plastificaciones, ya que se ha sobrepasado el límite elástico, alcanzándose valores de tensión $S22 = 706,19 \text{ N/mm}^2$ en compresión para el estado C). Las mayores tensiones de tracción se dan en la Zona S_a1 correspondiente al nodo 60, con un valor de $S22 = 226,94 \text{ N/mm}^2$ en el estado A). La posición más tensionada se mantiene al aumentar el nivel de sollicitaciones en el mismo nodo 60 (como ya se apreciaba en Figura 6-37) que se corresponde a la posición de la rótula de la clavija situada en la pieza central de madera. La segunda zona de mayor tensión se corresponde con la posición de la segunda rótula que, para el caso estudiado, con un comportamiento propio del modo de fallo tres, aparece en la zona de la clavija situada en la pieza lateral de madera. Las diferencias de tensiones entre estas dos posiciones, que se corresponden a donde aparecen los mayores momentos flectores en la clavija, no son muy grandes. La pequeña diferencia entre estos valores de tensiones se relaciona con que ambas rótulas plásticas aparezcan de forma casi simultánea. La variación en el nivel de tensiones para cada uno de los tres estados estudiados se puede observar en la Figura 6-38.

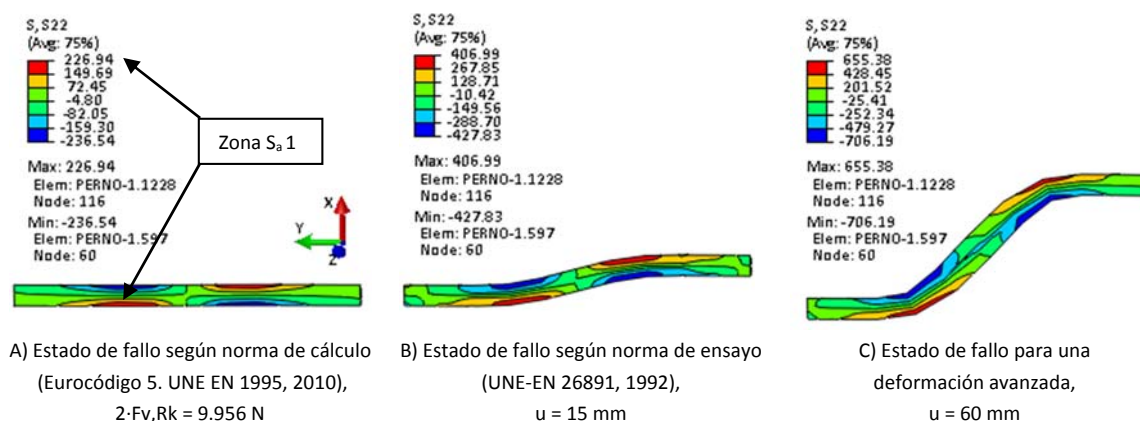


Figura 6-38. Tensiones normales en la dirección de eje "Y", [S22 (N/mm²)].

La Figura 6-39 refleja cómo las tensiones de compresión en la dirección del eje "X" (denotadas en Abaqus® como S11) no sobrepasan la resistencia característica de límite elástico del acero, salvo para los estados de deslizamiento muy grandes ($u=60 \text{ mm}$). En este caso la zona mas tensionada es la denominada S_a3 , con tensiones normales de compresión que alcanzan el valor $S11 = -325 \text{ N/mm}^2$. Si las rótulas aún no se han generado, las tensiones de compresión máximas se dan en la superficie de contacto con las esquinas de las piezas de madera (Zona S_a2), con valores relacionados con las tensiones de aplastamiento de la madera.

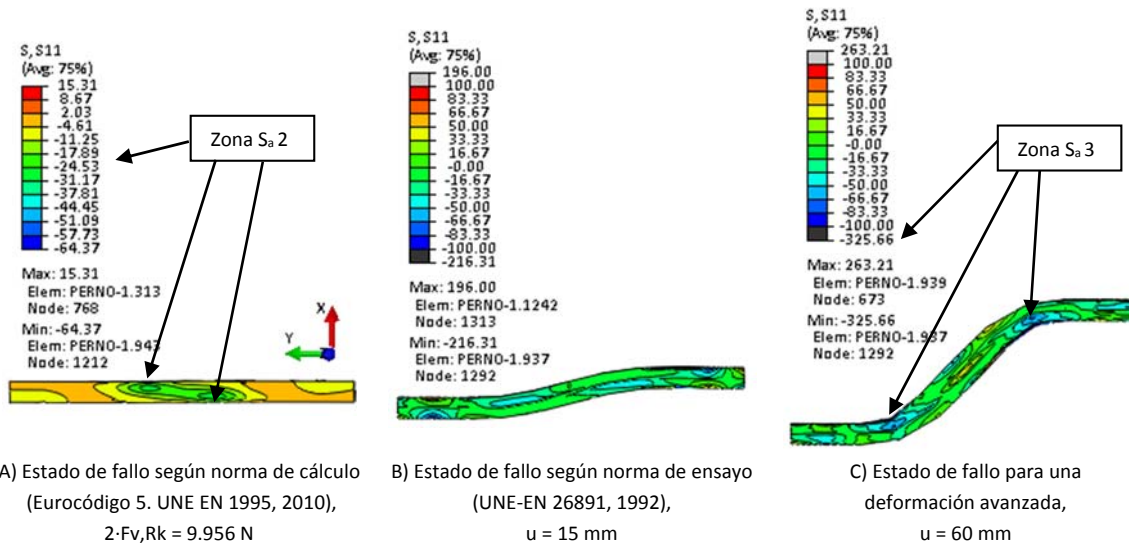


Figura 6-39. Tensiones normales en dirección del eje "X", [S11 (N/mm²)].

La Figura 6-40 representa las tensiones normales en dirección del eje "Z", (denotadas en Abaqus® como S33). Sus valores máximos no alcanzan las resistencias de límite elástico, y se dan especialmente en las zonas de compresión correspondientes a las rótulas plásticas.

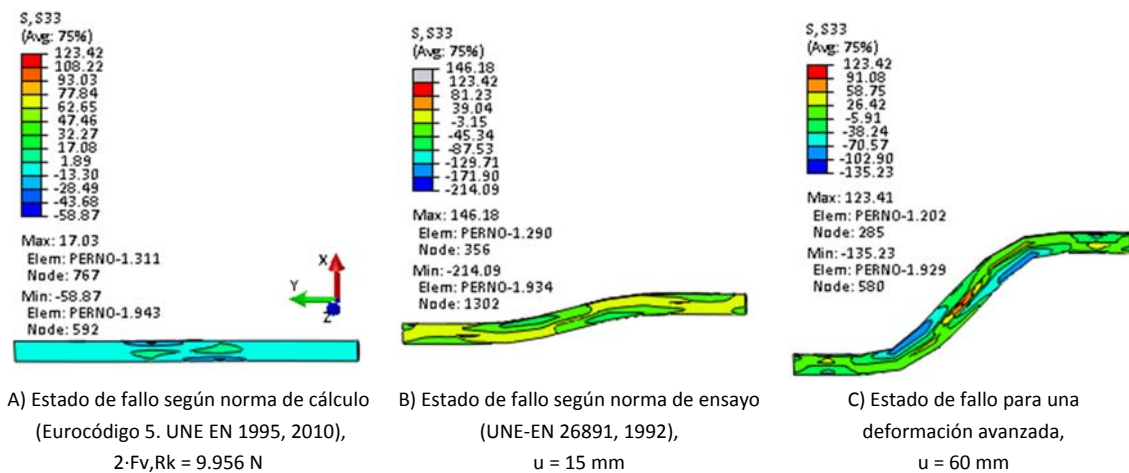


Figura 6-40. Tensiones normales en la dirección de eje "Y", [S33 (N/mm²)].

Para disponer de una resistencia con la que comparar las tensiones cortantes (τ_{xy}) (designadas S12 en la notación de Abaqus®) a partir de la conocida frente a tensiones normales, se tomó como valor de resistencia característica en cortante $f_t = f_y / \sqrt{3}$, lo que supone un valor igual a $158,77 \text{ N/mm}^2$. Bajo este criterio, tal como se puede observar en la Figura 6-41, la clavija supera los límites de resistencia a cortante para los tres estados de fallo. También se pueden identificar las tensiones cortantes que tienen lugar como consecuencia de la flexión, que alcanzan valores máximos en la fibra neutra (Zona S_a 4), especialmente en los tramos donde estos presentan valores elevados, cerca de las rótulas.

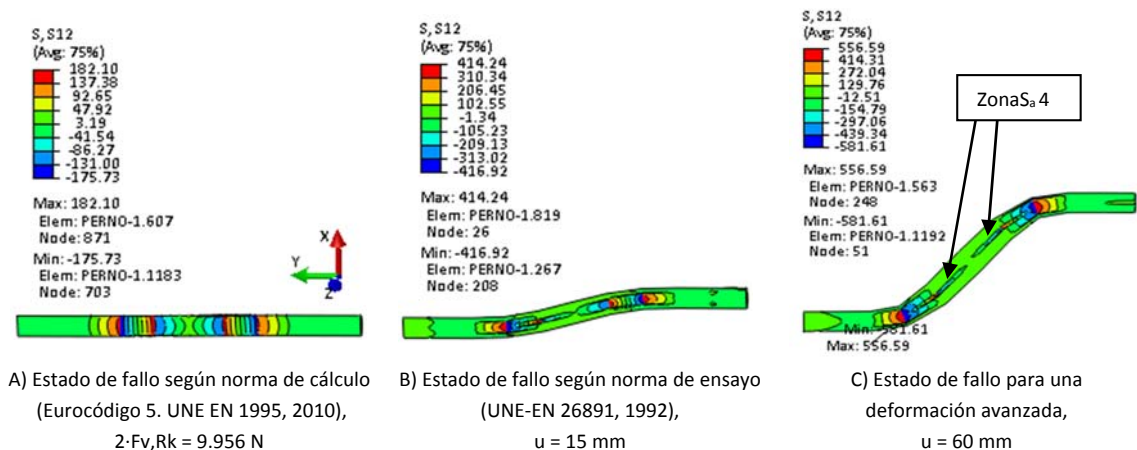


Figura 6-41. Tensiones cortantes en la clavija [S12 (N/mm²)].

Con el objetivo de calcular las anchuras de aplastamiento interior en las piezas de madera (b_1 y b_2), es interesante definir las secciones de transición entre las tensiones cortantes (S12) positivas y negativas porque están relacionadas con las pendientes de los momentos flectores. Los valores máximos y/o mínimos de éstos han sido utilizados por Johansen para proponer las ecuaciones de equilibrio que se establecen en la clavija (véase Apartado 2.7.3) y que permiten determinar las anchuras de aplastamiento en la madera, que luego dan lugar a la resistencia de la unión. En la Figura 6-42 se muestran los tres estados de fallo con sus correspondientes esfuerzos cortantes. El estado A) presenta varios cambios de signo de las tensiones cortantes de la clavija en los tramos de la misma correspondientes a cada una de las dos piezas de madera, lo que dificulta establecer los máximos y mínimos absolutos. Una vez formadas las rótulas en los estados B) y C), el cambio en el signo de las tensiones cortantes se produce de una forma más nítida a uno y otro lado de las líneas AA' y BB', con lo cual la intersección de estas líneas con el eje de la clavija indica los puntos de momentos flectores máximos o mínimos y el lugar de formación de las rótulas plásticas para los distintos valores de deslizamiento (u). Una vez plastificada la clavija, se puede apreciar la variación del ángulo y las zonas de aplastamiento. Con pequeños deslizamientos, el ángulo de giro en la clavija (θ) y el ancho total de aplastamiento (b_1+b_2) tienen valores reducidos, y estas últimas se encuentran cercanas a la intercara entre las piezas de madera. Al aumentar el nivel de deslizamiento, también aumentan las anchuras de plastificación de la madera (b_1 y b_2), comenzando a aparecer en secciones muy cercanas a la posiciones de las rótulas, como defiende el modelo simplificado propuesto por Johansen.

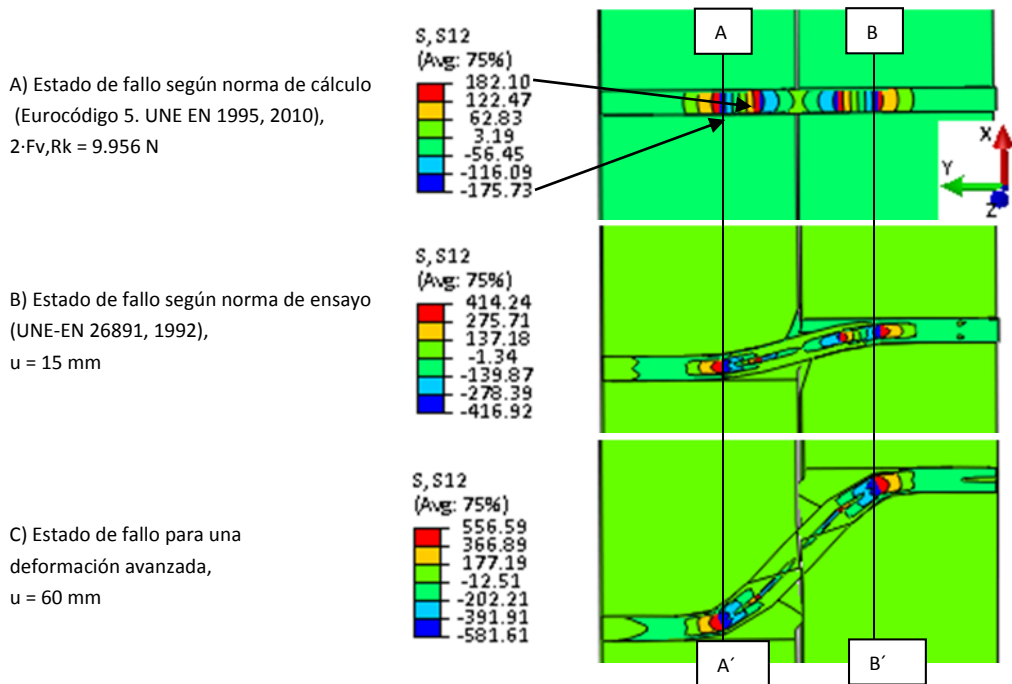


Figura 6-42. Situación de las rótulas plásticas en la clavija en relación con la zona de cambio de signos en la tensión cortante.

Las tensiones cortantes S13 y S23 son pequeñas frente a las cortantes S12. En la sección de plano de simetría de la unión (perpendicular al eje Z) las tensiones S13 son prácticamente inexistentes, mientras que al voltear la clavija y analizar la superficie de contacto entre la clavija y la madera (Figura 6-43) se identifican zonas con tensiones cortantes más altas, especialmente en el estado C) donde llegan a valores $S_{13} = 73 \text{ N/mm}^2$ (frente a los 581 N/mm^2 vistos para la tensión cortante S12). Estas tensiones parecen estar asociadas al contacto con la madera y pueden ser orientativas en el caso de estudiar los efectos de la fricción entre la clavija de acero y la madera.

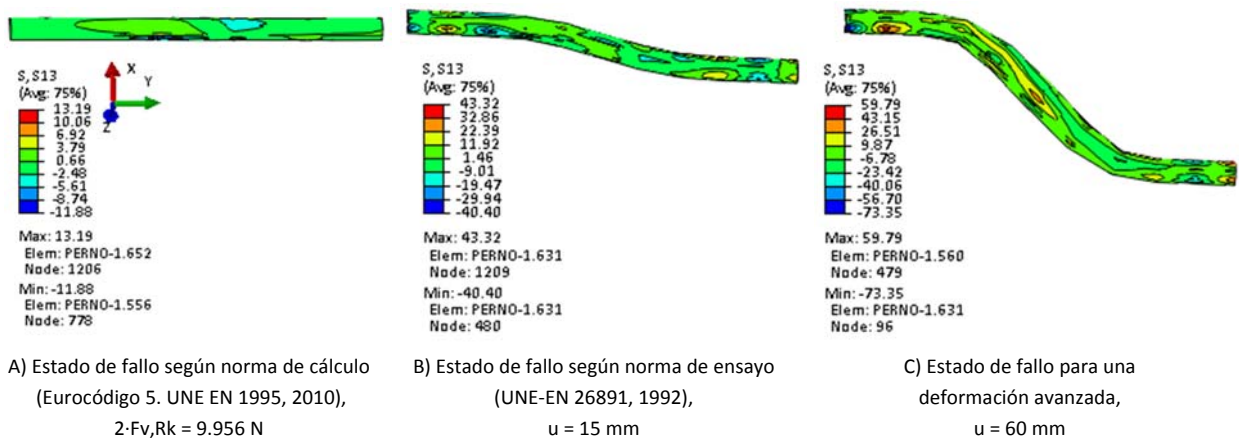


Figura 6-43. Tensión cortante en la clavija [S13 (N/mm²)].

La Figura 6-44 muestra los resultados de las tensiones de Von Mises. Se puede observar cómo las zonas con mayores valores de esta tensión combinada coinciden con aquellas en las que aparecen las rótulas plásticas en la clavija.

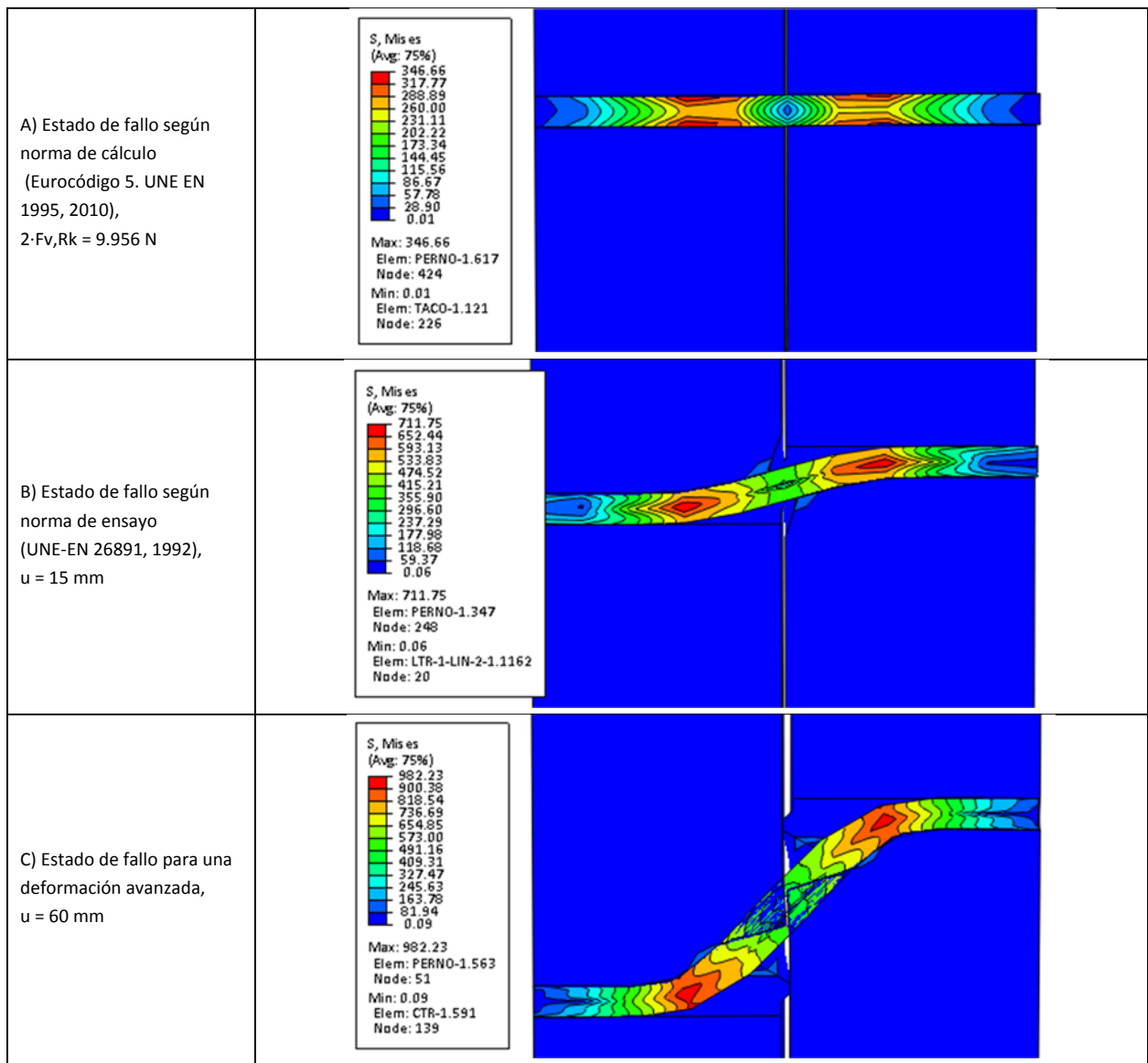


Figura 6-44. Tensiones de comparación de Von Mises para el acero de la clavija en N/mm².

6.3.3.2 Deformaciones en la clavija

Los resultados de las deformaciones en la clavija también permiten establecer el comportamiento de la misma y, como en el caso de la madera, son de especial interés porque permiten identificar qué zonas plastifican.

En el análisis mediante el MEF de las deformaciones longitudinales plásticas, éstas van a ser designadas como PE11, P22 y PE33 para los ejes "X", "Y" y "Z" respectivamente según se reflejan en la Figura 6-45. Para el estado de fallo A no se identifican plastificaciones relevantes, y los valores de las deformaciones más altos se dan en la superficie de contacto con las esquinas de la madera, con órdenes de magnitud de 10^{-5} . Estos valores son muy pequeños si se comparan con los correspondientes a los estados de fallo B) y C), donde ya se han formado las rótulas plásticas y donde las deformaciones se extienden a una región mayor (Zona PE_a 1). Las deformaciones plásticas longitudinales (S22) en la dirección de eje "Y" son positivas (Zona PE_a 2) y alcanzan los máximos de entre todas las componentes de plastificación que se producen para un mismo estado, con valores de PE22 = $4,66 \cdot 10^{-2}$ en el estado B) y PE22 = $1,72 \cdot 10^{-1}$ en el estado C). La zona de compresión tiene magnitudes ligeramente menores que la de tracción, lo que desplaza la fibra neutra hacia la primera. Las deformaciones longitudinales en los ejes "X" y "Z" son de compresión en las mismas regiones en que lo son a tracción en el eje "Y".

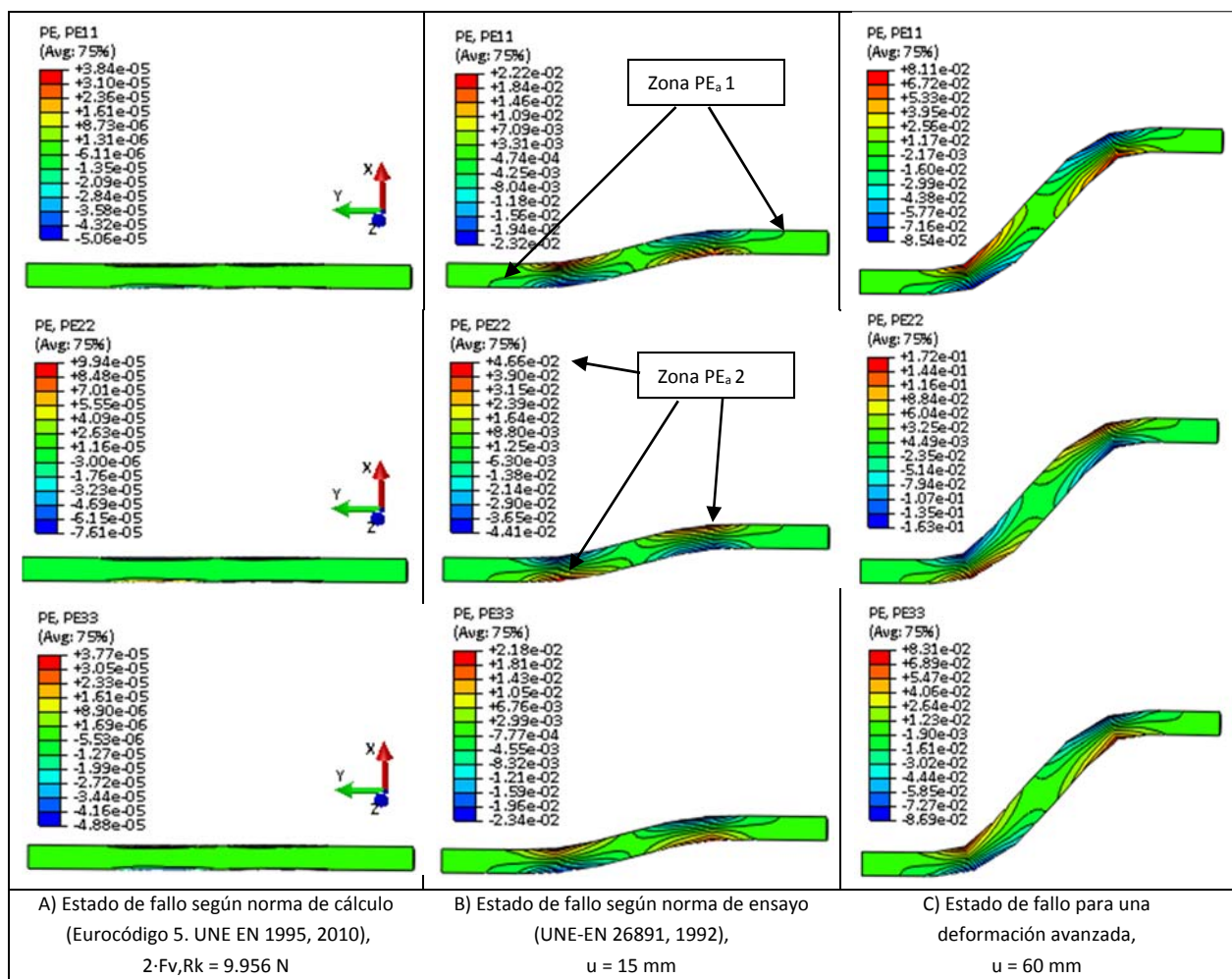


Figura 6-45. Deformaciones plásticas en la clavija, PE11, P22 y PE33.

En la Figura 6-46 se representan los valores de las deformaciones plásticas angulares, definidas como PE12, P13 y PE23 según la notación de Abaqus®. Para el estado de fallo A) no se identifican plastificaciones relevantes, teniendo órdenes magnitud de entre 10^{-4} y 10^{-7} en la superficie exterior de la clavija. Se puede apreciar que las deformaciones máximas son reflejo de las tensiones cortantes máximas y definen igualmente las secciones de la clavija donde se forman las rótulas con la inversión de signos alcanzando valores máximos (PE12 = $-8,18 \cdot 10^{-2}$) para el estado de fallo B), que aumentan para el estado de fallo C) (PE12 = $-3,18 \cdot 10^{-1}$) donde ocurre la deformación máxima de entre todas las componentes angulares de ese estado. Como ocurría con las tensiones cortantes, S13 y S23 son más significativas en las superficies de contacto entre acero y madera (Zona PE_a3), por lo que también en la representación de la Figura 6-46 se ha procedido a voltear la clavija mostrándose su cara posterior.

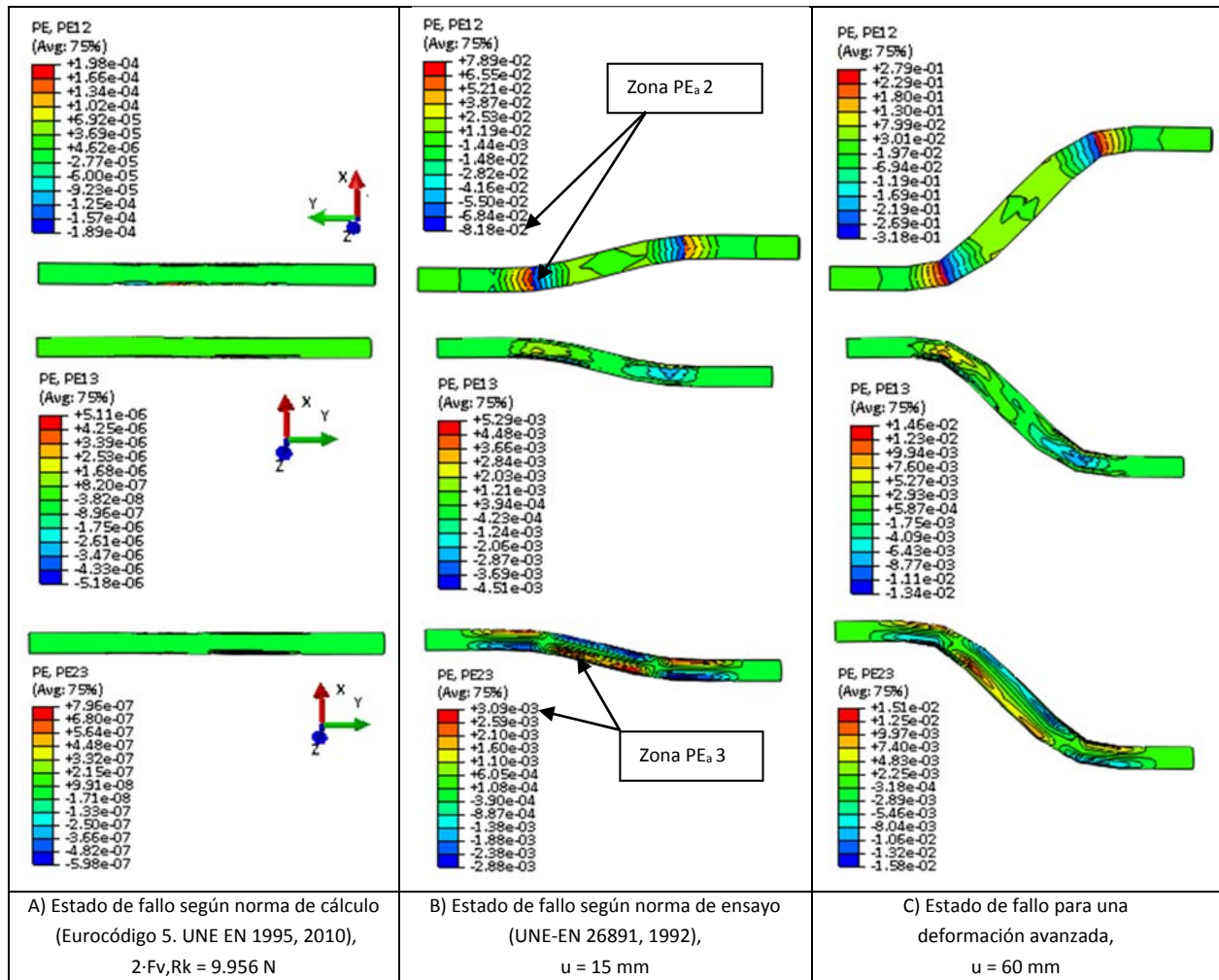
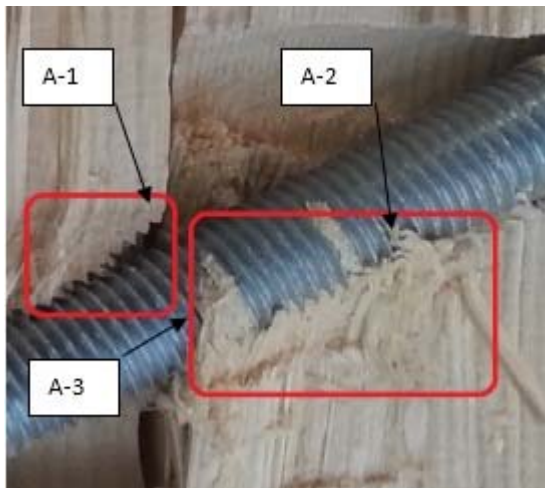


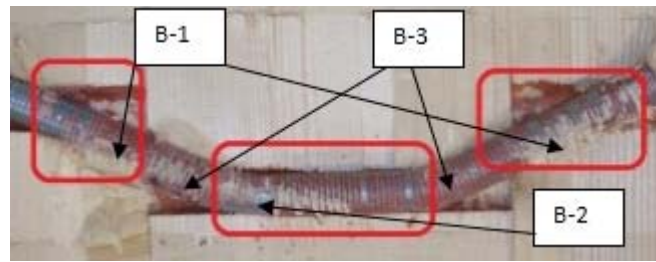
Figura 6-46. Deformaciones plásticas transversales en la clavija, PE12, PE13 y PE23.

6.3.4 Mejoras en el modelo de elementos finitos

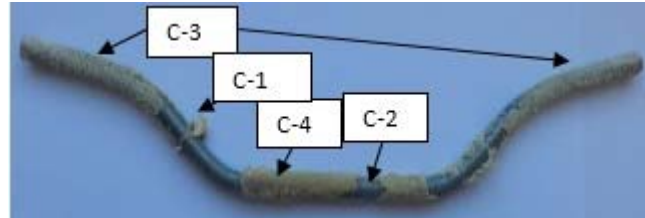
El tipo de clavija considerado para realizar el estudio mediante elementos finitos que se ha mostrado en el apartado anterior era liso. Entre las posibles mejoras que se pueden plantear, está la introducción de los resaltes y/o rugosidades que existen en el caso de varillas con rosca (véase Figura 6-47 A), donde la geometría del filete, o hilo de rosca, añaden nuevos condicionantes. Otras mejoras pueden orientarse al estudio del efecto de la inyección de adhesivos (véase Figura 6-47 B y C). Para modelizar este caso se puede optar por emplear elementos *shell* configurando una lámina equivalente que tiene asociadas unas dimensiones iguales a la capa de pegamento sobre la clavija real. El resultado es una lámina con un espesor menor y sin huecos, cuyo comportamiento mecánico es muy similar al del adhesivo.



A) Unión con clavija roscada (P018) [M13]



B) Unión con clavija roscada y adhesivo epoxi (P008) [M14]



C) Clavija roscada con adhesivo epoxi (P068) [M33]

Figura 6-47. Particularidades del comportamiento de la unión ante la introducción de mejoras.

Al modificar el modelo de elementos finitos para ajustarlo a la unión con mejoras, deben tenerse presentes algunas zonas (recuadradas en la Figura 6-47) más delicadas en la absorción de cargas y particularidades, que se describen a continuación:

- Las deformaciones con ángulos de giro (θ) en la clavija relevantes suponen variaciones en los planos de filete, que llevan a distorsiones y reposicionamientos de las fibras de madera frente a la clavija, con aplastamientos irregulares en las mismas (Zona A1).
- La dirección de las fibras de madera incrustadas en el filete sugiere que pueden aparecer esfuerzos que llegan a hacer flexionar conjuntos de fibras de la madera (Zona A2).
- La superficie de los filetes de rosca puede provocar que las fibras se canalicen alrededor de la clavija, “abrazando” los flancos de rosca (Zona A3).
- En el caso de inyectar adhesivos, el comportamiento puede variar ampliamente en función de las zonas de contacto, del tipo de adhesivo, del procedimiento para aplicar el adhesivo en la unión, del envejecimiento o las condiciones de temperatura y humedad. Así, por ejemplo:
 - Las fibras de madera pueden llegar a quedar pegadas hasta un punto tal, que éstas rompan por tracción (Zonas B1 y C1).
 - Pueden surgir huecos y burbujas en los cuales no exista contacto, y que den lugar a distribuciones de tensiones indeseables (Zonas B2 y C2).
 - Puede haber presencia de regiones expuestas a tracción en la superficie opuesta a la zona plastificada de la madera en las regiones de ancho de aplastamiento (b_1 y a_1) interiores y exteriores de la madera lateral (véase Figura 2-47 y Figura 2-48). En consecuencia el adhesivo se puede despegar localmente en estas zonas por tracción (Zona B3), mientras que el resto trabaja con esfuerzos cortantes derivados del efecto sogá.
 - La aparición de esfuerzos cortantes con deslizamiento de la madera frente a la clavija, que puede dar lugar a fallos por cortante y pérdida de adherencia entre madera y adhesivo (Zona B3).
 - Puede darse el caso de que el adhesivo no llegue a entrar en contacto adherente con alguno de los dos materiales, por ejemplo por suciedad, serrín o grasas, impidiendo que pueda realizar su aportación a la distribución de esfuerzos dentro la unión (Zona C4).

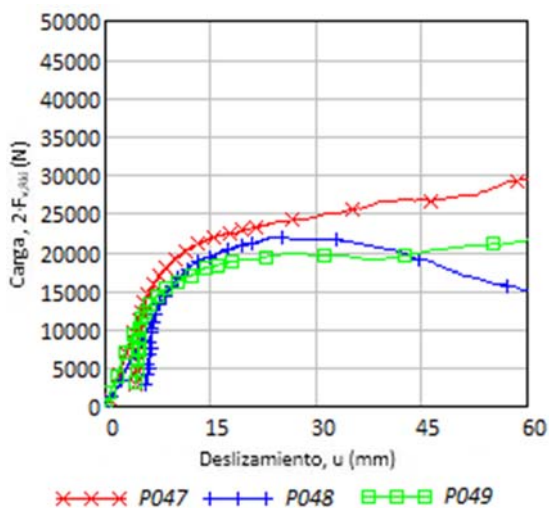
De las particularidades enumeradas se deduce que el modelo de elementos finitos puede tener múltiples ajustes. Además, se puede estudiar el grado de precisión del modelo con otro tipo de elementos finitos (véase Apartado 4.4.2.7). Por otro lado, la introducción de complementos sobre la unión con clavija simple puede llevar a una gran combinatoria y, para algunos de los casos, no garantizar una simulación numérica económica y acorde con una

precisión de resultados aceptable. En consecuencia, se pasa directamente a la exposición de resultados de ensayos experimentales, que garanticen resultados reales que permitan ampliar el desarrollo de los modelos.

6.4 Resultados de ensayos

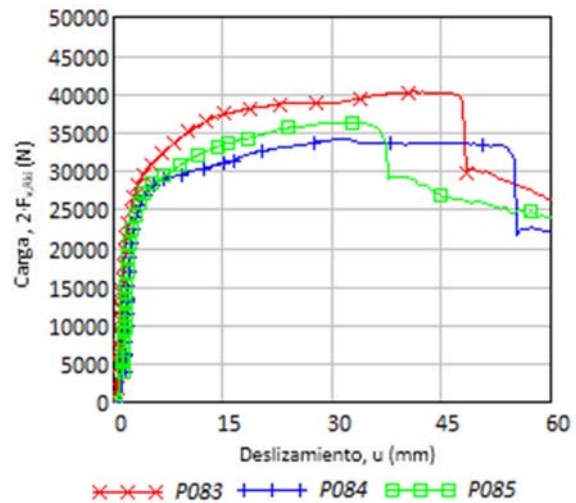
6.4.1 Resultados de muestras

A lo largo de este apartado se mostrarán los resultados de los ensayos experimentales, especialmente en lo que se refiere a la evolución carga-deslizamiento. Se trabajará con muestras, denotadas con la letra M seguida de un número (de la forma [MXX]), que agrupan los resultados de los ensayos sobre varias probetas repetidas (habitualmente tres, salvo que haya sido descartada alguna de las probetas por algún tipo de irregularidad manifiesta), denotadas con la letra P seguida de un número (de la forma PXXX). Los ensayos se realizaron siguiendo las normas y directrices que ya se indicaron para ellos en el Capítulo 5. La Figura 6-48 muestra dos ejemplos de resultados de ensayos para seis probetas agrupadas en dos muestras. En la Figura 6-48 A) se ve la muestra [M27], representada por las probetas P047, P048 y P049, correspondiente al caso de varillas con expansión por camisa mediante cono (sistema mostrado en la Figura 3-46), mientras que la Figura 6-48 B) refleja la muestra [M38], representada por las probetas P083, P084 y P085, con tubo expandido por embutición (sistema mostrado en la Figura 3-66).



A) Muestra [M27]

80_160_12_0_no_no_sí, metal. con cono_rosca zinc 5_6
 $t_1=80\text{mm}$ $t_2=160\text{mm}$, $d=12\text{mm}$, $\alpha=0^\circ$
 Expansión por camina mediante cono en clavija roscada.



B) Muestra [M38]

80_160_12_0_no_no_sí, met. con tubo 12-8,5_lisa
 $t_1=80\text{mm}$ $t_2=160\text{mm}$, $d=12\text{mm}$, $\alpha=0^\circ$
 Expansión con tubo por embutición con prensa

Figura 6-48. Ejemplo de ensayos agrupados en dos muestras.

Hubo muestras donde fue necesario excluir alguno de los ensayos por haberse detectado irregularidades en los resultados. Por ejemplo, en los resultados mostrados en la Figura 6-49 se puede observar que, al analizar la muestra [M01], en la probeta P007 aparecen unos picos de carga (estas probetas se corresponden al modelo base expuesto en la Tabla 6-1, pero sustituyendo la clavija lisa por varilla roscada y adhesivo epoxi). Una vez realizado el ensayo, el corte transversal de la probeta (que deja a la vista la sección central, donde está situada la clavija ya deformada) puso de manifiesto que el procedimiento de montaje requería ajustes; ya que, al inyectar el adhesivo epoxi, éste penetró en los planos verticales (planos de contacto entre las superficies externas de las piezas de madera), provocando un incremento de capacidad resistiva extra por esta zona de adherencia que no debería haber existido y que, al romperse bajo cortante por alcanzar su capacidad máxima, da lugar a la aparición de este pico que no tiene nada que ver con la verdadera capacidad resistiva de la unión madera-clavija. La irregularidad no apareció en las probetas P016 y P017, que se fabricaron asegurándose de que había un contacto previo entre las piezas de madera, con lo que se evitaba la dispersión del epoxi. En cualquier caso, incluso cuando las probetas están bien fabricadas,

los resultados de los ensayos presentan variaciones debidas a la heterogeneidad de la madera como material estructural, que se limitan utilizando muestras con el mayor número de probetas posibles dentro de unos términos económicos razonables.

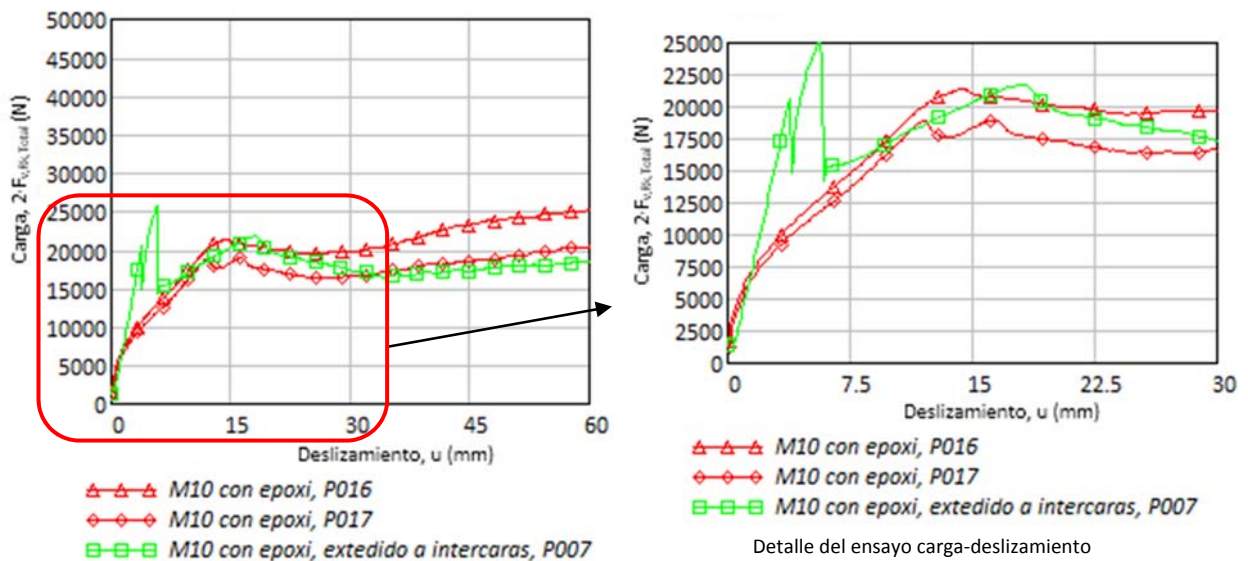


Figura 6-49. Ejemplo de exclusión por irregularidad de la probeta P016 de la muestra [M01].

Las variaciones en los resultados de los ensayos hacen necesario estudiar estadísticamente el grado de dispersión que tienen estos resultados para las distintas probetas dentro de la misma muestra (con idénticas características de diseño), y cuáles son los motivos de esta variación. En la Tabla 6-17 se reflejan el grado de agrupación de las muestras más representativas estudiadas junto con sus datos estadísticos. Se muestra la variable carga (F_{max}) para un deslizamiento de la unión (u) de 15 mm. Se calcula, en primera aproximación, con un factor adimensional llamado variación límite (v_{lim}), para evitar la dependencia del tamaño de la unión. Esta variación límite se calcula como la diferencia del ensayo con la carga máxima menos el ensayo con la carga mínima dividido entre el promedio de carga para los distintos ensayos de la muestra. La Tabla 6-17 está ordenada por v_{lim} , lo que da una orientación de la banda de aproximación entre los ensayos de la misma muestra. Sin embargo, este coeficiente adimensional no tiene en cuenta el grado de desviación que puede haber en los ensayos que queden dentro de la banda (de carga máxima menos la mínima). Por ello, desde un punto de vista probabilístico, se recurre a la desviación típica (s), que resulta más adecuada para recoger la agrupación de los distintos ensayos de repetición. La desviación típica o desviación estándar (reflejada en la Ecuación 6-7) es una medida de dispersión para las variables del intervalo, y queda definida como la raíz cuadrada de la varianza $[(x_i - \bar{x})^2]$ de la variable (en este caso, la carga en la unión).

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Ecuación 6-7

Siendo:

- s desviación típica, en N.
- x_i valor de la carga para un deslizamiento dado, en N.
- \bar{x} valor medio de la carga en ese deslizamiento, en N.
- n número de valores analizados, ensayos realizados.

Tabla 6-17. Variaciones de carga y desviación típica por muestra.

Muestra	F_{max} (N) $u=15$ mm	Variación límite V_{lim} (%)	Promedio de carga F_{max} (N) (\bar{X})	Desviación típica s (N)	Promedio de desviación típica	Descriptor abreviado de la muestra
M06	19.400,99	0,20%	19.418,01	13,37	5,4%	100_200_10_45_si_no_no_rosc zinc 5.6
M24	48.459,69	2,10%	48.830,20	258,35	5,4%	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6
M03	17.019,67	3,30%	17.244,20	198,46	20,5%	100_200_10_0_si_no_no_rosc zinc 5.6
M25	25.122,38	3,30%	25.419,47	224,42	10,1%	80_160_10_0_no_no_Lisa
M26	21.410,22	3,40%	21.704,77	179,34	2,7%	80_160_10_0_no_no_no_Lisa alta res.
M39	17.707,49	4,90%	18.065,73	215,24	4,8%	80_160_10_90_si, apriete 15 Nm_no_no_rosc zinc 5.6
M22	35.058,44	7,40%	36.576,17	727,53	6,1%	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa
M40	65.663,95	8,00%	67.687,50	1.358,95	8,0%	80_160_14_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6
M23	28.914,05	8,40%	30.114,87	598,47	6,4%	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa alta res.
M21	26.257,64	10,50%	27.245,30	757,81	5,3%	80_160_10_0_Conector interc._no_no_rosc zinc 5.6
M28	12.201,73	10,60%	12.689,23	344,77	22,8%	80_160_10_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6
M04	24.343,39	12,50%	25.789,82	1.136,43	8,5%	100_200_10_45_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6
M37	27.481,80	12,80%	27.481,80	0,00	0,0%	80_160_10_0_si, apriete 15 Nm_no_no_rosc zinc 5.6
M13	35.869,56	12,90%	38.221,69	1.174,53	7,1%	100_200_20_0_no_no_no_rosc zinc 5.6
M01	18.578,66	13,50%	19.958,86	664,07	8,9%	100_200_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6
M12	51.738,99	13,90%	55.890,85	1.984,47	14,6%	100_200_20_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6
M41	35.883,37	14,10%	38.506,03	1.294,07	7,7%	80_160_14_0_no_no_no_rosc zinc 5.6
M09	20.571,37	14,60%	22.017,80	1.136,43	7,2%	100_200_10_90_si_no_no_rosc zinc 5.6
M05	15.284,83	14,80%	16.373,89	855,64	4,2%	100_200_10_45_no_no_no_rosc zinc 5.6
M29	15.172,17	15,60%	16.372,37	604,96	3,9%	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc. F1
M36	11.657,74	17,00%	12.831,13	560,68	6,5%	80_160_10_90_no_no_no_rosc zinc 5.6
M53	13.246,30	17,70%	13.246,30	645,05	7,1%	80_160_10_90_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosc zinc 5.6
M38	31.229,86	18,80%	33.936,73	1.517,60	11,1%	80_160_12_0_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa
M27	18.151,26	19,10%	19.733,93	899,89	14,3%	80_160_12_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6
M30	14.375,19	22,00%	14.375,19	4.420,38	20,0%	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc (S275 JR)
M32	21.794,37	24,30%	24.640,60	1.413,67	12,4%	80_160_10_0_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa
M02	13.731,95	26,60%	15.184,38	1.041,65	12,7%	100_200_10_0_no_no_no_rosc zinc 5.6
M52	14.997,17	28,30%	14.997,17	9.939,05	11,6%	80_160_10_90_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa
M07	22.521,20	31,20%	26.201,08	2.891,19	11,5%	100_200_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6
M08	16.314,76	31,20%	26.201,08	2.891,19	16,1%	100_200_10_90_no_no_no_rosc zinc 5.6
M16	69.699,30	31,20%	78.935,78	6.189,22	16,8%	100_200_30_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6
M35	22.322,22	35,90%	26.475,83	2.245,63	15,6%	80_160_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6
M17	42.183,22	36,10%	48.068,18	4.150,20	7,4%	100_200_30_0_no_no_no_rosc zinc 5.6
M31	16.675,43	37,50%	18.525,67	1.864,86	15,3%	80_160_10_0_no_no_no_rosc zinc 5.6
M54	20.980,75	38,10%	20.980,75	2.762,79	18,4%	80_160_12_90_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa
M33	17.024,53	42,90%	19.677,17	2.197,62	17,7%	80_160_10_0_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosc zinc 5.6

Analizar los resultados de desviación de carga en la unión expuestos en la Tabla 6-17 permite sacar la siguiente información de interés:

- La baja variabilidad de las primeras muestras de la tabla indica una ejecución más fiable, describiendo las curvas de los resultados de las probetas que las componen trayectorias casi coincidentes. Las muestras [M06] y [M24] de la Figura 6-50 presentan muy poca desviación, con trayectorias similares durante el ensayo. En la muestra [M24] se identifican grandes rigideces, lo que justifica variaciones límite bajas (2,10 %), pero una desviación típica más alta ($s = 258,35 \text{ N}$); esto hace pensar que el máximo de la capacidad de carga de la unión no se sitúa exactamente en el punto de deslizamiento (15 mm) y que se debe trabajar con variables adimensionales.

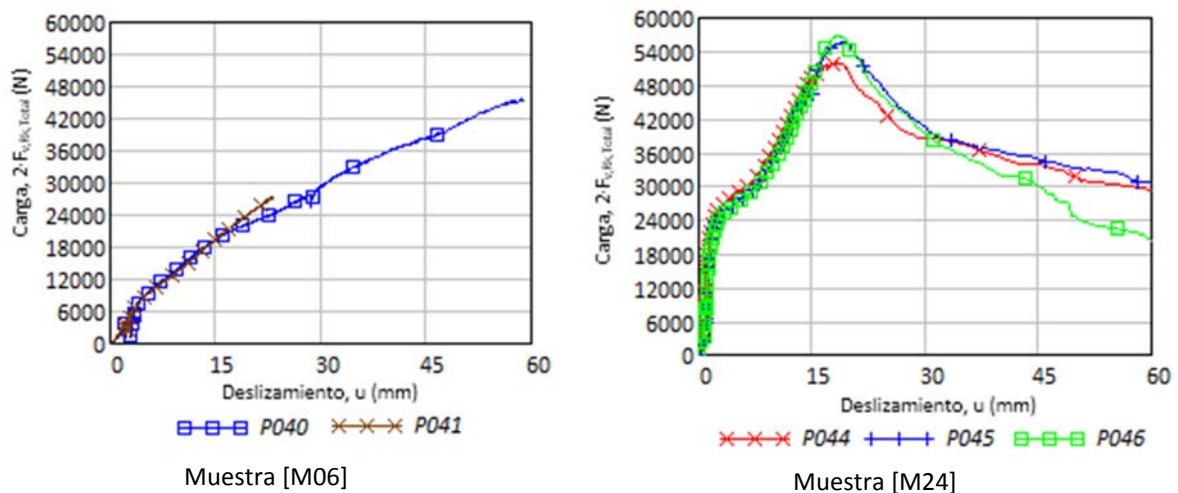


Figura 6-50. Ensayos de muestras [M06], [M24] y [M03].

- Más abajo, en posiciones intermedias de la tabla, concretamente en la muestra [M10] (Figura 6-49), vuelven a aparecer grandes valores de rigidez, lo que abunda en la conclusión indicada en el punto previo sobre la falta de relación entre el máximo de la capacidad de carga y el punto de deslizamiento límite (15 mm).
- En las posiciones más bajas de la Tabla 6-17 aparecen las muestras donde se han dado irregularidades. Por ejemplo, en la Figura 6-51, donde se representan algunas de estas muestras, puede observarse que las desviaciones entre las curvas de resultados son mayores, dejando claro el efecto negativo que puede tener un montaje defectuoso de la unión, por lo que los resultados deben ser analizados cuidadosamente. La muestra [M33] (a la que pertenece la probeta P068 mostrada en la Figura 6-47 C) es una de las que presentó mayores variaciones, previsiblemente por las irregularidades en la aplicación del adhesivo, que pueden apreciarse al analizar la sección transversal. La ejecución de la unión no se ha realizado correctamente. En la misma muestra [M31], la probeta P058 presentó una evolución más favorable que el resto de las pertenecientes a la muestra. Mientras, en la muestra [M54], correspondiente a probetas que contenían clavijas con kit de expansión han ocurrido roturas irregulares tipo fenda, como se puede apreciar en la probeta P133 (Figura 6-52), provocadas por una incorrecta ejecución de la probeta, debido a que las piezas de madera lateral se colocaron de manera que sus fibras quedaban alineadas con la clavija.

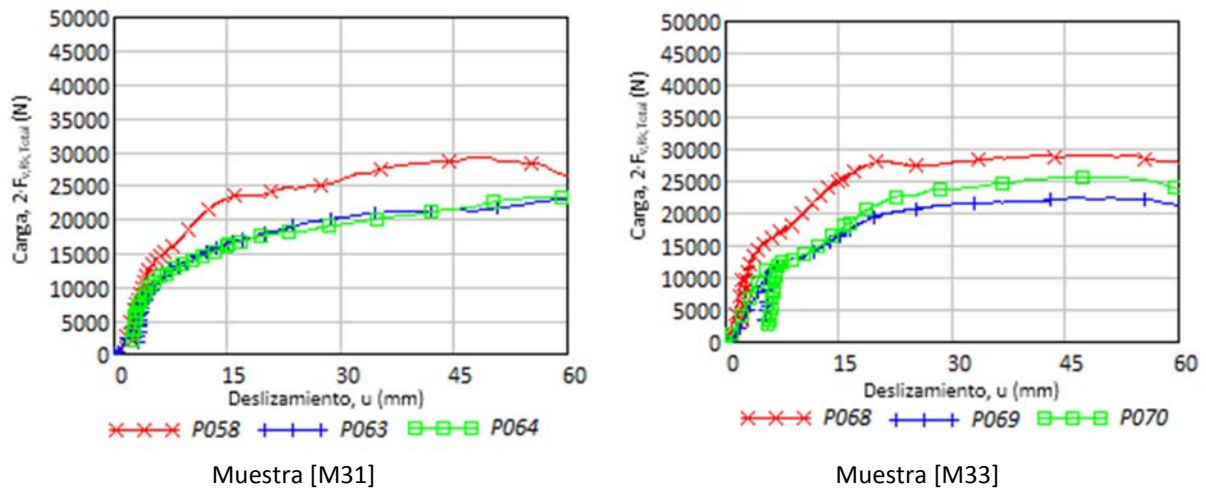


Figura 6-51. Ensayos de las muestras [M31] y [M33].

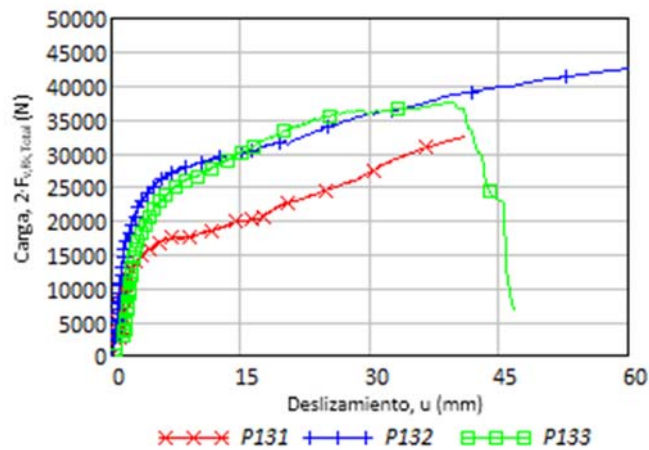


Figura 6-52. Ensayos de la muestras [M54].

6.4.2 Particularidades en los ensayos

En el Capítulo 5 se expusieron dos normas de referencia para desarrollar los ensayos de la unión que se podrían considerar complementarias:

- Determinación de la resistencia al aplastamiento y del módulo de aplastamiento para los elementos de fijación tipo clavija (UNE-EN 383, 2007).
- Estructuras de madera. Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. Determinación de las características de resistencia y deslizamiento (UNE-EN 26891, 1992).

En la primera se analiza el módulo de aplastamiento, pero sólo entre una pieza de madera y una clavija, no teniendo en cuenta otros factores que intervienen en las uniones con clavija como los espesores de las distintas piezas de madera o la presencia de refuerzos tales como el acople de tuerca y arandela en los extremos de la clavija. Mientras, en la segunda, se propone un procedimiento de ensayo que vale para cuando se emplean distintos elementos metálicos de unión (no sólo clavijas), pero que no considera las dimensiones relativas de las probetas, fijando un mismo deslizamiento límite de 15 mm independientemente de la viga y del tamaño de la unión, a la vez que simplifica los resultados al cálculo de unos pocos puntos del diagrama carga-desplazamiento, dando con ello orientaciones parciales en puntos discretos.

Por otro lado, la norma que desarrolla el dimensionado de las uniones tipo clavija (DB SE M, 2009) utiliza otros criterios para desarrollar las ecuaciones de cálculo (expuestas en el Capítulo 2) que proponen zonas de plastificación

aproximadas, tendiendo a relacionar los criterios de fallo de las normas previamente indicadas: carga para deslizamiento de 15 mm y resistencia por capacidad de carga correspondiente a los criterios de fallo propuestos por la norma, lo que implica la simplificación a una laja plana con una zona de plastificación de la madera y en determinados modos de fallo (el 3 y 4), con rótulas plásticas en la clavija. Ello deriva en que los criterios de fallo de las diferentes normas no son comunes. Para complicar más el problema, los expuestos no son los únicos modos de fallo que pueden ocurrir, como se identifica en determinados ensayos que presentan rotura por tracción de la clavija (véase Figura 6-56).

Por todo lo indicado previamente, en los resultados de los ensayos desarrollados en este trabajo, se procedió a recopilar la evolución de carga-deslizamiento de forma continua y ampliar el ensayo más allá de los 15 mm de deslizamiento, sin limitarse al cálculo de puntos discretos como indica la norma para uniones metálicas (UNE-EN 26891, 1992) de la forma descrita en el Apartado 5.2.2. El comportamiento de la unión varía en el momento en que se introducen modificaciones o refuerzos. Por ejemplo, el uso de adhesivo provoca, en determinados casos, zonas de pendientes negativas en la curva de ensayo al superarse la capacidad de adherencia que esta forma de refuerzo proporciona durante las primeras fases de carga. También, por ejemplo, la presencia de la tuerca y la arandela en los extremos de la clavija, que permite seguir aumentando la capacidad de carga de la unión mucho más allá de la resistencia máxima alcanzada para deslizamientos de 15 mm.

Otro ejemplo de particularidad se observa en los resultados de la probeta P083 [M23]. En ella se puede apreciar la consolidación inicial descrita en el Apartado 5.2.4.1. En el punto de deslizamiento $u = 0,39$ mm presenta una caída de carga hasta 883 N (Figura 6-53); esta discontinuidad se da en el momento de ensayo $t = 30$ s, como se puede ver en la Figura 6-54. En los ensayos realizados con madera laminada, se realizó un ciclo de descarga, para después, a medida que se va incrementando el deslizamiento, desarrollar la zona de meseta ya descrita en el Apartado 5.2.4.1, en una zona de cargas cercanas a $F_{max} = 37.367,60$ N según la norma de ensayo (UNE-EN 26891, 1992), zona que por otro lado ya habría sobrepasado la capacidad máxima de la probeta de acuerdo a la norma para el cálculo analítico (DB SE M, 2009) que se corresponde con un valor de $2 \cdot F_{v,Rk} = 17.917,26$ N y, por último, un tramo de caída de carga brusca. Este resultado responde predominantemente a un tipo unión con clavija sin refuerzos, ya que al emplear alguno de estos, como el adhesivo o la tuerca-arandela, se modifica la forma de la curva y, por lo tanto, los posibles puntos característicos, especialmente el de carga máxima.

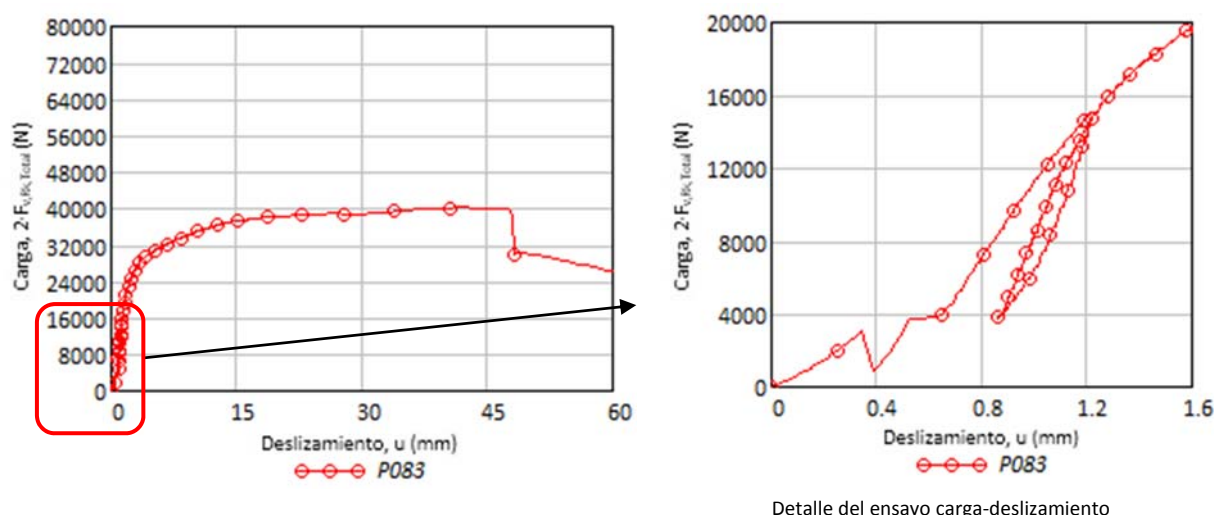
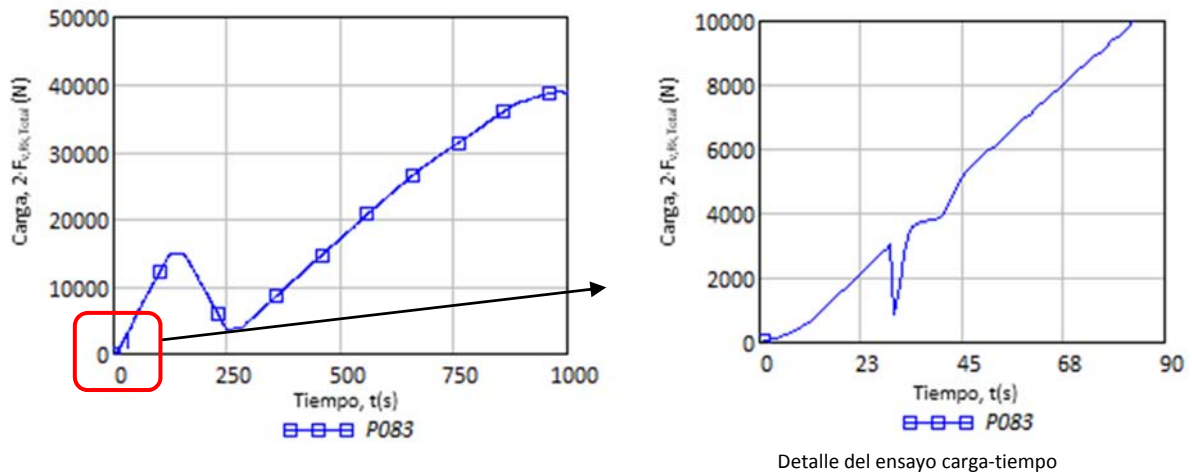


Figura 6-53. Carga en la unión frente a deslizamiento [u (mm)] para la probeta P083 [M23].

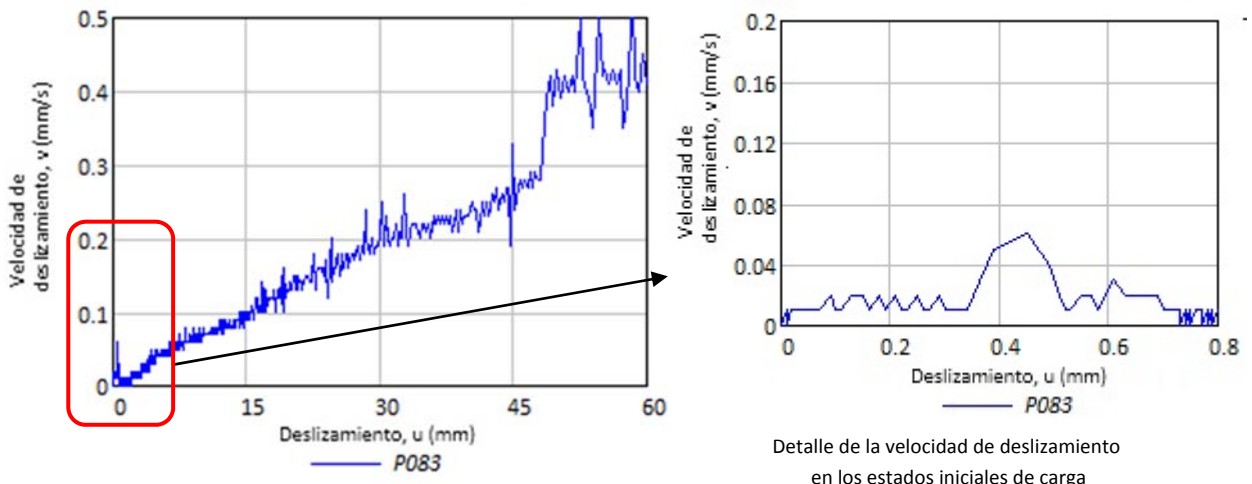
En la Figura 6-54 se expone la evolución de carga frente a tiempo en los ensayos. En coherencia con las indicaciones de la norma (UNE-EN 26891, 1992), se ha identificado la misma caída de carga que ya se indicó para la curva carga

frente a deslizamiento. Una vez sobrepasados los desplazamientos límite indicados por norma, se incrementaron ligeramente las velocidades de aplicación de las cargas, teniendo presente que:

- Las alteraciones de plastificación más relevantes ya se habían producido.
- El ensayo de cada probeta sobrepasaba los quince minutos indicados en la norma (UNE-EN 383, 2007), para garantizar un comportamiento estático.
- La curva de carga-deslizamiento seguía teniendo pendiente positiva, con lo que se podía presentar mayor resistencia.



La velocidad de deslizamiento es otro factor que se debe considerar en la evolución de la zona de aplastamiento. Las fases de consolidación inicial y fallo presentan movimientos relativamente “bruscos”, aunque las velocidades de deslizamiento son bajas (para mantener las hipótesis de comportamiento estático). En la Figura 6-55 se muestra cómo la velocidad se incrementa con medias sensiblemente lineales y de forma proporcional al incremento de carga (recordar que estos ensayos se desarrollan con incremento de carga constante, según el Apartado 5.2).



En la Figura 6-55 se identifican también dos alteraciones de velocidad, una con pequeños deslizamientos (seguramente debidos a asentamientos puntuales de la clavija en la madera al iniciar el ensayo) y otra con un deslizamiento de 48 mm (que se corresponde con una caída en la capacidad de carga de la unión); durante el ensayo, en este punto, se aprecia una modificación en los ángulos que forma la clavija: no se mantiene la horizontalidad propia del modo de fallo 4 en las zonas exteriores de la unión, sino que comienza a propagar un segundo ángulo de plastificación (θ_2), que acentúa el deslizamiento (Figura 6-56). Esto lleva a pensar que la relación entre el

deslizamiento de la unión y las superficies de plastificación de la madera está condicionada con un crecimiento de b_1 , y b_2 , que a su vez puede afectar al modo de fallo producido. Es decir, a medida que b_1 aumenta, se puede producir un cambio del modo de fallo 4 a modo de fallo 3. Sería aconsejable desarrollar expresiones que relacionen el incremento de la superficie de plastificación de la madera con el comportamiento a rigidez de la clavija.

También, durante la campaña de ensayos se evidenció que los modos de fallo contemplados en la normativa no son los únicos. Merece atención el fallo por rotura a tracción en la clavija, como se resalta en la probeta de la Figura 6-56, u otros modos de fallos relacionados con la aparición de fendas en la madera. Otra observación importante que se realizó tras los ensayos fue la relativa al ratio entre las longitudes de aplastamiento b_1/b_2 . Recordemos que la relación entre la tensión admisible de la pieza de espesor t_1 y la pieza de espesor t_2 está definida como β , y que es igual a la unidad cuando las piezas son del mismo tipo de madera, que es el caso base estudiado. En este caso, la relación b_1 entre b_2 debe ser también igual a la unidad. Sin embargo, en los cortes transversales de determinadas muestras, se observó que esto no se cumplía. Aunque tanto las piezas laterales como la central son del mismo tipo de madera, la propagación del segundo ángulo de fallo (θ_2) hacia el eje de la unión ha enmascarado la zona de aplastamiento b_1 .

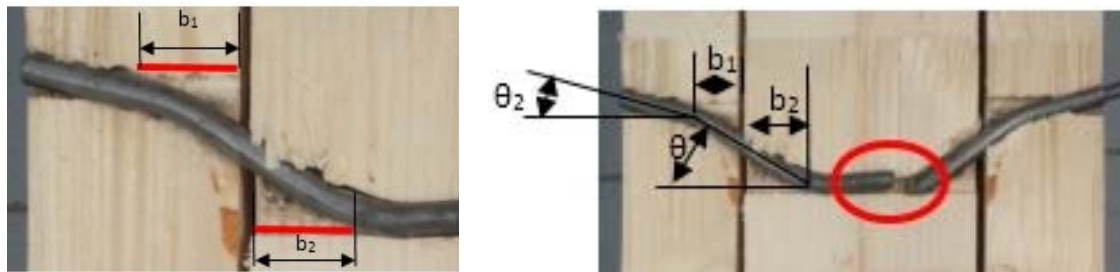


Figura 6-56. Ángulos de la clavija y longitudes de aplastamiento en la probeta P83 [M23].

En la Figura 6-57, correspondiente a la probeta P082 [M37], que está reforzada con tuerca y arandela, se observa que aparecen esfuerzos axiales mayores (por el efecto sogá derivado del esfuerzo que la arandela ejerce contra la superficie de madera con la que entra en contacto). La anchura de aplastamiento (b_1+b_2) se hace más amplia, a pesar de tener un diámetro interior menor, porque prevalece el atirantado derivado de las fijaciones en extremos. Por tanto no parece aconsejable tratar de forma desacoplada la contribución del efecto sogá como un mero sumando a añadir al resto de resistencias de la unión que conjugan el aplastamiento de las esquinas de las piezas de madera con los esfuerzos de la clavija en disposición de flexión, como se sugieren las normas (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009). Esto lleva a pensar que el diagrama del cuerpo libre aplicable en estos casos es función del deslizamiento de la unión y de las zonas de contacto que entran en juego. La deformación de la clavija responde a la flecha de una viga sometida a flexión bajo una distribución de cargas continuas aunque no uniformes, que provocan zonas de aplastamiento en las piezas de madera (b_1 y b_2) más amplias, frente a rótulas en puntos concretos derivadas del momento plástico.



Figura 6-57. Evolución de la deformación en clavija P082 [M37].

6.4.3 Modificaciones sobre uniones en clavijas de madera laminada

El modelo base de unión, descrito en la Tabla 6-1, cuya curva de carga-desplazamiento se muestra en la Figura 6-58 y la Figura 6-59 con línea marcada con cuadrado y color rojo oscuro, se ha tomado como referencia de este estudio. A partir del mismo, a través de modificaciones, se ha analizado el efecto que las mismas tienen sobre la capacidad de carga de la unión y sobre otras variables secundarias relacionadas. Como límite de fallo a carga de la unión se fija el punto de deslizamiento de 15 mm y los valores que dan las ecuaciones de cálculo analítico indicadas en la normativa.

Para el caso base, la capacidad de carga de la unión determinada experimentalmente fue de 25.116,7 N según los criterios del ensayo (UNE-EN 26891, 1992), frente a los $4.978 \cdot 2 = 9.956$ N que se obtenían del cálculo analítico (DB SE M, 2009). Este último valor debe corregirse con la densidad real de la madera, cuyo valor es $\rho = 434 \text{ kg/m}^3$, frente a los $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$ característicos que indica la norma para el tipo de madera empleado. Con la densidad corregida (ρ_k), el fallo se produciría a 9.373,98 N. El sumando de contribución por axil, tal y como establece la norma, es prácticamente despreciable frente a los valores anteriores. En definitiva, la resistencia real de la unión está situada muy por encima de la de cálculo, del orden de 2,5 veces, si comparamos el valor obtenido en el ensayo con el calculado en base a la norma de dimensionado.

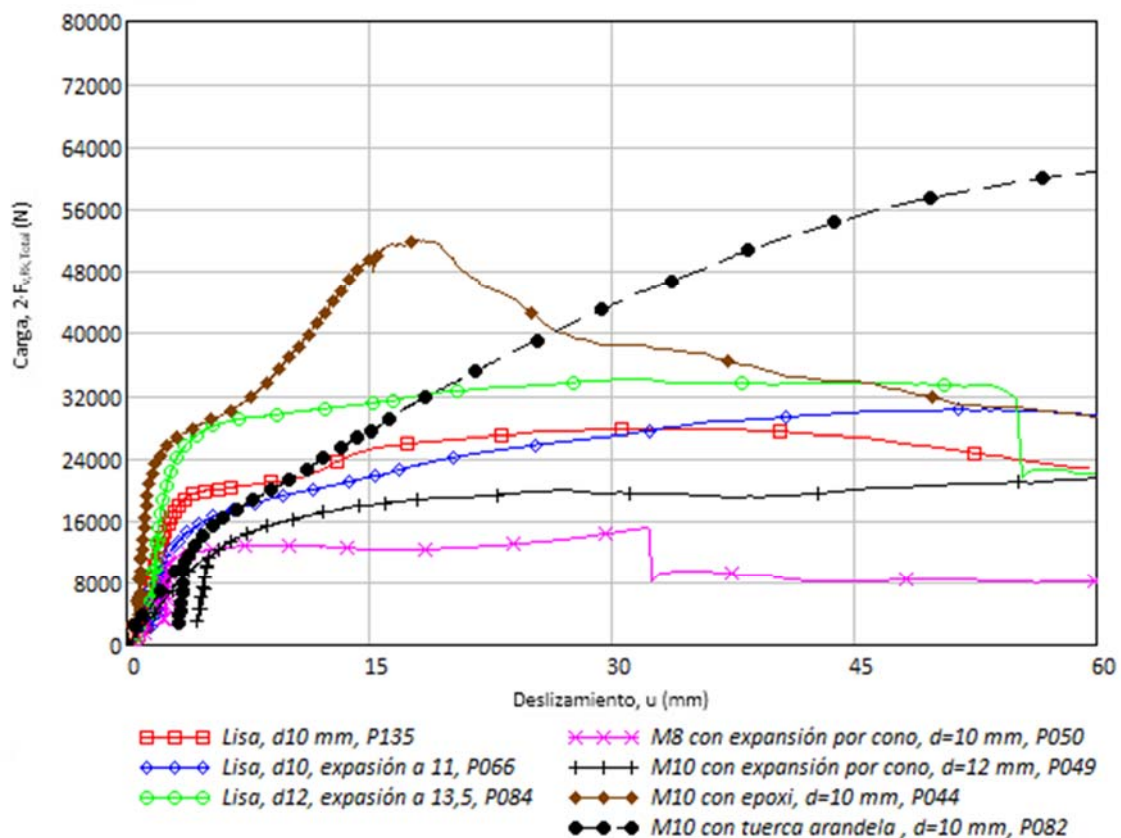


Figura 6-58. Comparación de curvas de ensayo con clavijas lisas y roscadas de tipo M8 y M10.

El resto de los ensayos que muestra la Figura 6-58 y Figura 6-59 se analizan a continuación en orden de mayor a menor capacidad de carga, indicando en cada caso el refuerzo que se ha introducido o la modificación que se ha realizado respecto del caso base y las conclusiones que se han alcanzado tras el análisis de su curva de resultados:

1. La introducción de adhesivo epoxídico en la probeta P044, de la muestra [M24], mejora la capacidad de carga respecto al caso base, a pesar de que por tratarse de una varilla roscada su diámetro interior (d_{int}) se reduce con respecto al diámetro del caso base que es varilla lisa. Presenta mayor capacidad de carga, hasta

sobrepasar el máximo de carga, momento a partir del cual se pierde la adherencia y su capacidad tiende a decrecer para aproximarse a los resultados del resto de casos.

2. El incremento de diámetro de agujero junto con el empleo de un kit de expansión en la probeta P084 [M38] no han provocado una variación apreciable del comportamiento de este caso con respecto al caso base. Por su parte el incremento del diámetro de la clavija de 12 a 13,5 mm ha dado lugar a una mayor capacidad de carga.
3. La probeta P82 [M37] se ha reforzado con tuerca y arandela y aunque inicialmente muestra menos rigidez (Figura 6-59), su capacidad de carga sigue incrementándose con el deslizamiento, llegando ya a superar la capacidad de carga del caso base en el punto de deslizamiento 15 mm y en mucho mayor medida para deslizamientos más grandes. Si se continúa aplicando carga, mejora incluso por mucho el comportamiento de la clavija con adhesivo epoxi.
4. La probeta P49 [M27] se ha reforzado con un kit expansivo de camisa metálica expandida mediante conos que se desplazaban en la varilla roscada, que no ha dado buen resultado a nivel de incremento de capacidad de carga. Las varillas roscadas son de M10 con un $d_{int} = 8,2$ mm y requieren de un agujero en la madera de diámetro $d = 12$ mm para alojar el kit con la camisa, para posteriormente expandir la camisa hasta diámetros de valor $d_{ext} = 14$ mm. Su rendimiento es ligeramente menor al del caso base, puesto que, aunque ambas tienen clavija de diámetro 10 mm, en este caso es roscada y por tanto la verdadera capacidad resistiva la aporta el diámetro interior, que es inferior a esos 10 mm. En la única zona donde se detecta una cierta mejora es para los valores de desplazamientos finales, entre 30 y 60 mm, donde, al contrario que en el caso base, no aparece una caída de capacidad de carga, sino que esta propiedad sigue creciendo muy ligeramente.
5. Finalmente la probeta P050 [M28] también tiene kit expansivo compuesto por camisa metálica expandida por conos, que tampoco ha resultado bien. La razón es que la camisa exterior del kit expansivo tiene un diámetro nominal externo previo a la expansión de valor $d = 10$ mm, que coincide con el diámetro del agujero en la madera. El exterior de la camisa metálica se expande por la actuación de las tuercas con forma de cono hasta alcanzar un diámetro tras la expansión de $d_{ext} = 11$ mm. El problema es que el sistema requiere el empleo de varillas roscadas de diámetros significativamente menores al del agujero (en este caso de rosca tipo M8, donde el diámetro interior de la clavija se reduce hasta los 6,5 mm (como puede consultarse en la Tabla 3-13) para conseguir intercalar las tuercas cónicas, lo que supone una reducción drástica del momento plástico de la clavija ($M_{y,Rk}$). En consecuencia la capacidad de carga de la unión no mejora, e incluso en algunas de las probetas pertenecientes a la muestra (probetas P50 y P51) se llega a producir la rotura por tracción simple de la varilla, seguramente influida por efectos de entalla del roscado y enclavamiento de porciones de la camisa.

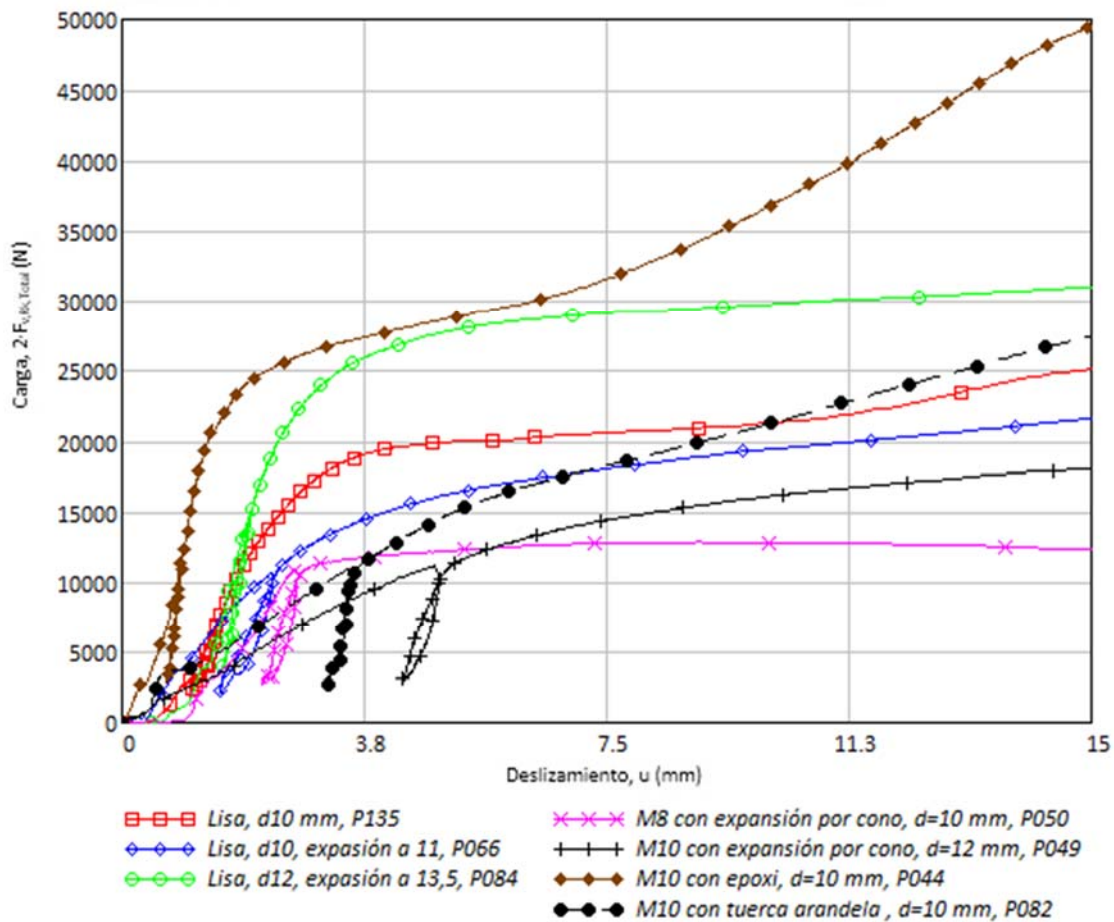


Figura 6-59. Comparación de curvas de ensayo para los primeros 15 mm de deslizamiento.

La observación de los resultados experimentales obtenidos, tras aplicar las diversas modificaciones y refuerzos al caso base de partida, llevan a las siguientes conclusiones:

- Las desviaciones en la evolución de la carga tienen causas diversas, debidas a la propia unión clavija y también en función de los elementos complementarios que se le añadan (expansiones de apriete, epoxi, tuerca-arandela...).
- Los resultados experimentales evidencian que las fórmulas para el dimensionado contenidas en la normativa llevan a diseño muy conservador.
- De todas las variables de diseño que se pueden modificar, el diámetro de la clavija es el que aporta variaciones en la capacidad de carga más significativas.
- Las modificaciones y refuerzos no solo afectan a la variable de estudio principal (capacidad de carga), sino a todo el resto de variables secundarias que se relacionan con ella, como por ejemplo la fuerza axil del efecto soga, la anchura de las zonas de aplastamiento (b_1 y b_2), etc.

6.4.4 Modificaciones sobre uniones en clavijas de madera maciza QL24h

Para complementar los resultados expuestos en el apartado anterior correspondientes al uso de madera laminada, se han realizado también ensayos con madera maciza encolada QL24h, cuyas principales características ya se introdujeron en el Capítulo 3. El caso base de partida se refleja en la Tabla 6-18.

Tabla 6-18. Datos de partida para modelo de cálculo analítico de la unión.

Composición de nudo: unión madera-madera con clavija, en simetría y cortadura doble (Figura 4-1).	
• Clase resistente según Tabla 3-1 de la norma (DB SE M, 2009) y (UNE-EN 1194, 1999).	QL24h conífera
• Densidad característica.	$\rho_{g,k} = 350 \text{ kg/m}^3$
Geometría para escuadrías disponibles de fabricante, según Tabla 3-5.	
o Espesor de piezas laterales.	$t_1 = 100 \text{ mm}$
o Espesor de pieza central.	$t_2 = 200 \text{ mm}$
• Coeficiente parcial de seguridad para la resistencia de aplastamiento en la madera (Argüelles et al., 2003).	$\gamma_m = 1,3$
• Ángulo que forman las direcciones de la fibra de madera entre las dos piezas.	$\alpha = 0^\circ$
Clavija de acero con calidad 5,6 según Tabla 3-22, norma UNE-EN ISO 898-1.	
• Acero según la norma UNE-EN ISO 898-1 (Tabla 3-21).	calidad 5.6
• Diámetro de clavija.	$d = 10 \text{ mm}$
• Tensión de fluencia en el acero.	$f_y = 300 \text{ N/mm}^2$
• Tensión última del acero.	$f_u = 500 \text{ N/mm}^2$
• Coeficiente parcial de seguridad para el acero (Argüelles et al., 2003).	$\gamma_a = 1,1$
Estado de carga.	
• Clase de servicio 1 con madera laminada y duración de carga media, según Tabla 2-17.	$k_{mod} = 0,8$
Efecto soga por elementos de refuerzo.	
• Pernos de varilla roscada con tuerca-arandela en sus extremos.	No
• Adherencia en axil en la clavija propagada desde el adhesivo.	No
Fricción en zonas de contacto.	
• Fricción en la superficie madera-clavija.	$\mu_{m-a} = 0$
• Refuerzos en la superficie de las intercaras de madera por la superposición elementos (placas clavo, conectores o similares).	No
• Fricción en la superficie de las intercaras de la madera.	$\mu_{m-m} = 0$

6.4.4.1 Elementos complementarios

Aparte del caso base, se estudiaron probetas con diversos refuerzos y modificaciones. En la Figura 6-60 se muestran las curvas carga desplazamiento de varias de las probetas ensayadas. En concreto son distintas variantes de la unión, todas ellas con barra roscada tipo M10 de $d_{int} = 7,9 \text{ mm}$ (verificado con el proyector de perfiles), en un caso aplicándole un refuerzo de tipo adhesivo y en el otro añadiéndole tuerca-arandela en los extremos de la varilla. A continuación se indican las características concretas de los tres casos:

- Probeta P013 [M02], con varilla roscada de métrica M10.
- Probeta P016 [M01], con adhesivo sobre la misma varilla roscada.
- Probeta P026 [M03], con la misma varilla de M10 y la fijación tuerca-arandela.

La evolución de las gráficas de ensayo es semejante en otras probetas y también para los ensayos con madera GL24h. En ellas se puede ver cómo, debido a la introducción del adhesivo (alrededor de los 14 mm), la carga alcanza valores mayores que en el sistema tuerca-arandela. Tras el fallo del adhesivo, el sistema tuerca-arandela es mucho más estable, pues la arandela recoge gran cantidad de energía (al deformar la madera mediante el efecto soga definido en (DB SE M, 2009). Por tanto, vuelve a comprobarse que también para la madera maciza el uso de estos sistemas de refuerzo permite mejorar la resistencia de la unión y reducir el diámetro de la clavija y la sensibilidad de fallo por

aplastamiento en la madera. La introducción de varilla roscada a lo largo de todo el agujero mejora la fricción superficial con la madera, acercándose al comportamiento de clavos y tirafondos.

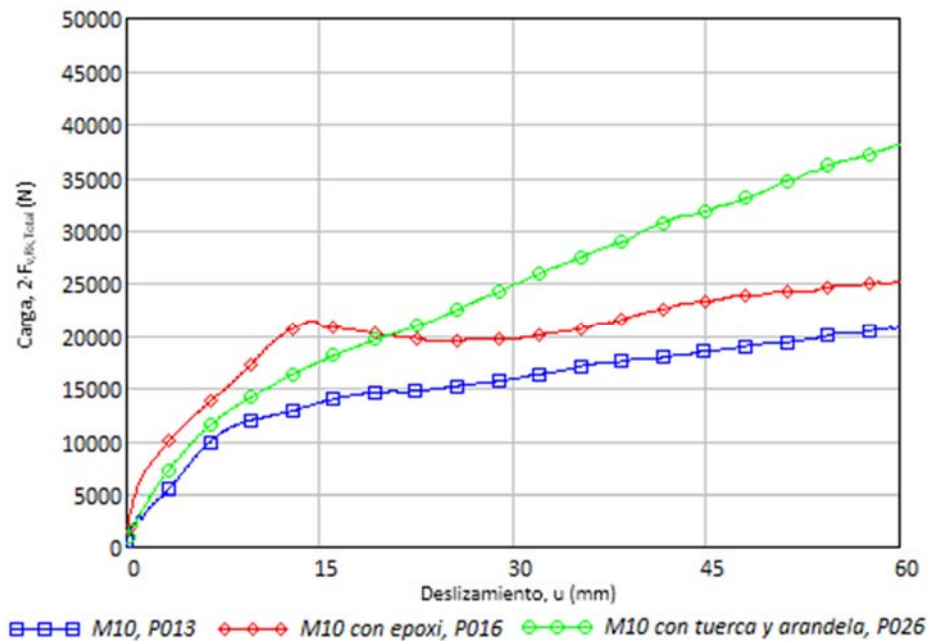


Figura 6-60. Gráfica de carga frente a deslizamiento.

6.4.4.2 Variaciones de espesor de madera en piezas laterales (t_1)

Se han ensayado varias series de muestras, con el fin de analizar la influencia del espesor de la madera de las piezas laterales (t_1). Se han modificado las escuadrías (como muestra la Figura 6-61), buscando ratificar los resultados que se obtuvieron aplicando las ecuaciones analíticas (DB SE M, 2009) estudiadas en el Apartado 6.2.1.1 sobre el efecto de t_1 . Se confirma que la variación de este parámetro no tiene gran relevancia la capacidad de carga, pues se obtienen gráficas muy parecidas para todas las muestras al cambiar t_1 . Se puede ver en la variación de espesor de piezas laterales para las probetas P006 [M20], P005 [M55], P004 [M56] y P013 [M02], donde el espesor t_1 toma los valores 70, 80, 90 y 100 mm respectivamente. Las cuatro muestras evolucionan con un modo de fallo 4 de forma prácticamente análoga.

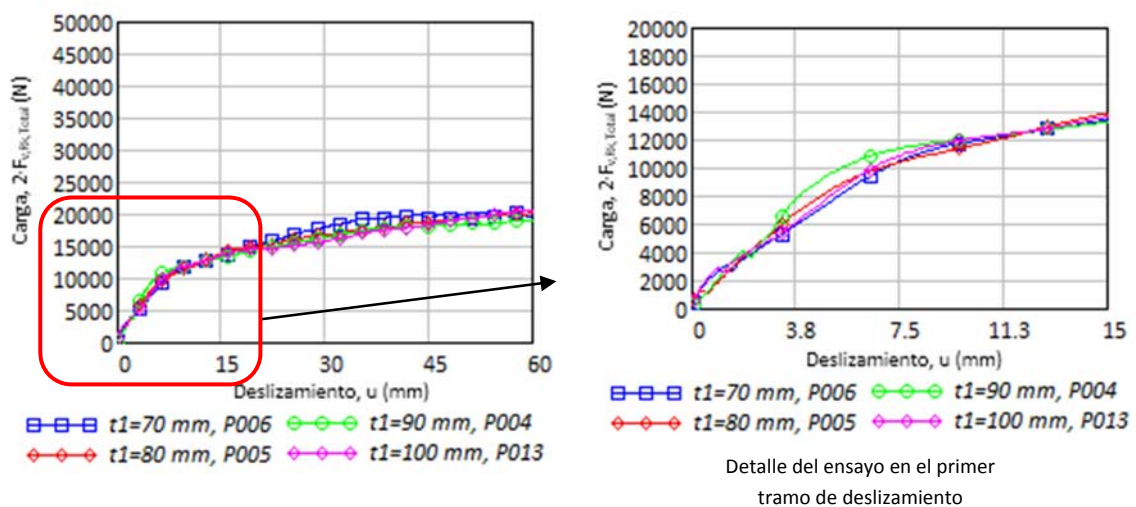


Figura 6-61. Ensayos con variaciones de espesor de la madera lateral (t_1).

La Tabla 6-19 refleja los valores de capacidad de carga con los cálculos analíticos, la limitada por ensayo y una primera aproximación a la rigidez de la unión mediante el cálculo del cociente entre la carga (N) y el desplazamiento (mm).

Al definir un primer tramo donde se puede aproximar la curva de carga-deslizamiento por una recta y compararlos con la evolución real de las curvas de carga respecto a deslizamiento, se observa que para las muestras con adhesivo la pendiente alcanza hasta un desplazamiento de 13 mm, es decir, en torno a tres veces más que el resto de las muestras, que se encuentran alrededor de los 6 mm. En las clavijas con tuerca-arandela se observa un comportamiento más alejado de la línea, lo que parece indicar una plastificación progresiva y por lo tanto que la pendiente definida por los puntos de origen y de capacidad de carga máxima según ensayo sean menos representativos del comportamiento real de la unión.

Tabla 6-19. Valores de carga y deslizamiento ante variaciones de espesor t_1 (1 % de desviación de la pendiente).

Probeta		t_1, t_2, d (mm)	Carga (N)	Deslizamiento (mm)	Pend. (N/mm)	$2 \cdot F_{V,Rk}$ (mm)	F_{max} (mm)
Barra roscada	P13	100,200,10	10.367	7,85	1321	8.778	13.686
	P04	90,200,10	8.542	4,38	1950	8.778	13.331
	P05	80,200,10	8.011	5,03	1593	8.778	13.969
	P06	70,200,10	9.573	7,42	1289	8.778	13.461
	P29	40,200,20	8.328	4,27	1951	22.606	29.175
Adhesivo	P16	100,200,10	14.193	13,08	1085	8.821	21.059
Tuerca-arandela	P26	100,200, 10	12.538	10,93	1147	8.821	17.524

En la Figura 6-62, se muestran por un lado las curvas carga deslizamiento para las probetas de varilla roscada M20 (en concreto las probetas P029, [M19] y P012, [M13]), y por otro para las probetas de la misma métrica de varilla pero con refuerzo de adhesivo epoxi (P031, [M18] y P021, [M12]) con espesores de las piezas laterales (t_1) de 40 y 100 mm. Para las probetas de espesor $t_1 = 40$ mm (marcadas con cuadrado y cruz), el modo de fallo 3 es predominante y la capacidad de carga se ve sensiblemente reducida. Se ha de reseñar también cómo las crestas, que en casos anteriores aparecían para el adhesivo epoxi, ya no se desarrollan. Teniendo en cuenta que el diámetro ha aumentado, parece que la rigidez de la clavija predomina y el adhesivo se despegas antes de trabajar con esfuerzos cortantes entre las superficies de la clavija y del agujero, lo que permite generar el efecto sogas. El momento en que se despegas el adhesivo se puede relacionar con crestas de carga que se pueden observar con mayor claridad para diámetros menores de clavija y modos de fallo 4 (véase el comportamiento de clavijas roscadas de M10 en la Figura 6-49). Estas crestas son menos relevantes cuando el efecto cortante en el adhesivo no tiene tanta influencia, como puede observarse en la probeta P021 [M12], donde se presenta el modo de fallo 3, y donde, aunque inicialmente el adhesivo aporta rigidez a la unión, una vez perdida la adherencia, esta unión tiende a evolucionar con el aumento del deslizamiento acercándose al comportamiento de unión con clavija simple sin adhesivo.

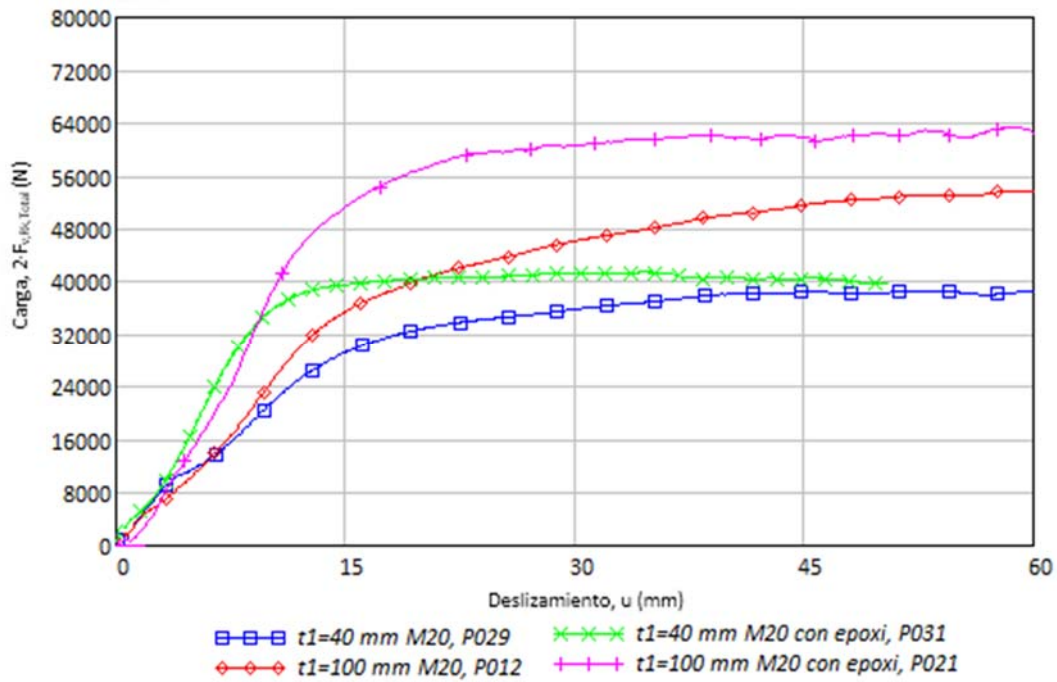


Figura 6-62. Ensayos con variaciones de espesor de la madera lateral (t_1).

Comparando las curvas de carga-deslizamiento de los ensayos (Figura 6-62) con las secciones transversales de las probetas una vez ensayadas (Figura 6-63), se identifica predominantemente un modo de fallo 3 (sin la aparición de rótulas plásticas en las piezas de madera laterales (t_1)). Se considera que el dimensionado en este modo de fallo no optimiza la unión, ya que la clavija trabaja menos que las piezas de madera y no se genera plastificación en las zonas laterales de la clavija. La solución sería incrementar la escuadría de madera lateral (t_1). Sin embargo, como se vio en el Apartado 6.2.1.1, parece más aconsejable actuar sobre el diámetro que sobre el espesor, porque permite mayores incrementos en la capacidad de carga. Además, modificar las dimensiones de piezas de madera normalmente es imposible ya que las escuadrías vienen impuestas por el diseño de la estructura global a la que pertenecen.



Figura 6-63. Sección transversal de probetas, con distintos espesores de madera lateral (t_1).

6.4.4.3 Variaciones de diámetro (d)

En este apartado se exponen los resultados de los ensayos sobre madera maciza al variar el diámetro de la clavija. Los resultados que se presentan son los correspondientes a las siguientes configuraciones:

- En la Figura 6-64 A) para diámetros 10, 16, 20, 24 y 30 mm de clavija roscada, con las probetas P013 [M02], P002 [M11], P012 [M13], P01A [M15] y P023 [M17] respectivamente.
- En la en la Figura 6-64 B) para diámetros de clavija roscada 10, 16, 20, 24 y 30 mm, con adhesivo epoxi, con las probetas P016 [M01], P010 [M10], P021 [M12], P008 [M14] y P009 [M16] respectivamente. Además esta figura incluye la probeta P026 [M03], de clavija roscada de 10 mm con tuerca-arandela.

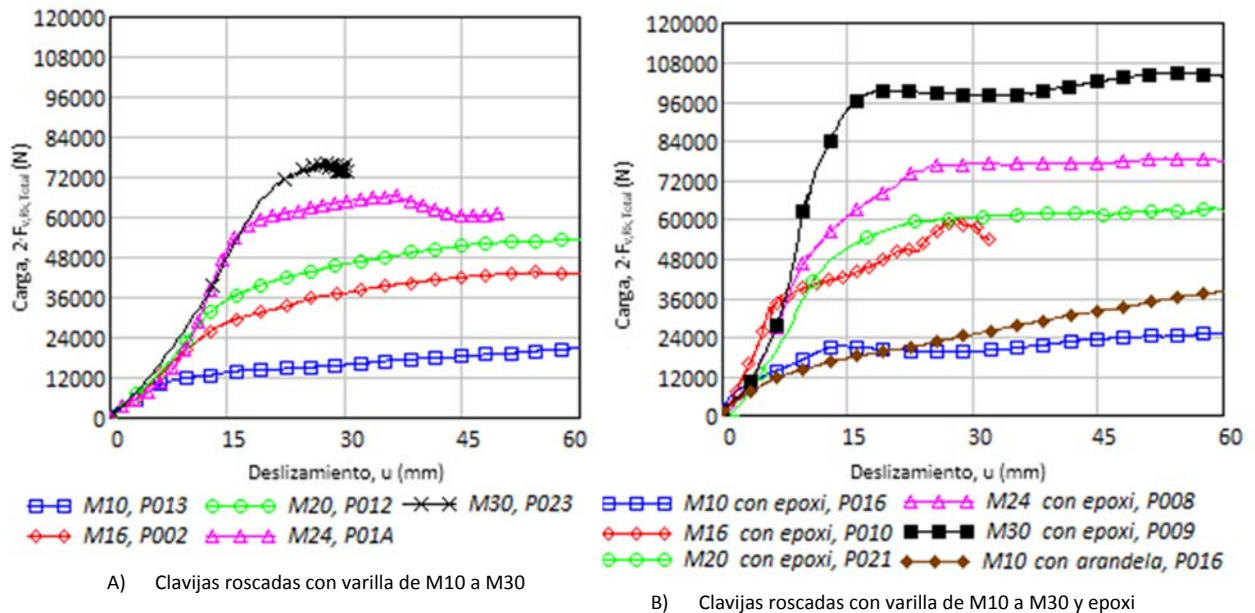


Figura 6-64. Ensayos con variaciones de diámetro de la clavija.

Como era de esperar, al aumentar el diámetro del perno, aumenta la resistencia de la unión. También el uso de adhesivo epoxi HILTI RE 500 (caracterizado en el Capítulo 3) mejora el comportamiento para probetas con valores análogos del diámetro. En la Tabla 6-20 se analiza la curva de la carga-desplazamiento y su pendiente, en el tramo previo a la meseta de plastificación, pudiéndose apreciar el incremento de la rigidez del nudo con el incremento del diámetro del perno y la introducción del epoxi.

Tabla 6-20. Valores de carga y desplazamiento ante variaciones de diámetro (d).

Probeta		t_1, t_2, d (mm)	Carga (N)	Desplazamiento (mm)	Pend. (N/mm)	$F_{v,Rk}$ (mm)	F_{max} (mm)
Barra roscada	P13	100,200,10	9.305	6,27	1484	8.778	13.686
	P02	100,200,16	21.305	8,23	2589	20.451	28.743
	P12	100,200,20	29.310	9,72	3015	27.532	35.567
	P1A	100,200,24	46.987	11,69	4019	35.833	44.630
	P23	100,200,30	57.522	13,75	4183	40.655	49.748
Adhesivo	P16	100,200,10	14.193	13,08	1085	8.821	21.059
	P10	100,200,16	35.348	6,02	5872	20.491	42.863
	P21	100,200,20	37.439	12,03	3112	33.372	51.069
	P08	100,200,24	56.987	14,49	3933	42.442	61.158
	P09	100,200,30	96.522	15,75	6128	59.254	93.880,

Teniendo presente que la clavija está roscada, se reduce el diámetro de clavija frente al de agujero en el ratio $d/d_{int}=16\%$, según los valores expuestos en el Apartado 3.4.1. A pesar de ello, la capacidad de carga de la unión (F_{max}) calculada a través de las ecuaciones analíticas para desplazamiento de 15 mm es muy conservadora, como se puede apreciar en la Figura 6-65. Esto se acentúa aún más si cabe en los casos de probeta con epoxi.

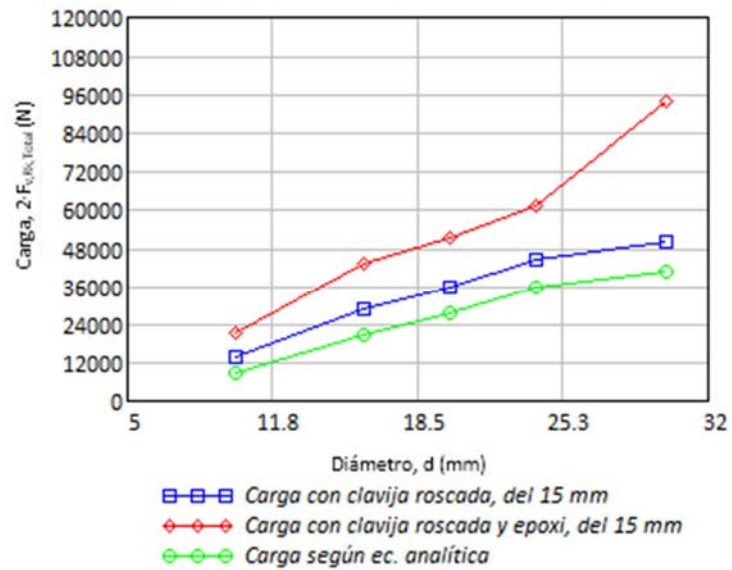


Figura 6-65. Capacidad de carga frente a variación de diámetro (d).

6.4.4.4 Variaciones de ángulo de fibra

Se han comparado las variaciones en la capacidad de carga de la unión al variar el ángulo de la fibra para α igual a 0° , 45° y 90° , con las siguientes probetas:

- roscadas, P13 [M02], P38 [M05] y P33 [M08], representadas en azul.
- roscadas con refuerzo de adhesivo epoxi, P16 [M01], P43 [M04] y P36 [M07], representadas en rojo.
- roscadas con refuerzo de tuerca y arandela en los extremos, P26 [M03], P40 [M06] y P35 [M05], representadas en verde.

En la Figura 6-66 se muestran las gráficas de los ensayos, que se podrían comparar con los resultados de las ecuaciones analíticas vistas en el Apartado 6.2.1.3. En él se apreciaba una ligera disminución en la capacidad de carga de la unión a medida que el ángulo se acercaba a los 90° . Sin embargo, esta situación no se da de una forma clara en los resultados experimentales.

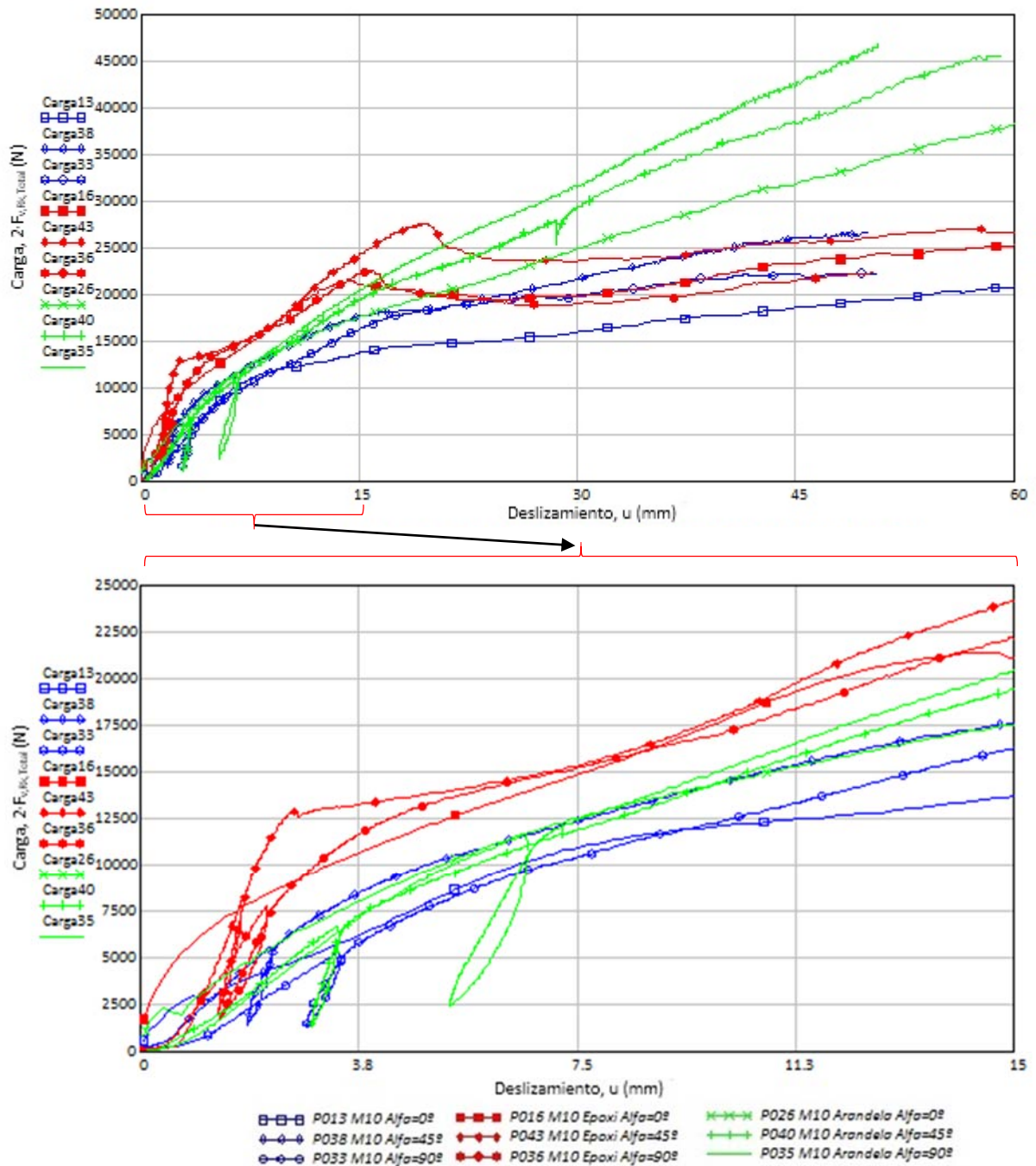


Figura 6-66. Ensayos con variaciones en la orientación de fibra (α).

De la revisión de los resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Para pequeños deslizamientos, tiene más influencia el asentamiento de la unión, sobre todo en las probetas con sistemas roscados sin epoxi, como se puede ver al variar el deslizamiento desde 0 hasta 15 mm en la Figura 6-66.
- A medida que el deslizamiento evoluciona, la capacidad de carga de la unión aumenta; y también aumenta con ángulos de la fibra (α) mayores. Es decir, si se comparan en la imagen superior de la Figura 6-66, las probetas con $\alpha = 0^\circ$ (P026), $\alpha = 45^\circ$ (P040) y $\alpha = 90^\circ$ (P035), se aprecia que al aumentar el valor del ángulo de orientación de la fibra (α) mejora en la capacidad de carga de la unión, especialmente cuando el deslizamiento (u) es más elevado.

El primer punto resulta obvio si se tiene en cuenta que las fibras deben ajustarse al contorno de roscado. Mientras que el segundo punto resulta más interesante, al no ser el efecto previsto teniendo en cuenta los resultados analíticos. Si se observan los ensayos de las probetas con tuerca-arandela, donde este efecto es más acentuado, se puede ver que las zonas de aplastamiento son mayores a medida que se incrementa el deslizamiento y las curvas divergen. Por otro lado, el aplastamiento de arandela contra madera permite ver que las fibras tienden a romper por cortante (cuando están dispuestas en sentido perpendicular al desplazamiento de la superficie de contacto con el metal), lo que puede motivar la desviación que se puede apreciar en los detalles de la Figura 6-67.

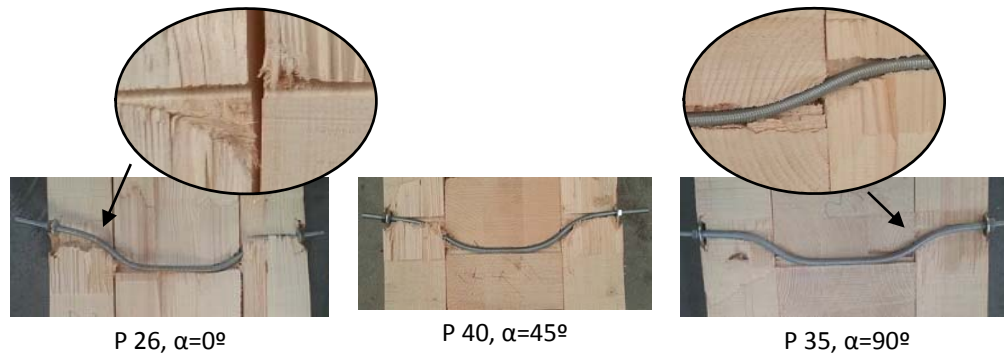


Figura 6-67. Ensayos con variación del ángulo de la fibra (α).

En el caso en que las fibras estén alineadas ($\alpha = 0^\circ$), la clavija provoca un aplastamiento que a su vez supone un desplazamiento de las fibras en la dirección de la carga, que puede dar lugar a fallos en planos de cortante (definidos en la Figura 5-40). En definitiva, deslizan unos sobre otros en la misma dirección de la carga para dar lugar a la plastificación de la madera. Pero a medida que α aumenta, y las fibras se sitúan con una orientación perpendicular a la carga ($\alpha = 90^\circ$) según se puede ver en la Figura 6-68, el comportamiento tensional predominante desencadena una serie de fases a medida que aumenta el deslizamiento en la unión:

- Se produce un aplastamiento en dirección perpendicular a la fibra, que se localiza de forma predominante en la generatriz superior de la clavija (Zona 1).
- A medida que la clavija avanza en deslizamiento, la zona de contacto sometida a compresión plastifica y el estado tensional da lugar a esfuerzos característicos de flexión, a la vez que las fibras plastificadas se ven obligadas a desplazarse en dirección de la carga (Zona 2).
- Los desplazamientos de las fibras en la zona plastificada obligan a propagar efectos de tracción a lo largo de la fibra hacia las vertientes de la clavija (Zona 3).
- Cuando el volumen de madera y la magnitud de estas tensiones aumenta, puede ocurrir que las fibras se rompan al verse sometidas a una tracción superior a su límite de resistencia o que propaguen el estado tensional hacia los laterales de la zona de carga (Zona 4), donde comienzan a aparecer estados tensionales predominantemente de tracción en dirección perpendicular a la fibra, que provocaría el inicio de fallo por hienda si la longitud a testa es suficientemente pequeña.

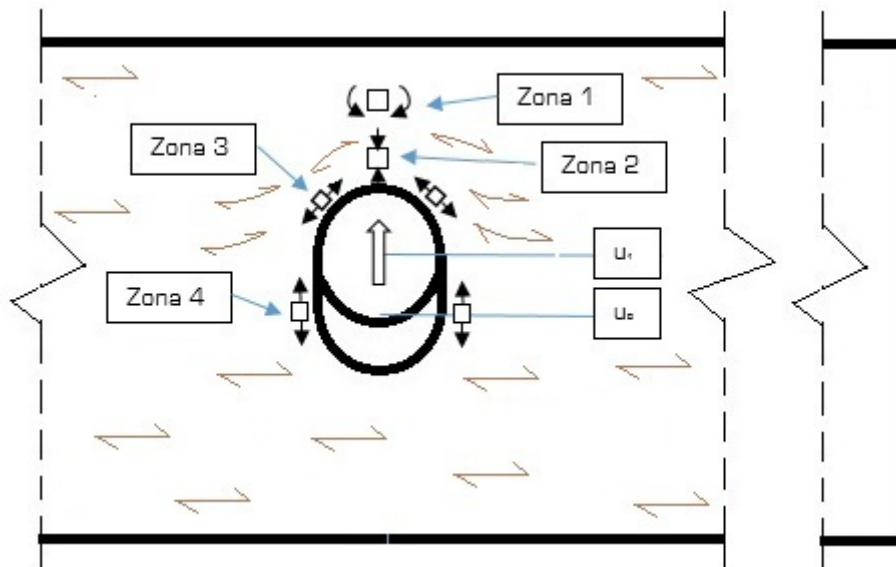


Figura 6-68. Esfuerzos dominantes relacionados con la posición de las fibras de madera expuestas a plastificación ($\alpha = 90^\circ$).

En la Figura 6-68 se representan los esfuerzos dominantes de modo esquemático. Los valores de resistencia característica descritos en la Tabla 2.9 para madera GL24h (semejantes a los de madera C24 de la Tabla 2-10) pueden indicar cómo cada zona y tipo de esfuerzo tiene una capacidad para recoger energía:

- Con la orientación de las fibras de madera perpendiculares a la carga en la unión ($\alpha=90^\circ$); el valor de la resistencia a compresión perpendicular es $f_{c,90,k} = 2,7 \text{ N/mm}^2$ (Zona 2). Con mayores deslizamientos u_1 aparecen zonas expuestas a resistencias características de flexión (Zona 1), lo que supone una resistencia característica de $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$, que deriva en la propagación en ambos flancos de la clavija (Zona 3) con tensiones predominantes de tracción en la dirección de la fibra que presentan una resistencia característica $f_{t,0,k} = 16,5 \text{ N/mm}^2$
- Con la orientación de las fibras de madera alineadas con la carga ($\alpha = 0^\circ$), el valor de la resistencia a compresión paralela es $f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$, la resistencia característica a cortante $f_{v,k} = 4 \text{ N/mm}^2$ y la de tracción en los laterales alineadas con la dirección de la fibra tendría una resistencia características de $f_{t,0,k} = 16,5 \text{ N/mm}^2$.

La hipótesis de laja plana asumida en la norma (DB SE M, 2009) hace uso de la resistencia de cálculo a aplastamiento ($f_{h,\alpha,k}$) como un valor simplificado del estado tensional. La laja supone la exposición a una carga uniformemente distribuida en una superficie plana (de ancho igual al diámetro) que no interacciona con el material que queda a ambos lados de la clavija. Por ello, a medida que aumenta ángulo (α), se penaliza la capacidad de carga en la unión (como se vio en el Apartado 6.2.1.3). Pero en realidad la unión sí está afectada por el comportamiento de las fibras, especialmente si son transversales a la laja de madera desarrollada en dirección de la carga, y esto supone que la resistencia en la madera no tiene por qué disminuir con el aumento de α , especialmente cuando el deslizamiento en la unión es mayor.

En consecuencia, estos ensayos vienen a exponer que, con el incremento del ángulo de la orientación de la fibra de la madera (α) y con grandes deslizamientos, puede mejorar la capacidad de carga de la unión a la vez que se hace más presente el riesgo de fallo por hienda en un plano perpendicular a la dirección de la carga.

6.4.5 Evolución de la clavija durante el ensayo

6.4.5.1 Consideraciones al material de la clavija. La tensión $f_{u,k}$

La propuesta analítica, recogida en la normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), en su Apartado 8.5.1.1, considera la resistencia de la clavija, en lo referente al cálculo del momento plástico ($M_{v,Rk}$), como una función de la tensión última del acero ($f_{u,k}$). Por su parte, otras normativas (UNE-EN 409, 1998) lo determinan a partir de ensayo; sin embargo, aunque la clavija pueda presentar plastificación, no alcanza su límite último de rotura. Por esto, la tensión última no se llega a dar, e introducir este valor como variable de cálculo podría ser contraproducente, dado que podría inducir a intentar mejorar la capacidad de carga de la unión incrementando $f_{u,k}$. Por ejemplo, por endurecimiento, como ocurre en las clavijas que han sido calibradas con un procedimiento mecánico y sin recocido para lograr una sección más uniforme y dureza en decremento de la ductilidad. Esto supone fragilizar el acero, cuando los criterios de seguridad tienden a buscar un comportamiento dúctil, que “avise” de una posible rotura y disponga de un periodo amplio de fluencia y plastificación para recoger energía. Una de las directrices comunes al cálculo estructural que ha sido contemplada en otras normas afines, como para el acero (DB SE A, 2009), supone limitar los tipos de acero y las características mecánicas mínimas (entre ellas, el límite elástico y el límite último), y debiera de aplicarse también para clavijas de acero en madera.

En base a la anterior apreciación, se han introducido en las probetas que se han ensayado aceros normalizados para la construcción y se han comparado con otros menos dúctiles. Según lo indicado en el Apartado 3.4.4.1 y los resultados derivados del ensayo de tracción simple (reflejado en la Figura 6-49), se han empleado clavijas de aceros de calidad 5.6, S 275 y F111, estas últimas calibradas.

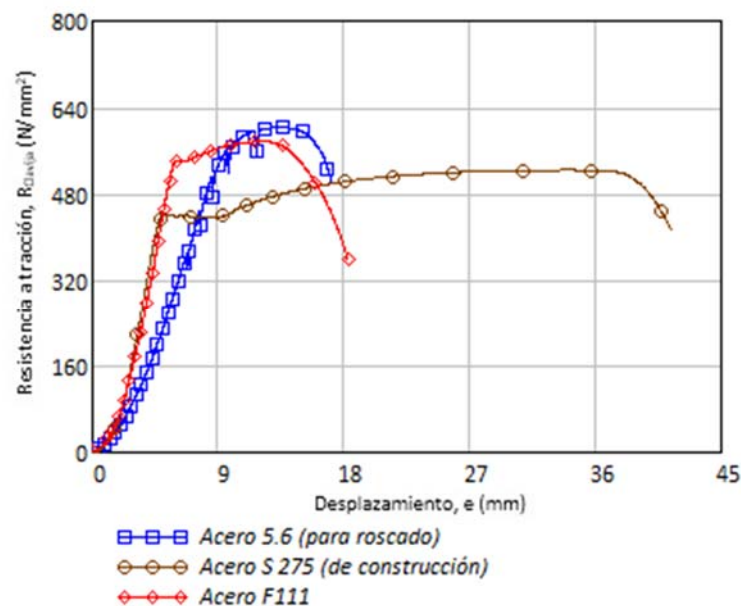


Figura 6-69. Ensayos de tracción simple en barras de diámetro normalizado 10mm. Comparativa de varilla roscada comercial, normalizada S275 y calibrada de tipo F111.

Usando clavijas de los materiales indicados, se han preparado probetas y muestras como las de los ensayos P063 [M31], P057 [M30] y P056 [M29] respectivamente. La finalidad de estos ensayos era analizar el comportamiento de probetas con clavijas de aceros con distintas tensiones últimas ($f_{u,k}$). En la Figura 6-70 se muestra la evolución de la resistencia de la unión para el caso de clavijas roscadas. Para el caso de material S 275 y F111, se parte de varillas lisas y se genera la rosca con geometría métrica M10 mediante mecanizado con terrajas.

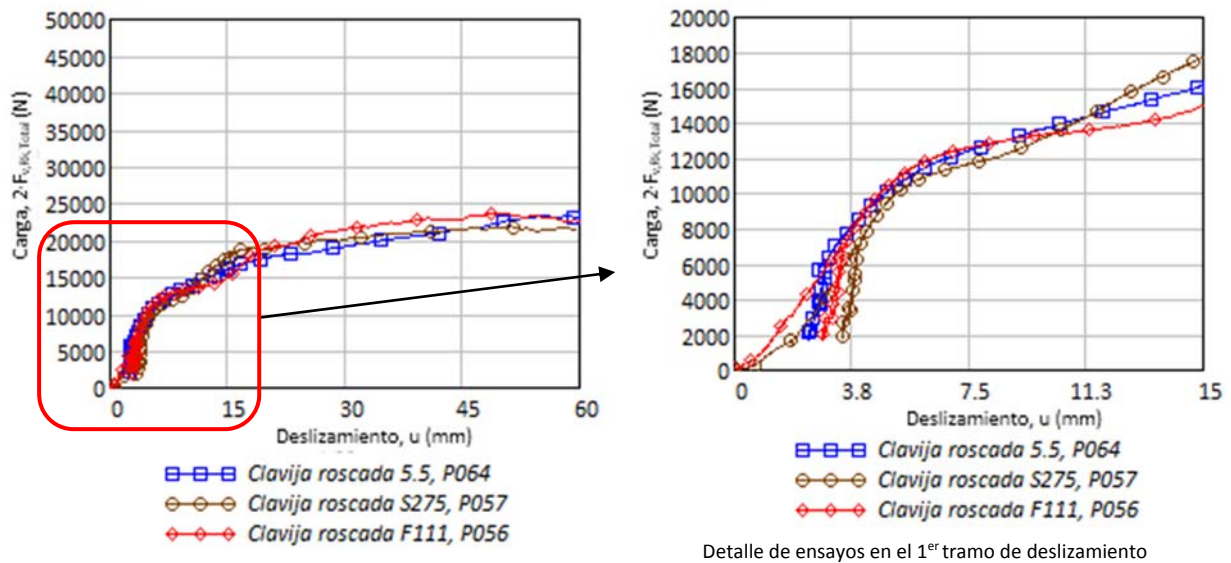


Figura 6-70. Resistencia en la unión para distintos aceros de clavija roscada.

Entre las probetas fabricadas con clavijas de acero S275 (en adelante normalizado) con valores de $f_y = 443 \text{ N/mm}^2$ y $f_u = 521 \text{ N/mm}^2$ y con acero F111 (en adelante calibrado) de resistencias $f_y = 545 \text{ N/mm}^2$ y $f_u = 576 \text{ N/mm}^2$, no se aprecian mejoras de resistencia en la unión, a pesar de que el segundo tiene valores de tensión última ($f_{u,k}$) más altos. Esto lleva a pensar que, en la unión, es más interesante un comportamiento dúctil capaz de recoger mayor energía.

Para ratificar los anteriores resultados, se compararon también varillas de diámetro $d = 10 \text{ mm}$ de acero normalizado y calibrado con la superficie lisa. En la Figura 6-71, se muestra la evolución de carga frente al deslizamiento para las probetas P135 [M25] y P145 [M26], donde se puede observar que el acero normalizado (S275) también muestra resistencias ligeramente mayores. Especialmente en la localización de la capacidad de carga (F_{max}) que, si se tratase según norma (UNE-EN 26891, 1992), quedaría situada en 15 mm de deslizamiento.

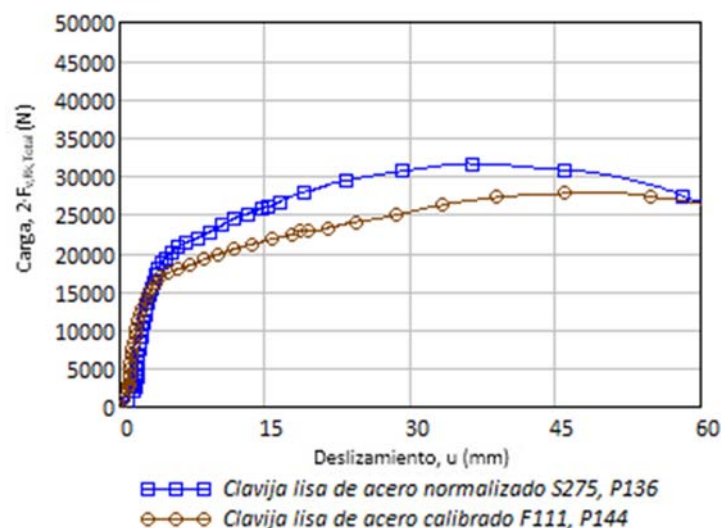


Figura 6-71. Resistencia en la unión para distintos aceros de clavija lisa.

Finalmente, partiendo de acero normalizado y calibrado liso, se le aplicaron procesos de moleteado con un doble motivo:

- Analizar si hay posibilidad de alteraciones resistentes por localización de tensiones provocadas por el estado superficial de la clavija.
- En previsión de que mejorara la resistencia de la unión por fricción entre las superficies de la clavija y el agujero.

Sin embargo, los ensayos han mostrado curvas semejantes a las clavijas lisas. En la Figura 6-72 se comparan: en azul las probetas lisas (P136 y P144), en magenta con aspa y cruz las moleteadas (P080 y P081) y más abajo, en verde, las roscadas (P56 y P57). A medida que se aplican procesos mecánicos que generan acritud, la capacidad de carga de la unión decrece, a pesar de que el moleteado mejoraría la fricción. Como en los casos anteriores, se confirma la necesidad del uso de materiales dúctiles y normalizados frente a aquellos cuya tensión $f_{u,k}$ sea alta, o hayan sido sometidos a tratamientos superficiales como el moleteado o el roscado respectivamente.

En resumen, en los ensayos P080 [M57] y P081 [M58] (donde se ha incrementado la rugosidad de la clavija), no se han apreciado mejoras significativas respecto a las correspondientes lisas, sino que por el contrario, han perdido capacidad de carga.

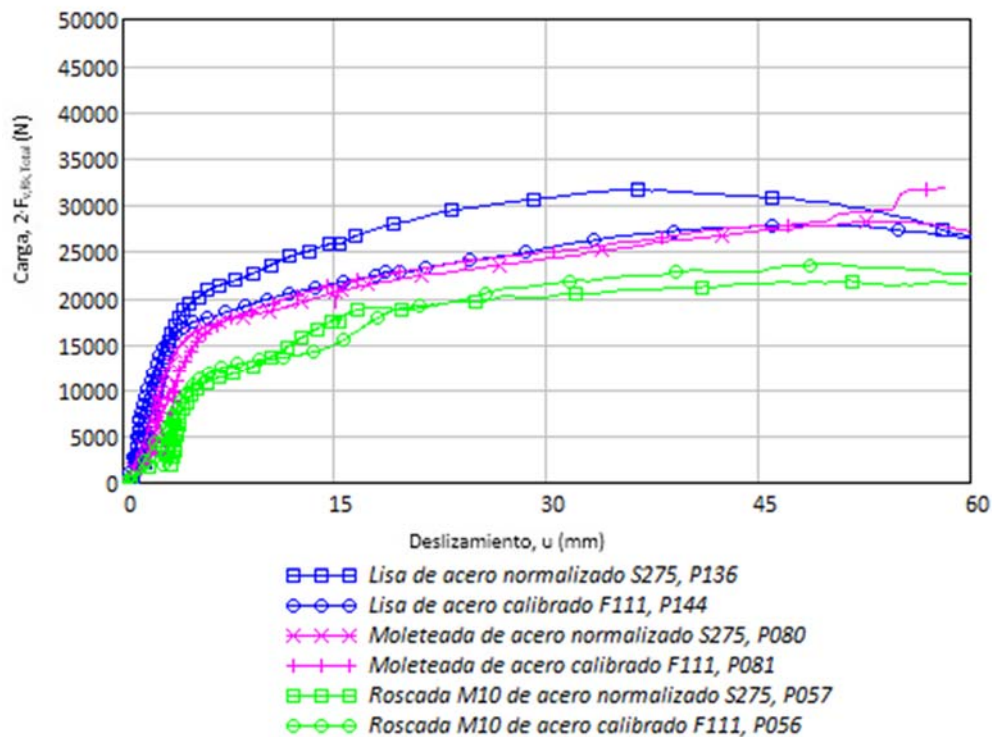


Figura 6-72. Curvas carga desplazamiento para distintos tratamientos superficiales de la clavija.

6.4.5.2 Evolución de la deformación de la clavija

Las siguientes figuras muestran la deformación de las clavijas roscadas (Figura 6-73), lisas y moleteadas (Figura 6-74) y, por último, con restricciones de desplazamiento (Figura 6-75) como pudieran ser:

- Adhesivo epoxi.
- Tuerca-arandela.
- Sistemas de expansión.

A pesar de que las figuras responden a deslizamientos extremos ($u = 60 \text{ mm}$), no se aprecian modificaciones en el ángulo de deformación. Dicho ángulo tiende a valores de $\theta = 45^\circ$, en coherencia con las apreciaciones hechas por otros autores (Blass et al., 2000).



Figura 6-73. Estado de deformación en clavijas roscadas sin refuerzos.

Sin embargo, el ángulo puede presentar modificaciones progresivas al cambiar el modo de fallo, cuando las zonas de aplastamiento (b_1) se ven afectadas por el espesor de la madera t_1 . Muestra de ello está en la Figura 6-56 con la probeta P083, o las probetas mostradas en la Figura 6-74, en las que se aprecia que la segunda modificación angular (propia del modo de fallo 3) está relacionada con la zona de contacto clavija-madera. Si la clavija queda embebida en la madera, las consecuencias son similares a las reducciones del espesor de madera lateral t_1 .

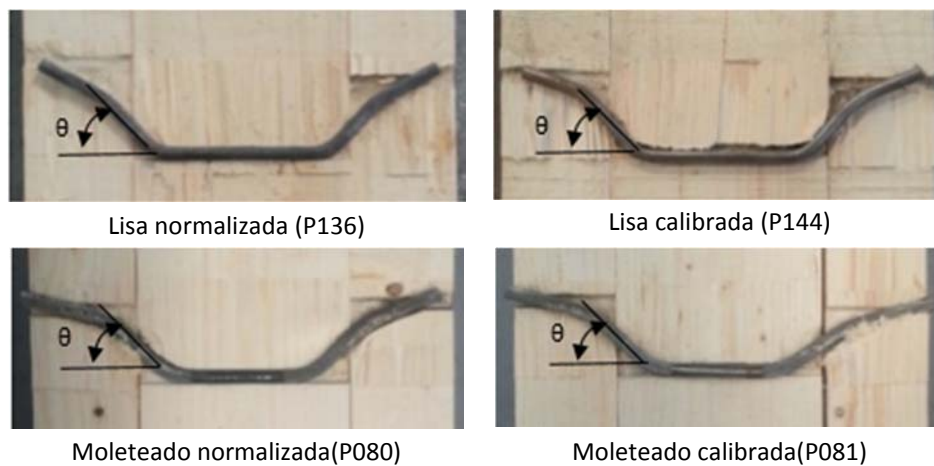


Figura 6-74. Estado de deformación en la clavijas de superficie lisa y moleteada sin refuerzos complementarios.

En el caso de introducir esfuerzos axiales, como pueda ser por adherencia de epoxi P44 [M24], o aplicación de refuerzo tuerca-arandela P082 [M37], las posiciones de rótula plástica y la igualdad de longitudes de las zonas de aplastamiento b_1 y b_2 ya no son tan nítidas, como se puede ver en la Figura 6-75. La deformación de la clavija está expuesta a solicitaciones combinadas derivadas de la presencia de la arandela (que incrementa la componente axial), lo cual provoca ángulos de deformación progresivos y altera las zonas de aplastamiento. Seguramente, éste sea uno de los motivos por los que estas probetas presentan un incremento continuo sin límite aparente en la capacidad de carga, en sustitución de la zona de meseta propia de clavijas sin este complemento.

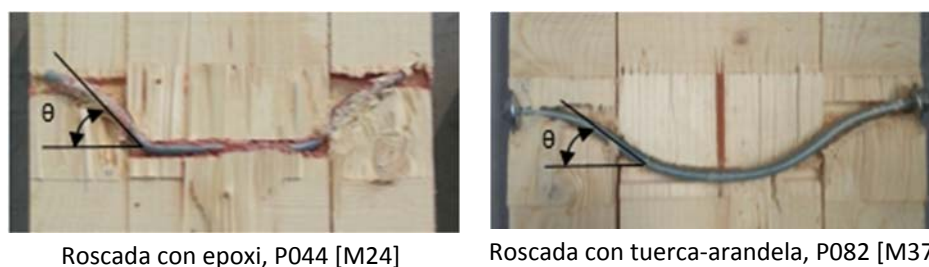


Figura 6-75. Estado de deformación en las clavijas roscadas y con refuerzo de adhesivo y tuerca-arandela respectivamente.

6.4.6 Espectro de resultados de los ensayos

6.4.6.1 Carga admisible de la unión

Con la intención de mostrar un resumen que permita comparar los resultados analíticos y experimentales de la capacidad de carga para los diferentes modelos de unión estudiados, se presentan en la Figura 6-76 y Figura 6-77 todos los valores obtenidos para esta magnitud. En ellas, la capacidad de carga de la unión, obtenida con las ecuaciones analíticas contenidas en la normativa, se representa con bandas azules, mientras que la capacidad de carga obtenida experimentalmente, para el límite de deslizamiento ($u = 15 \text{ mm}$), se representa con bandas granates. Como se mostró en los modelos base, el efecto sogá relacionado con algunas de las mejoras introducidas en la unión con la clavija tiende a limitarse a un porcentaje de la capacidad de extracción de un clavo. Lo que difícilmente refleja la realidad de los distintos refuerzos introducidos en las probetas sobre la unión (modificaciones de diámetro interior por roscado, introducción de epoxi, fijación de arandelas, conectores, superficies de clavija moleteadas, variación de límites elásticos en la clavija...). Por ello, se opta por trazar, con línea verde, el coeficiente de seguridad de la unión ($\gamma_{\text{Unión}_15}$), como una relación entre la capacidad de carga obtenida en cada ensayo (F_{max_15}) partido por el valor obtenido aplicando las ecuaciones de cálculo incluidas en la norma para los dos planos de la disposición simétrica ($2 \cdot F_{v,Rk}$), según la Ecuación 6-8.

$$\gamma_{\text{Unión}_15} = \frac{F_{\text{max}_15}}{2 \cdot F_{v,Rk}}$$

Ecuación 6-8

En la Figura 6-76 se evidencia que los coeficientes de seguridad que se derivan de la comparación de los cálculos analíticos y de los resultados de los ensayos divergen. Especialmente en las probetas en las que se añade adhesivo epoxi, donde se pueden identificar capacidades de carga hasta 5 veces mayores que las del resultado analítico. Por otro lado, un criterio de fallo constante como el de 15 mm de deslizamiento choca con la variabilidad con la que nos podemos encontrar en este tipo de uniones. Parecería razonable fijar un factor de proporcionalidad en función del tipo y de las dimensiones de la unión. También parece razonable volver a remarcar como la curva carga deslizamiento varía cuando se aplican refuerzos. Por ejemplo, cómo la capacidad de carga de uniones con tuerca-arandela puede seguir subiendo sin alcanzar una zona de pérdida de carga, al menos hasta los 60 mm de deslizamientos ensayados, y cómo las uniones que tienen adhesivo epoxi presentan bruscas caídas una vez que se propagan las pérdidas de adherencia en las superficies pegadas entre la madera y la clavija. En definitiva, estos resultados vienen a resaltar la necesidad de establecer criterios que fallo más ajustados que tengan en cuenta la evolución del deslizamiento y la rigidez de la unión a lo largo de toda la curva de ensayo. La teoría del rendimiento, fundamentada únicamente en estados de plastificaciones locales, se queda claramente corta para abordar toda la problemática indicada.

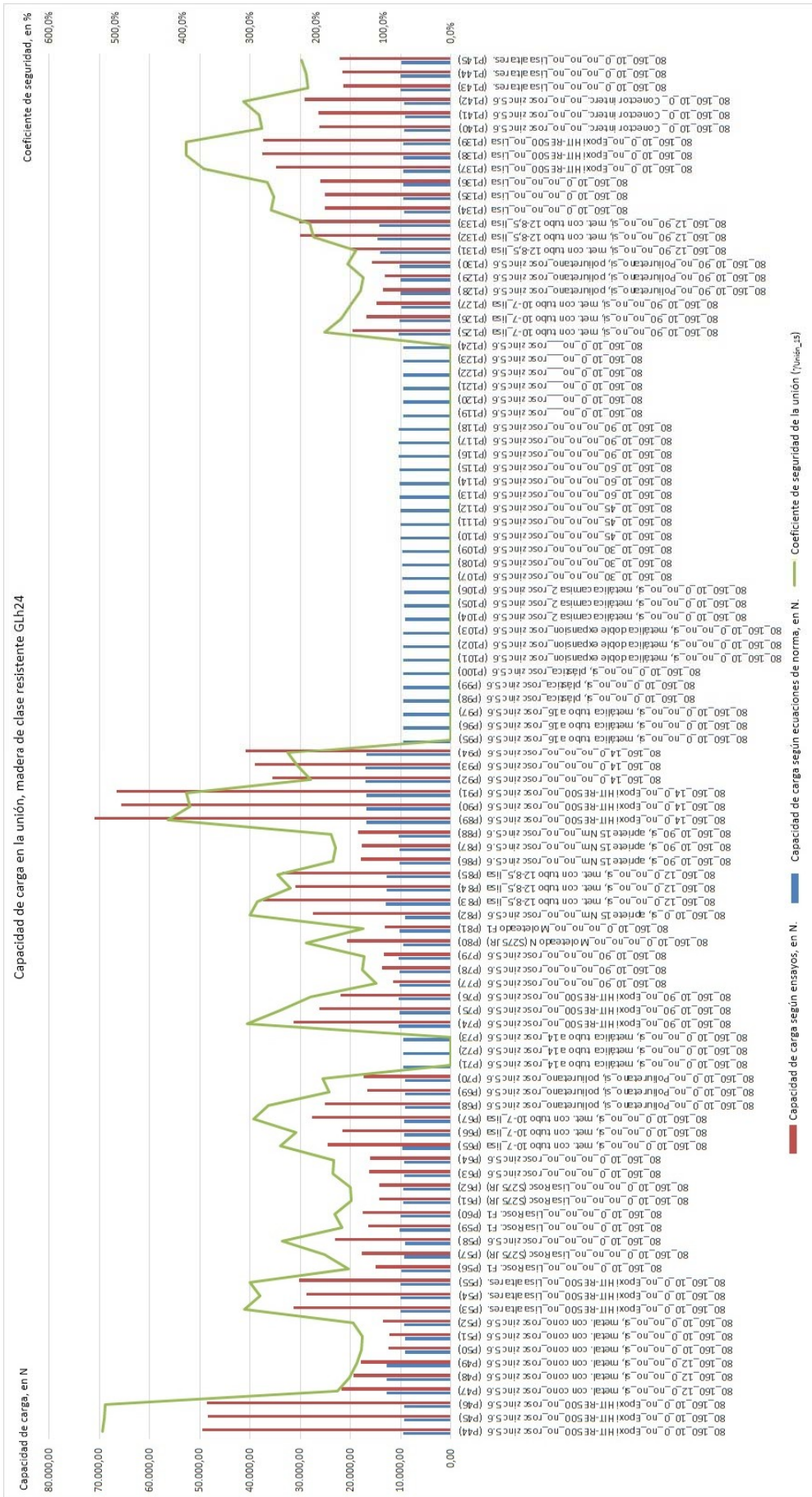


Figura 6-76. Capacidad de carga de la unión para probetas de madera laminada GL24h.

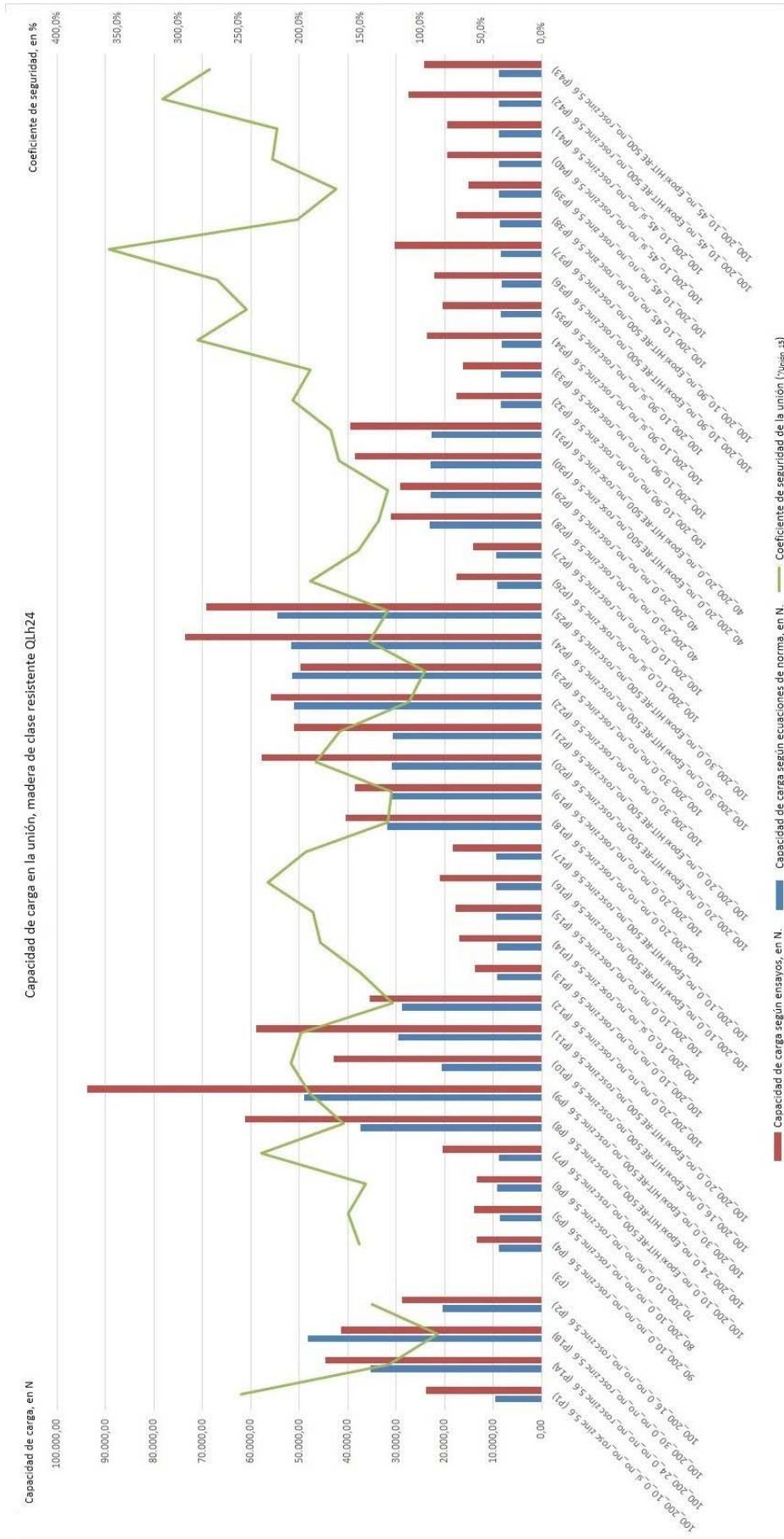


Figura 6-77. Capacidad de carga de la unión, probetas de madera aserrada QL24h.

6.4.6.2 Trabajo realizado por la unión

Fijar puntos límite de carga máxima (UNE-EN 26891, 1992) puede presentar inconvenientes al no aportar información sobre la ductilidad de la unión. Por otro lado, los valores de capacidad de carga (Figura 6-76 y Figura 6-77) pueden ser limitados, porque no aportan información sobre el comportamiento de la unión a medida que evoluciona en carga y deslizamiento. Esto hace aconsejable introducir resultados que indiquen la capacidad para recoger trabajo. Por ello, también se ha procedido a calcular el trabajo en la unión (Figura 6-78 y Figura 6-79) bajo los estados de carga y desplazamiento a los que está sometida. Este valor se calcula a partir de los valores de ensayo con operaciones de integración numérica, mediante técnicas de cuadratura que consideran la integral como suma de rectángulos simples, según la Ecuación 6-9. Dado que la función es habitualmente creciente, se trabaja con el valor de la carga en el punto "i", lo que sitúa el resultado del lado de la seguridad. Cuanto más pequeño sea el intervalo de deslizamiento ($u_{i+1}-u_i$) menor será el error. En este caso, se han tomado los intervalos suministrados por la máquina de ensayos con un orden de precisión de una centésima de milímetro.

$$W = \sum \frac{F_i}{u_{i+1}-u_i}$$

Ecuación 6-9

Siendo:

- W trabajo realizado por la unión.
- F_i carga sobre el nudo cada desplazamiento u_i .
- u_{i+1} deslizamiento en el punto $i+1$.
- u_i deslizamiento en el punto i .

Con estos valores se puede tener una información complementaria sobre la capacidad de carga de la unión. El dimensionado de la unión con materiales de alta rigidez podría presentar fallos bruscos (como el comportamiento descrito para las probetas con adhesivo epoxi). En este caso, sí parece razonable el criterio de fallo de desplazamiento límite de 15 mm. En cambio, el buen comportamiento de las uniones con tuerca-arandela a grandes desplazamientos, por encima incluso de 60 mm, hace razonable pensar en otro tipo de criterios como el planteado aquí de la capacidad de la unión para almacenar trabajo.

6.4.6.3 Deslizamiento y módulo instantáneo de deslizamiento

En cualquier elemento estructural es necesario establecer restricciones de rigidez. Un ejemplo de ello es el deslizamiento que se produce en las uniones. Teniendo en cuenta las expresiones analíticas que ya se comentaron en el Apartado 2.7.11, donde se reflejan las técnicas existentes para calcular el deslizamiento de la unión, y una vez aplicadas al modelo, se pueden comparar los resultados numéricos de tipo analítico y experimental. En el cálculo analítico se determina el valor del módulo instantáneo de deslizamiento (K_{ser}) mediante la Ecuación 6-10, función de la densidad de la madera y del diámetro de la clavija que relaciona carga y deslizamiento instantáneo (u_{ins}) según la Ecuación 6-11.

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \cdot \frac{d}{23} = 380^{1,5} \cdot \frac{10}{23} = 3.220,68 \frac{N}{mm^2}$$

Ecuación 6-10

$$u_{ins} = \frac{2 \cdot F_{v,Rk}}{K_{ser}} = \frac{9.956}{3.220,68} = 3,09mm$$

Ecuación 6-11

El deslizamiento instantáneo (u_{ins}) debe ser corregido considerando:

- La evolución de la deformación en el tiempo, que se determina haciendo uso de los coeficientes modificadores de deformación por fluencia (k_{def}), que para el modelo se fija en 0,6 (según la Tabla 2-22) para madera laminada encolada (y maciza) y clase de servicio 1 (ya que las probetas ensayadas no se van a tratar con otra clase de servicio), y en este modelo son iguales en las piezas de madera lateral y central.
- Las holguras de montaje ($h_{holgura}$) que también contribuyen al deslizamiento. Una vez analizados los ensayos, se fija con el un valor $h_{holgura} = 0,3$ mm. Resulta de interés fijar criterios (cuando no se disponga de ensayos) para identificar una holgura.

El deslizamiento final (u_{final}) se calcula según la Ecuación 6-12, tal y como se desarrolló en el Apartado 4.2.2.5.

$$u_{final} = u_{holgura} + u_{ins} \cdot \sqrt{(1+k_{def,1}) \cdot (1+k_{def,2})} = 0,3 + 3,09 \cdot \sqrt{(1+0,6)^2} = 5,25mm$$

Ecuación 6-12

Una vez calculado el deslizamiento final, se puede comparar con los valores de la curva carga-deslizamiento calculados según la normativa (DB SE M, 2009) y con los obtenidos de los ensayos experimentales (Figura 6-80). Esta misma figura muestra tanto el deslizamiento instantáneo (u_{ins}), representado por la línea recta de cuadrados, como el deslizamiento corregido en el tiempo (u_{final}), representado por la línea rombos. También se muestra en la figura el límite de carga ($2 \cdot F_{v,Rk}$) (segmento horizontal negro), calculado de forma analítica según norma (DB SE M, 2009) y la curva carga-deslizamientos obtenida experimentalmente (curva con marcadores de triángulos).

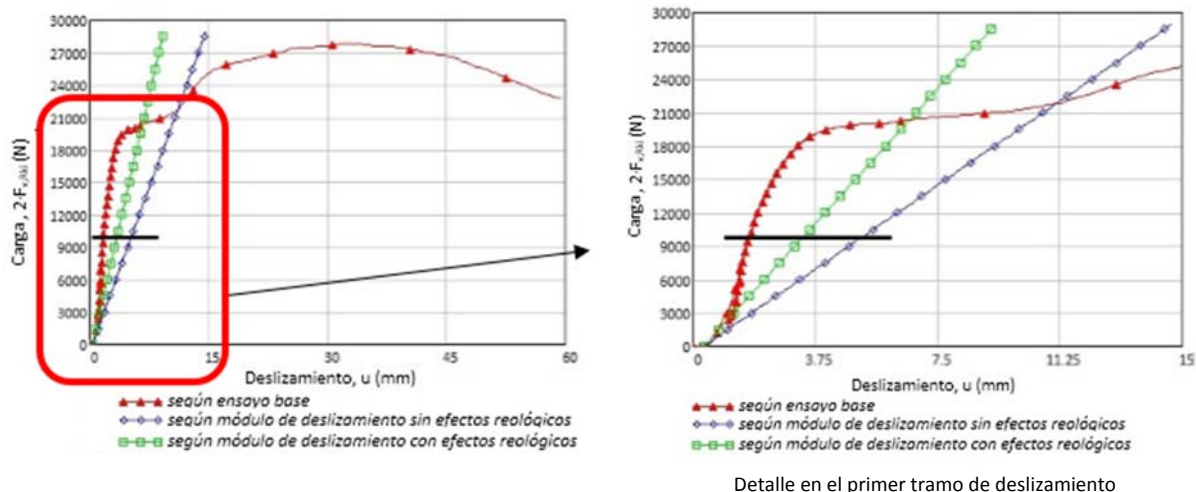


Figura 6-80. Comparación entre la curva carga-deslizamiento experimental y los desplazamientos instantáneo y final calculados según la normativa.

Analizando la Figura 6-80 se puede observar que, a igualdad de cargas, el deslizamiento real (valores de abscisa en la curva de ensayo) está muy por debajo del resultado analítico (valores de abscisa del punto de corte entre la capacidad de carga analítica y la línea recta); pero al incrementarse la carga, sobrepasando la capacidad de carga de ensayo (F_{max}), el deslizamiento real supera al calculado analíticamente (zona a la derecha de la intersección entre la curva de los ensayos y la recta de resultados analíticos).

Dicho de otra forma, al aplicar la Ecuación 6-11 para intentar determinar el deslizamiento (u) con la carga máxima de ensayo (F_{max} de 25.122,38 N para la probeta P135 [M25]), la expresión analítica responde con un deslizamiento muy por encima del real (expuesto en la Figura 6-80), y en todo el rango de cargas las funciones analítica y experimental se cruzan sin ajustarse.

La aplicación del módulo instantáneo de deslizamiento (K_{ser}) es delicada cuando se pretende emplear con los criterios de los estados límite últimos (ELU). Atiende a dos situaciones de exigencia estructural que no se deberían superar:

- Un deslizamiento superior a 15 mm porque, según la norma de ensayo (UNE-EN 26891, 1992), se considera que la unión ha fallado. Esto se da con una carga F_{max} de 25.122,38 N; pero, si se calcula con la Ecuación 6-11 introduciendo el deslizamiento $u = 15\text{mm}$ y el módulo instantáneo de deslizamiento $K_{ser} = 3.220,68 \text{ N/mm}$ (según la Ecuación 6-10), el resultado es de 48.312,9 N, muy por encima de los 25.122,38 N que nos muestra el ensayo, lo que no hace aconsejable emplear el módulo instantáneo de deslizamiento K_{ser} para determinar la capacidad de carga según ensayo F_{max} .
- Una carga superior a la de plastificación obtenida siguiendo los criterios analíticos (DB SE M, 2009). En este caso, el valor de la capacidad de carga máxima ($2 \cdot F_{v,Rki}$) es de 9.965N, lo que supone un deslizamiento de 2 mm según la curva del ensayo, mientras que con el obtenido con las ecuaciones analíticas haciendo uso del módulo instantáneo de deslizamiento (K_{ser}) se llega a un deslizamiento $u_{ins} = 3,39 \text{ mm}$. El deslizamiento final, junto con las holguras conocidas, dan lugar a un deslizamiento final $u_{final} = 5,25 \text{ mm}$ (según la Ecuación 2-14). En el ensayo (Figura 6-80) ya se han producido plastificaciones para deslizamiento de 5,25 mm, que se verían aumentadas si consideramos las deformaciones diferidas en el tiempo.

Partiendo de la Ecuación 6-11, representada para el caso de estudio particular en la Figura 6-80, se puede apreciar que K_{ser} define la pendiente constante y positiva de una línea recta, mientras que los resultados de los ensayos son una curva cuya pendiente varía llegando a valores negativos para grandes desplazamientos. El valor de la pendiente

(K_{ser}), según la Ecuación 6-10, se incrementa con el diámetro y la densidad de la madera, lo que es coherente con los resultados de los ensayos expuestos en Figura 6-64; sin embargo, el deslizamiento de la unión está influido por otras variables como:

- El tipo de material de la clavija, especialmente por su momento plástico y la ductilidad del acero.
- El diámetro interior de la clavija (d_{int}), si no coincide con el nominal (d), como es el caso de las clavijas roscadas o huecas.
- Los axiles asociados al efecto sogá (como los que aparecen al colocar las fijaciones en extremos de tuerca y arandela), la introducción de adhesivo en la clavija, el rozamiento o cualquier modificación que varíe la anchura de aplastamiento b_1+b_2 .

La norma (DB SE M, 2009) establece que se puede considerar el módulo instantáneo de deslizamiento (K_{ser}) (expuesto en el Apartado 2.7.11) como análogo al módulo de deslizamiento (k_s), según la norma de ensayo (UNE-EN 26891, 1992) que ya se comentó en el Apartado 5.2.2.3 dentro de la Tabla 5-6. Este parámetro se calcula a partir del triángulo ABC que se muestra en la Figura 6-81. En este triángulo se pueden identificar los siguientes segmentos:

- BC, que se corresponde al 40 % de la carga estimada (F_{est}).
- AB, que se corresponde al deslizamiento inicial modificado, donde la base se amplía y corrige con un coeficiente de mayoración de 4/3.

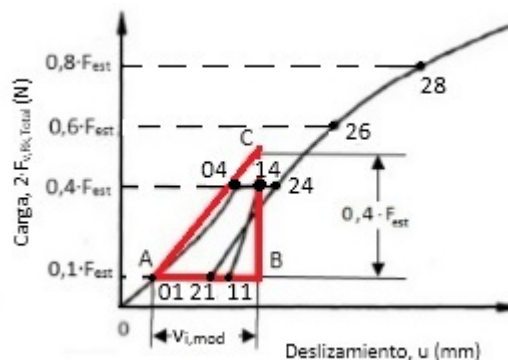


Figura 6-81. Cálculo de k_s a partir de la curva de ensayo.

Para comprobar si el valor de k_s coincide con K_{ser} , se calcularon sus valores para el modelo base (Tabla 6-1) y, posteriormente, se compararon con los resultados de distintas probetas. Para el modelo base (probeta P135), se obtiene un deslizamiento inicial modificado ($v_{i,mod} = 0,88$ mm), según la Ecuación 6-13, y un módulo de deslizamiento ($k_s = 7.855$ N/mm), según la Ecuación 6-14.

Por otro lado, de acuerdo con la norma de ensayo (UNE-EN 26891, 1992), la fuerza estimada (F_{est}) puede desviarse en más de un 20 % del valor medio de la carga máxima y ajustarse en posteriores ensayos. F_{est} se calculó inicialmente a partir de los valores de cálculo analítico ($F_{v,Rk}$), lo que dio estimaciones muy por debajo del valor de la carga máxima real una vez realizado el ensayo (F_{max}). Establecidos los primeros ensayos, se realizó un ajuste para aproximar F_{est} a F_{max} . Estas desviaciones llevan a considerar un módulo de deslizamiento con la pendiente de los valores definitivos

(k'_s), tomando el segundo tramo de la curva con $\frac{4}{3} \cdot (v_{24} - v_{21})$ y la carga máxima (F_{max}), lo que permite evitar estimaciones. De considerar el valor real de carga (F_{max}) y el nuevo tramo de deslizamiento, la pendiente quedaría definida por el módulo de deslizamiento definitivo ($k'_s = 11.080$ N/mm), según la Ecuación 6-15, lo que permite obtener resultados acordes con el ciclo de carga a fallo.

$$v_{i,mod} = AB = \frac{4}{3} \cdot (v_{04} - v_{01}) = \frac{4 \cdot (1,47 - 0,81)}{3} = 0,88 \text{ mm}$$

Ecuación 6-13

$$k_s = BC = \frac{0,4 \cdot F_{est}}{v_{i,mod}} = \frac{0,4 \cdot 17.281}{0,88} = 7.855 \frac{N}{mm}$$

Ecuación 6-14

$$k'_s = BC' = \frac{0,4 \cdot F_{max}}{\frac{4}{3} \cdot (v_{24} - v_{14})} = \frac{0,4 \cdot 25.116}{\frac{4}{3} \cdot (1,75 - 1,07)} = 11.080 \frac{N}{mm}$$

Ecuación 6-15

Tomando estos dos valores (k_s y k'_s) como nuevas pendientes, se pueden desarrollar rectas equivalentes a la definida por K_{ser} (Figura 6-82), donde se puede apreciar que estos dos coeficientes de deslizamientos teóricos son mayores, y por tanto dan lugar a menores deslizamientos que los obtenidos del ensayo y con el valor de K_{ser} definido a partir de la Ecuación 6-10, y esto a pesar de haber desplazado la curva de ensayo hacia la derecha con la misma holgura ($h_{holgura} = 0,3 \text{ mm}$) para corregir los asientos iniciales.

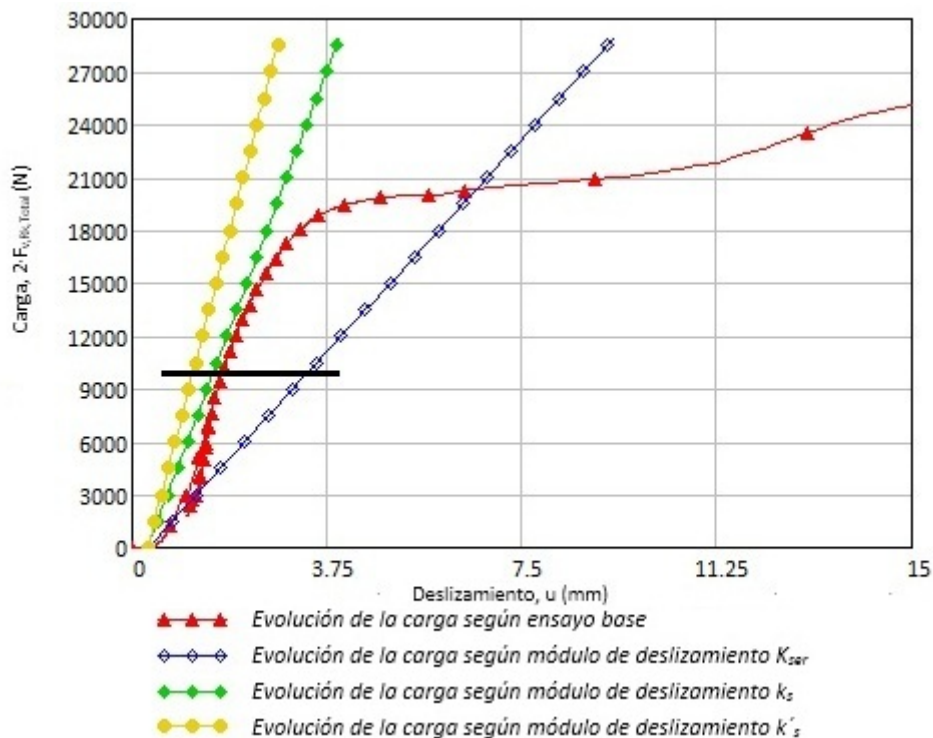


Figura 6-82. Carga frente a deslizamiento en comparación en K_{ser} y k_s .

Los cálculos de K_{ser} y k_s se han realizado para otros casos de unión, intentando determinar una relación adimensional de proporcionalidad que refleje la desviación entre ambas pendientes. Se define la Ecuación 6-16, en la que se toma como denominador el coeficiente k_s , dado que éste arroja valores de pendiente más cercanos a los obtenidos experimentalmente, permitiendo fijar un valor adimensional que relaciona ambas pendientes independientemente de los valores absolutos de las variables que intervienen en cada uno de los ensayos.

$$\text{Desviación} = \frac{K_{ser} - k_s}{k_s}$$

Ecuación 6-16

Se han ordenado los resultados de las pendientes (K_{ser} y k_s) en función de la relación calculada en la Ecuación 6-16, y los resultados se muestran en la Tabla 6-21. Las probetas con epoxi (P53, P83 y P137) presentan grandes desviaciones (estando k_s por encima de K_{ser}); mientras que, en el extremo opuesto, están las probetas donde el comportamiento de la unión fue menos rígido (P77, P129 y P128) y presentaban más holguras (estando K_{ser} por encima de k_s). Como se puede ver a lo largo de toda la tabla, las desviaciones entre cálculo analítico y experimental son amplias.

Tabla 6-21. Comparación de pendientes de deslizamiento: K_{ser} , k_s y k'_s .

Probeta	Descriptor de muestra	K_{ser}	k_s	Desviación	k'_s
P053	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa alta res.	4.167,51	25.658,21	-84%	36.086,88
P089	80_160_14_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	5.734,55	28.932,57	-80%	35.485,10
P137	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa	3.909,29	19.336,39	-80%	26.765,00
P139	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa	3.974,81	18.560,00	-79%	23.396,19
P138	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa	4.003,25	17.416,67	-77%	23.936,23
P091	80_160_14_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	5.757,16	24.551,31	-77%	33.261,95
P090	80_160_14_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	5.767,22	24.565,60	-77%	31.726,65
P054	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa alta res.	4.083,01	17.328,87	-76%	20.542,07
P055	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_Lisa alta res.	4.102,74	16.689,16	-75%	14.666,32
P083	80_160_12_0_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	4.688,07	16.791,08	-72%	30.298,05
P044	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	4.253,79	14.348,02	-70%	23.551,29
P046	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	4.141,68	13.074,00	-68%	25.131,41
P085	80_160_12_0_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	4.640,13	14.502,50	-68%	27.883,83
P042	100_200_10_45_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	3.975,88	12.201,04	-67%	15.220,54
P075	80_160_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	4.065,71	12.423,31	-67%	13.992,59
P084	80_160_12_0_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	4.635,20	13.939,78	-67%	28.165,45
P045	80_160_10_0_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	4.066,30	12.024,49	-66%	17.098,41
P074	80_160_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	4.171,12	11.535,33	-64%	13.086,54
P067	80_160_10_0_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	3.847,65	9.886,67	-61%	15.646,75
P144	80_160_10_0_no_no_no_Lisa alta res.	3.984,28	9.237,07	-57%	9.256,11
P076	80_160_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	4.270,75	9.766,22	-56%	10.770,64
P132	80_160_12_90_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	5.145,02	11.574,86	-56%	12.029,56
P145	80_160_10_0_no_no_no_Lisa alta res.	3.903,99	7.960,31	-51%	10.882,28
P065	80_160_10_0_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	4.228,14	8.501,98	-50%	16.796,11
P133	80_160_12_90_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	4.729,79	9.356,32	-49%	11.173,52
P135	80_160_10_0_no_no_no_Lisa	3.987,84	7.855,07	-49%	11.080,90
P143	80_160_10_0_no_no_no_Lisa alta res.	4.015,72	7.384,01	-46%	10.875,97
P043	100_200_10_45_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	4.078,26	7.497,02	-46%	11.515,56
P134	80_160_10_0_no_no_no_Lisa	3.837,12	6.478,72	-41%	9.682,12
P037	100_200_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	4.235,71	6.785,31	-38%	5.978,26
P140	80_160_10_0_Conector interc. no_no_rosc zinc 5.6	3.993,17	6.207,61	-36%	20.717,76
P141	80_160_10_0_Conector interc. no_no_rosc zinc 5.6	3.868,75	5.741,86	-33%	20.303,00
P050	80_160_10_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6	3.881,07	5.665,84	-32%	21.802,94
P136	80_160_10_0_no_no_no_Lisa	3.969,48	5.751,53	-31%	8.852,80
P125	80_160_10_90_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	3.995,54	5.777,28	-31%	11.772,24
P131	80_160_12_90_no_no_si, met. con tubo 12-8,5_lisa	4.502,88	6.313,65	-29%	35.241,88
P142	80_160_10_0_Conector interc. no_no_rosc zinc 5.6	4.086,00	5.642,93	-28%	18.187,19
P058	80_160_10_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	3.816,08	5.116,77	-25%	7.216,34
P080	80_160_10_0_no_no_no_Moleteado N (S275 JR)	4.066,30	5.231,43	-22%	10.495,98
P094	80_160_14_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	5.731,20	7.337,56	-22%	14.979,37
P066	80_160_10_0_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	3.824,25	4.783,80	-20%	9.691,75
P068	80_160_10_0_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosc zinc 5.6	3.855,85	4.497,13	-14%	9.884,64
P036	100_200_10_90_no_Epoxi HIT-RE 500_no_rosc zinc 5.6	3.902,47	4.472,13	-13%	5.437,46
P057	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc (S275 JR)	3.827,76	3.594,80	6%	9.160,03
P081	80_160_10_0_no_no_no_Moleteado F1	4.200,62	3.823,55	10%	10.200,69
P056	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc. F1	3.816,08	3.362,87	13%	8.194,20
P088	80_160_10_90_si, apriete 15 Nm_no_no_rosc zinc 5.6	4.171,72	3.647,10	14%	12.380,20
P038	100_200_10_45_no_no_no_rosc zinc 5.6	3.914,33	2.847,41	37%	4.668,30
P093	80_160_14_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	5.973,88	4.246,41	41%	11.830,94
P052	80_160_10_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6	3.934,04	2.795,82	41%	6.243,69
P063	80_160_10_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	3.921,07	2.743,14	43%	8.911,47
P039	100_200_10_45_no_no_no_rosc zinc 5.6	4.193,99	2.905,91	44%	6.592,97
P082	80_160_10_0_si, apriete 15 Nm_no_no_rosc zinc 5.6	3.813,74	2.619,94	46%	17.541,57
P126	80_160_10_90_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	3.899,29	2.345,16	66%	12.362,85
P127	80_160_10_90_no_no_si, met. con tubo 10-7_lisa	3.358,63	1.904,49	76%	11.988,81
P069	80_160_10_0_no_Poliuretano_si, poliuretano_rosc zinc 5.6	3.785,17	2.081,03	82%	10.376,63
P041	100_200_10_45_si_no_no_rosc zinc 5.6	4.156,22	2.272,72	83%	2.816,95
P047	80_160_12_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6	4.875,01	2.631,99	85%	13.616,75
P086	80_160_10_90_si, apriete 15 Nm_no_no_rosc zinc 5.6	4.007,40	2.119,16	89%	8.035,48
P034	100_200_10_90_si_no_no_rosc zinc 5.6	3.997,73	2.068,88	93%	9.708,89
P092	80_160_14_0_no_no_no_rosc zinc 5.6	5.904,44	2.950,15	100%	17.474,95
P087	80_160_10_90_si, apriete 15 Nm_no_no_rosc zinc 5.6	4.121,89	2.019,48	104%	10.200,58
P049	80_160_12_0_no_no_si, metal. con cono_rosc zinc 5.6	4.825,02	2.334,71	107%	17.431,16
P033	100_200_10_90_no_no_no_rosc zinc 5.6	4.244,77	2.012,46	111%	3.665,63
P059	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc. F1	4.226,57	1.987,49	113%	15.984,58

Comparación de pendientes de deslizamiento: K_{ser} , k_s y k'_s .

Probeta	Descriptor de muestra	K_{ser}	k_s	Desviación	k'_s
P035	100_200_10_90_si_no_no_roszc zinc 5.6	4.063,49	1.864,17	118%	6.655,65
P040	100_200_10_45_si_no_no_roszc zinc 5.6	3.946,60	1.687,76	134%	5.105,03
P032	100_200_10_90_no_no_no_roszc zinc 5.6	4.274,07	1.757,61	143%	3.601,48
P070	80_160_10_0_no_Poliuretano_si, poliuretano_roszc zinc 5.6	3.714,93	1.520,88	144%	7.671,09
P048	80_160_12_0_no_no_si, metal. con cono_roszc zinc 5.6	4.860,71	1.799,36	170%	9.095,06
P061	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc (S275 JR)	4.050,21	1.459,63	177%	11.210,29
P060	80_160_10_0_no_no_no_Lisa Rosc. F1	4.144,08	1.422,78	191%	15.066,00
P079	80_160_10_90_no_no_no_roszc zinc 5.6	4.180,14	1.427,81	193%	6.693,05
P078	80_160_10_90_no_no_no_roszc zinc 5.6	4.111,71	1.389,86	196%	6.708,98
P051	80_160_10_0_no_no_si, metal. con cono_roszc zinc 5.6	3.875,79	1.291,30	200%	1.624,63
P130	80_160_10_90_no_Poliuretano_si, poliuretano_roszc zinc 5.6	3.966,52	1.260,40	215%	10.971,63
P077	80_160_10_90_no_no_no_roszc zinc 5.6	4.115,30	1.194,75	244%	4.409,88
P129	80_160_10_90_no_Poliuretano_si, poliuretano_roszc zinc 5.6	3.811,41	892,66	327%	8.618,48
P128	80_160_10_90_no_Poliuretano_si, poliuretano_roszc zinc 5.6	3.797,99	799,52	375%	10.968,65

De forma cualitativa, el módulo de deslizamiento definitivo (k'_s) presenta pendientes mayores que los dos anteriores; seguramente debido al ajuste de las zonas de contacto y a una mejora por densificación de aplastamiento en la madera. Sin embargo, al desarrollar un segundo ciclo de carga, se debe considerar el mayor asentamiento debido a la primera carga. En consecuencia, resulta interesante ejercer una precarga inicial, semejante a F_{est} , antes de situar la unión en condiciones de trabajo efectivo, con un doble objetivo:

- Reducir el deslizamiento de la unión una vez que esté en situación de trabajo regular en la estructura.
- Minimizar las holguras iniciales de la unión.

Comparando los valores absolutos, se ratifica el hecho de que definir K_{ser} exclusivamente con la densidad media y el diámetro nominal de la clavija puede resultar poco preciso para identificar el deslizamiento de la unión, especialmente cuando se introducen refuerzos como el uso de adhesivo epoxi o cuando las holguras no son controladas (o ajustadas por precargas en la unión). Igualmente, hacerlo con su análogo, el módulo de deslizamiento (k_s), puede presentar imprecisiones. En el cálculo de la pendiente definida por k_s , que se identifica a partir de la recta que pasa por AC en la Figura 6-81, deben tenerse en cuenta las siguientes apreciaciones:

- La trayectoria desde los puntos 01 a 04 (véase Figura 6-81) no tiene por qué coincidir con la que pasa por los puntos 21, 24, 26..., que tiende a decrecer. En la práctica, ante la exposición de la estructura, y por tanto de sus uniones, a cargas variables (por ejemplo, de nieve o viento), se puede dar una pendiente con k_s distinta en los ensayos de la que puede desarrollarse en el funcionamiento real de la estructura porque estas cargas variables se materializan en ciclos de carga y descarga que no siempre dan lugar a las mismas trayectorias de bucle (véase Figura 5-39) dentro del diagrama de carga deslizamiento, por ser dependientes del estado de plastificación previo, del tiempo de permanencia y del rango de carga total en el que se desarrollan. Si la unión presenta nuevos estados de plastificación la pendiente real es más reducida que la del tramo 01 a 04 y por lo tanto los deslizamientos serán mayores de los que se pueden calcular con k_s .
- Al relacionar F_{est} y F_{max} con un deslizamiento de 15 mm (independientemente de otros condicionantes como el tamaño de la unión), queda abierta la posibilidad de que ese deslizamiento haya sido tan significativo que se sitúe la curva en zona de meseta (incluso de rotura, si la unión es pequeña) y en consecuencia el módulo de deslizamiento no responde a la pendiente del comportamiento real para el estado de plastificación en el que se encuentra la estructura.
- La trayectoria desde el origen del diagrama carga-deslizamiento hasta el punto 01 correspondiente al asiento de la unión es difícilmente evaluable de forma analítica. Esta holgura inicial provoca que se desplace toda la curva real hacia la derecha y, en consecuencia, la pendiente (K_{ser} o k_s) disminuye de valor con respecto a la real.
- El hecho de que la norma (UNE-EN 26891, 1992) defina k_s a partir de la carga estimada (F_{est}), y no de la carga de fallo real (F_{max}), provoca un grado de incertidumbre, especialmente si la estimada ha sido supuesta

de mayor valor que la real. Por lo tanto, la pendiente calculada a partir de la carga estimada puede salir más rígida que la que se hubiera calculado con la carga de fallo real y en consecuencia, el cálculo no queda del lado de la seguridad.

Las apreciaciones anteriores llevan a pensar que:

- Es necesario hacer un análisis más profundo de la relación entre la capacidad de carga de la unión y el deslizamiento, haciendo uso de un sistema de funciones constitutivas acorde con el comportamiento de la unión.
- La definición de pendientes a través de coeficientes K_{ser} y k_s debe ajustarse:
 - En la fase inicial, por el asentamiento de la unión y las holguras de fabricación.
 - En las fases más avanzadas, por los procesos de plastificación.
- Se debe limitar el deslizamiento de la unión, en coherencia con los criterios de Estados Límite de Servicio (ELS), de una forma proporcional al tamaño y/o geometría de la unión.

6.5 Ecuaciones de carga frente a deformación para clavija y elementos complementarios

En este apartado se desarrollan las ecuaciones constitutivas de rigidez, analizando los factores que intervienen en el comportamiento de la clavija e incluyendo el efecto de posibles refuerzos, como la fijación de tuerca-arandela en los extremos o el uso de conectores en las intercaras de las piezas de madera. La unión va a ser capaz de recoger más energía cuantos más elementos de refuerzo la compongan, por lo que se contempla el estudio de diagramas del cuerpo libre, en los que se calculan los esfuerzos a los que están sometidos estos elementos en relación a su deslizamiento, así como su posición relativa que tienen dentro de la unión para los distintos estados de carga. Para realizar los cálculos se procederá a aplicar el método de las secciones en la unión a partir del sistema mostrado en la Figura 6-83.

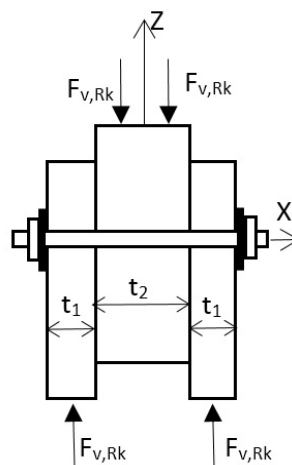
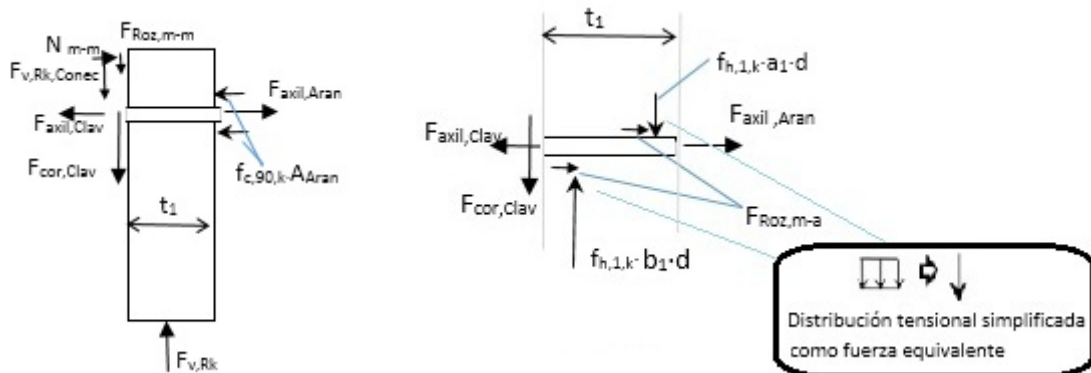


Figura 6-83. Esquema de la unión incluyendo elementos de refuerzo.

En la evolución de la unión sometida a carga se identifican plastificaciones debidas a la propagación de aplastamiento en las zonas de contacto, que están relacionadas, por ejemplo, con la plastificación en los extremos de clavija fijados con tuerca-arandela. Estas plastificaciones también están relacionadas con la deformación de la clavija para un deslizamiento dado, y por lo tanto el fenómeno no debe tratarse simplemente como un sumando independientes a efectos de cálculo de la capacidad de carga del conjunto. Aunque hay referencias que proponen sumar los efectos de modo independiente, como ocurre con el efecto sogá en la normativa (DB SE M, 2009), los diagramas del cuerpo libre deben considerar inicialmente todas las fuerzas y momentos que le afectan, en función de las partes de la unión que se analicen. Como ejemplos de diagramas de cuerpo libre la Figura 6-84 A) considera la pieza de madera lateral junto con parte de la clavija, mientras que la Figura 6-84 B) muestra únicamente la porción de clavija en el interior de la madera en una situación inicial, cuando aún no se ha producido deslizamiento. En ambos casos las partes

eliminadas del sistema se sustituyen por sus efectos equivalentes sobre las partes que se mantienen y, en lo referente a la distribución de tensiones asociada a la plastificación de la madera, ésta se simplifica como un vector de fuerza equivalente, tal y como se indica en la viñeta situada a la derecha de la Figura 6-84 B).



A) Pieza lateral de madera y porción de clavija B) Detalle de porción de clavija en la pieza lateral de madera

Figura 6-84. Diagramas de cargas en la madera lateral y en la porción de clavija.

A continuación se define la notación que aparece en la Figura 6-84:

- $F_{v,Rk}$ capacidad de carga por plano de cortante.
- $F_{v,Rk,Conec}$ capacidad de carga por plano de cortante con presencia de conectores dentados o placas clavo.
- $F_{Roz,m-m}$ fuerza de rozamiento entre madera y madera.
- $F_{Roz,m-a}$ fuerza de rozamiento entre madera y clavija (se considera la clavija de acero).
- $F_{axil,Clav}$ esfuerzo axil de la clavija en el plano de corte para intercaras de madera.
- $F_{axil,Aran}$ esfuerzo axil de la clavija en el plano de corte para el extremo fijado con tuerca y arandela.
- $F_{cor,Clav}$ esfuerzo cortante de la clavija en el plano de intercaras de madera.
- N_{m-m} fuerza normal en intercaras de madera.
- $f_{c,90(\alpha),k}$ resistencia característica a compresión perpendicular a la fibra de la madera (o en dirección α).
- $f_{h,1(2),k}$ resistencia característica al aplastamiento para la pieza de madera, t_1 (t_2).
- A_{Aran} área de la arandela.
- a_1 anchura de aplastamiento exterior en la interacción entre madera y clavija.
- b_1 anchura de aplastamiento interior en piezas laterales de madera.
- t_1 longitud de entrega del elemento mecánico de fijación en la pieza de la unión que contiene t_1 .

En las primeras fases de carga, la fuerza axil provocada por elementos como las fijaciones en extremos con tuerca-arandela se traslada en la dirección del eje longitudinal de la clavija (perpendicularmente a la carga que debe recoger el nudo ($F_{v,Rk}$), por lo que no contribuye significativamente en la resistencia del mismo, salvo por un aumento de las fuerzas normales en las intercaras de madera (N_{m-m}) relacionadas con el apriete de pretensado que se le dé a la clavija, y que puede derivar en fuerzas de rozamiento ($F_{Roz,m-m}$) en los planos de contacto de la madera perpendiculares a la clavija (en lo sucesivo serán llamadas intercaras de madera). En dirección de la carga de la unión ($F_{v,Rk}$) también se puede considerar una porción de esta fuerza adsorbida por placas clavo o conectores ($F_{v,Rk,Conec}$) si los hubiera.

Para los estadios iniciales de carga, donde el deslizamiento es nulo, la madera se ve expuesta a tensiones locales homogéneas por contacto a lo largo de toda la clavija, especialmente cuando la clavija es muy rígida (Figura 6-85). Las tensiones locales de trabajo ($f'_{c,\alpha,k}$) inicialmente serán de compresión con un valor de $\alpha = 0$ si la aplicación de la carga y la orientación de la clavija están alineadas (como es el caso de estudio), y se incrementarán a medida que la unión entra en carga para llegar a valores de plastificación propios de la resistencia característica a aplastamiento ($f_{h,1(2),k}$). La clavija tiene que trabajar con mayores cargas cortantes y los elementos de refuerzo, por efecto sogá,

prácticamente no trabajan. Como ya se comentó, esto puede inducir a un diseño en contra de los principios de economía, al dimensionar la clavija con mayor rigidez, lo que da lugar a modos de fallo 1 y 2 propios de aplastamiento en madera de piezas laterales y central respectivamente, e implica también un debilitamiento de la sección neta de la viga (o incrementos de escuadría en las vigas). Por ello son de interés los modos de fallo 3 y 4, donde la clavija puede redistribuir las tensiones por flexión, dando lugar a las rótulas plásticas y a una mejor contribución del efecto sogá; siendo esto es de especial interés en el modo de fallo 4, al recoger los esfuerzos en la clavija tanto en la zona de madera de espesor t_2 como en la de espesor t_1 .

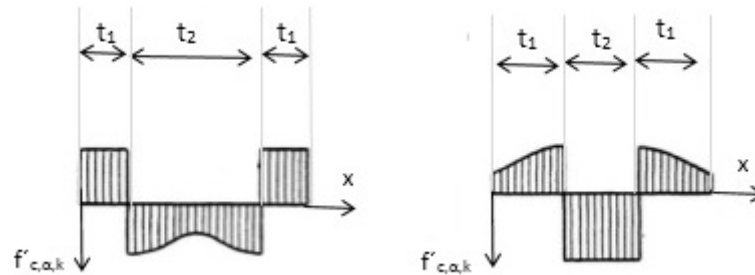


Figura 6-85. Distribución tensional en los modos de fallo 1 y 2, según la teoría del rendimiento (Johansen, 1949).

En la Figura 6-86 se desarrollan los diagramas del cuerpo libre para la unión con deslizamiento en el modo de fallo 4, donde aparecen rótulas de plastificación en la clavija. La Figura 6-86 A) expone la pieza de madera lateral (de espesor t_1) y la porción de clavija hasta la zona de intercaras de madera. Se pueden identificar esfuerzos axiales desde los extremos de clavija hasta las secciones definidas en las intercaras de madera. La capacidad de carga en tracción en la clavija ($F_{axil,Aran}$) puede darse desde los extremos (por la introducción de fijaciones con tuerca-arandela) y puede variar a lo largo de la clavija por distintos factores: la utilización de adhesivos embebidos en la clavija ($F_{axil,Adhe}$), la fricción entre madera y clavija ($F_{axil,Roz,Agu}$), las incrustaciones geométricas como las irregularidades de los filetes de rosca en el interior del agujero ($F_{axil,Incrus}$) o las modificaciones generalizadas en todo el contorno del agujero como los producidos por sistemas de expansión ($F_{axil,Expan}$). Dado que la pieza central (t_2) presenta un comportamiento de simetría más simple en su forma de trabajo, el análisis se centra en los vectores pertenecientes a las distintas porciones del sistema material de la zona de espesor t_1 :

- Pieza de madera de espesor t_1 (Figura 6-86 B).
- Porción de clavija en el interior de la zona de espesor t_1 (Figura 6-86 C).
- Porción de cabeza de clavija con arandela en contacto con madera (Figura 6-86 D).
- Porción de la clavija con las dos rótulas plásticas con las cargas a las que se ven sometidas (Figura 6-86 E).

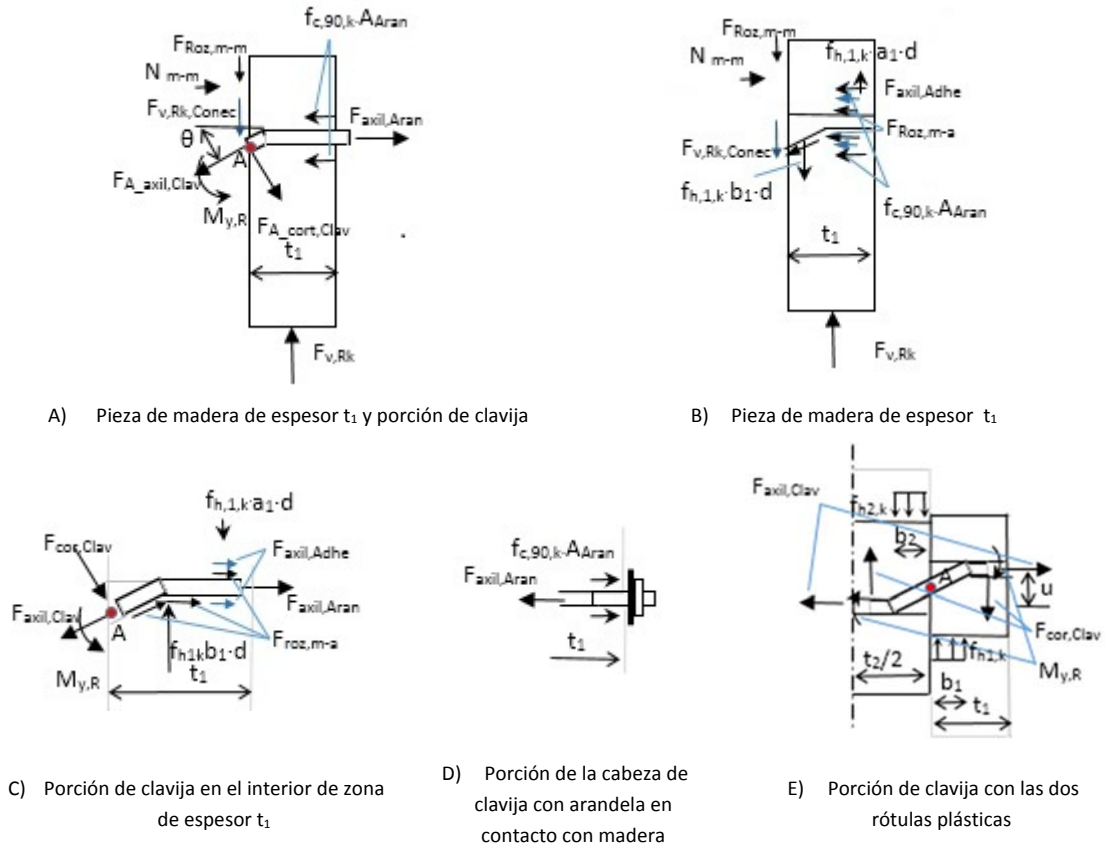
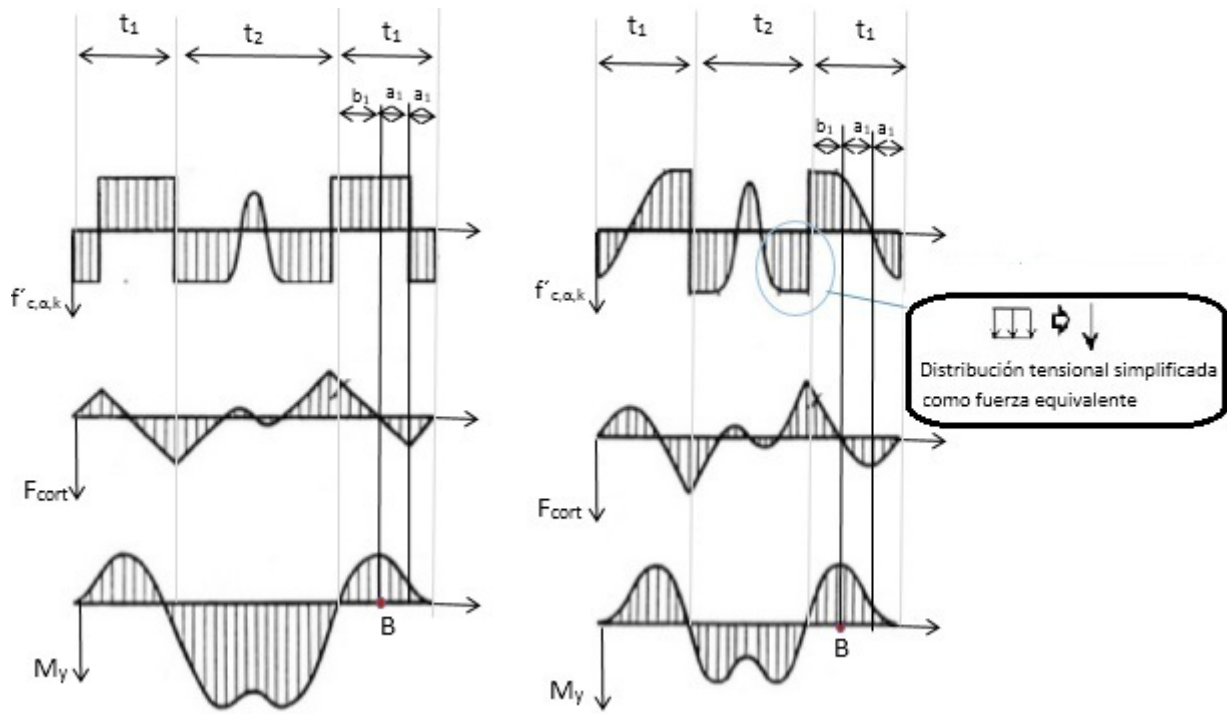


Figura 6-86. Diagramas de cuerpo libre de porciones de la unión.

En la Figura 6-87 se expone la distribución tensional en la zona de contacto entre las superficies del agujero de la madera y la clavija para los modos de fallo tres y cuatro, donde se muestran las tensiones de compresión en distintos tramos de la clavija. Uno de los problemas que se presenta con estas distribuciones es que las tensiones cortantes que se producen a lo largo de la clavija son variables, como se pudo comprobar en el modelo de elementos finitos tridimensionales, y en coherencia con las distribuciones tensionales de la teoría del rendimiento (Johansen, 1949). Tanto si se analizan las solicitaciones en la zona de las intercaras de madera que pasa por el punto "A" (identificado en la Figura 6-86 E), como si se hace en puntos cualesquiera a lo largo de la clavija, los valores de la fuerza cortante (F_{cor}) suponen una contribución al trabajo de la clavija, pero dificultan el cálculo de los esfuerzos en su conjunto. En los distintos ensayos y en los modelos de elementos finitos, se identifican puntos de momento flector máximo ($M_{y,Rk}$), lo que supone que aplicar ecuaciones de equilibrio desde estos puntos (identificados con el punto "B" en la Figura 6-87 y en la Figura 6-88) hace más sencillo analizar un diagrama del cuerpo libre, planteando secciones hipotéticas de la clavija donde el momento flector máximo implica esfuerzos cortantes nulos.



Modo de fallo tres (rótula central)

Modo de fallo cuatro (rótula en centro y lados)

Figura 6-87. Distribución tensional y de esfuerzos en el modo de fallo 4, según la teoría del rendimiento (Johansen, 1949).

La Figura 6-88 analiza la clavija entre las secciones de momento flector máximo, donde se supone que las tensiones cortantes son nulas y en las que el momento flector, al ser máximo, puede dar lugar a una rótula plástica. El tramo analizado afecta a los anchos de aplastamiento (b_1 y b_2), considerando que la distribución de tensiones, variable dada por los espesores a_1 y a_2 (acotados en la Figura anterior), queda fuera del diagrama. El presente trabajo marca una estrategia distinta en este punto, que lo diferencia del desarrollo de Johansen visto en el Capítulo 2. Se contempla la necesidad de tratar el deslizamiento de la unión (u) como un factor que afecta a la zona de contacto entre clavija y madera.

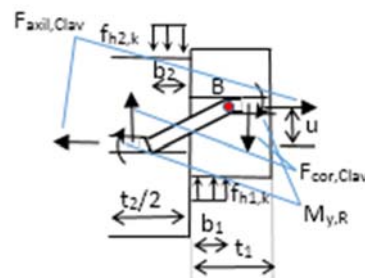


Figura 6-88. Diagrama de cuerpo libre considerando la situación de doble rótula.

En esta situación, se puede establecer una relación entre el deslizamiento (u) y la superficie de plastificación definida por los siguientes lados:

- Anchura de aplastamiento con plastificación de la madera (b_1+b_2).
- Ancho de clavija, que considerando el modelo de laja plana coincide con el diámetro (d).

Con ello se puede plantear un ángulo medio de rotación de la clavija (θ) según la Ecuación 6-17. El ángulo debe ir evolucionando desde 0° hasta los valores límite de rigidez permitidos en los estados límite de servicio (ELS).

$$\text{tag}\theta = \frac{u}{b_1 + b_2}$$

Ecuación 6-17

Asumiendo la relación de plastificación entre madera con distintas propiedades, se establece una proporcionalidad según la Ecuación 6-18.

$$\beta = \frac{f_{h2,\alpha,k}}{f_{h1,\alpha,k}} = \frac{b_1}{b_2}$$

Ecuación 6-18

Con lo cual, el tramo de plastificación total (b_t) se puede identificar según el desarrollo de la Ecuación 6-19, que da lugar a la Ecuación 6-20.

$$b_t = b_1 + b_2 = b_1 + \frac{b_1}{\beta} = b_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Ecuación 6-19

$$b_t = b_1 \cdot \left(\frac{1 + \beta}{\beta}\right)$$

Ecuación 6-20

La Figura 6-89 muestra la sección transversal de las probetas P26 y P38, en las que se ha interrumpido el ensayo con distintos valores de deslizamiento (u). En ellas se puede apreciar la propagación del ángulo y las zonas de aplastamiento. Con pequeños deslizamientos, el ángulo (θ) y el ancho total de aplastamiento (b_t) es más reducido, y aumenta con el deslizamiento.

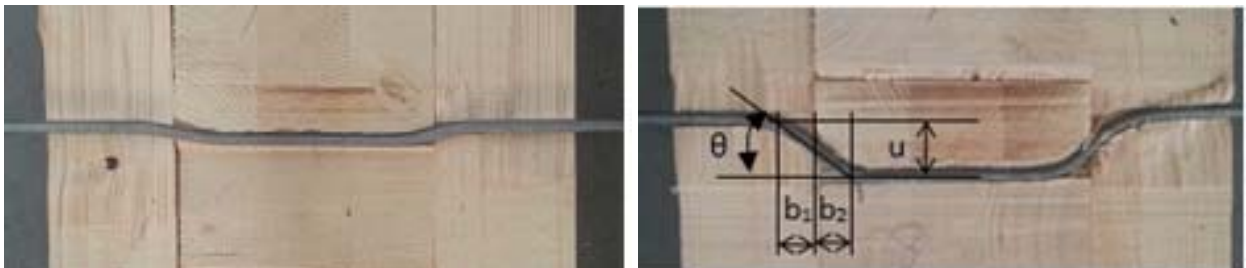


Figura 6-89. Evolución del ancho de aplastamiento y del ángulo de giro para distintos deslizamientos.

En el diagrama de la Figura 6-88 se consideran también las fuerzas axiales en la dirección del eje de la clavija ($F_{axil,Clav}$), que se deben calcular junto en el punto de momento flector máximo. De esta forma, se puede tratar en la misma ecuación, evitando dejar el efecto sogá como un mero sumando que añade capacidad de carga a la unión una vez dimensionada la zona de aplastamiento. Aplicando equilibrio de momentos respecto al punto B en el diagrama mostrado en la Figura 6-88, se puede plantear la Ecuación 6-21.

$$\sum M_y^B = 0 \Rightarrow 2 \cdot M_{y,Rk} + F_{B_axil,Clav} \cdot u = f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot b_1 \cdot \frac{b_1}{2} + f_{h2,\alpha,k} \cdot d \cdot b_2 \cdot \frac{b_2}{2}$$

Ecuación 6-21

Despejando en la Ecuación 6-21, se establece una relación que permite identificar la anchura de aplastamiento, operando según la Ecuación 6-22 y la Ecuación 6-23.

$$2 \cdot M_{y,Rk} + F_{B_axil,Clav} \cdot u = d \cdot \left(f_{h1,\alpha,k} \cdot \frac{b_1^2}{2} + f_{h2,\alpha,k} \cdot \frac{b_2^2}{2} \right)$$

Ecuación 6-22

$$2 \cdot M_{y,Rk} + F_{B_axil,Clav} \cdot u = d \cdot \left(f_{h1,\alpha,k} \cdot \frac{b_1^2}{2} + f_{h1,\alpha,k} \cdot \beta \cdot \frac{\beta^2}{2} \right) = d \cdot f_{h1,\alpha,k} \cdot b_1^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2 \cdot \beta} \right) = d \cdot f_{h1,\alpha,k} \cdot b_1^2 \cdot \left(\frac{\beta + 1}{2 \cdot \beta} \right)$$

Ecuación 6-23

De donde se puede despejar el valor del ancho de aplastamiento (b_1), según se expresa en la Ecuación 6-24.

$$b_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{y,Rk} + F_{B_axil,Clav} \cdot u}{f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot \left(\frac{\beta + 1}{2 \cdot \beta} \right)}}$$

Ecuación 6-24

Siendo:

- b_1 ancho de aplastamiento interior de las piezas laterales de madera, en mm.
- u deslizamiento de la unión, en mm.
- $M_{y,Rk}$ momento de flexión en la clavija, en N·mm.
- $F_{B_axil,Clavi}$ fuerza axil en la zona de momento flector máximo, en N.
- d diámetro nominal de clavija, en mm.
- $f_{h1,\alpha,k}$ tensión de aplastamiento en la pieza lateral, en N/mm².
- β coeficiente adimensional que relaciona las resistencias de aplastamiento, $f_{h2,\alpha,k}/f_{h1,\alpha,k}$.

Los modos de fallo tres y cuatro (con rótula en la clavija) presentan diagramas de cuerpo libre distintos. La Figura 6-90 representa la situación estática para el modo de fallo 3, lo que supone que la clavija es lo suficientemente rígida como para que en el punto B no se forme una rótula plástica. En esta situación el vector de fuerza axil a la derecha de la rótula D ya no solo tiene una componente de fuerza horizontal, sino que aparece otra vertical. Además, la sección de la clavija en el punto B presenta un momento flector con un valor máximo relativo, pero que es más pequeño que el producido en la rótula de plastificación del punto D, como se puede apreciar en la distribución tensional propuesta para este modo de fallo (Figura 6-87).

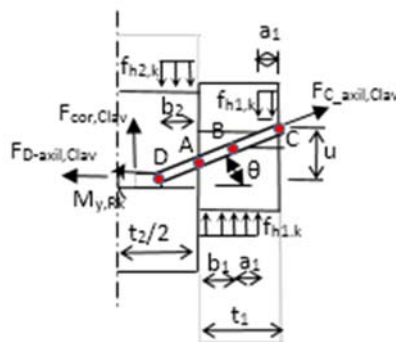


Figura 6-90. Diagrama de cuerpo libre considerando la situación de rótula en la pieza central.

En la Ecuación 6-25 se plantea el equilibrio de momentos para el diagrama de cuerpo libre expuesto en la Figura 6-90. El desarrollo parte del punto de rótula D situado dentro de que pertenece a la pieza central de madera hasta el extremo de la clavija en C donde no hay momento (si se considera la disposición ideal de la figura) y suponiendo que las fuerzas axiales están alineadas con el punto de rótula D.

$$\sum M_y^D = 0 \Rightarrow M_{y,Rk} + f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot a_1 \cdot \left(b_2 + b_1 + a_1 + \frac{a_1}{2} \right) + f_{h2,\alpha,k} \cdot d \cdot a_1 \cdot \left(\frac{b_2}{2} \right) = f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot (b_1 + a_1) \cdot \left(b_2 + \frac{b_1 + a_1}{2} \right)$$

Ecuación 6-25

Siendo:

- $M_{y,Rk}$ momento de flexión en la clavija, en N·mm.
- $F_{C_axil,Clavi}$ fuerza axial en la zona de momento flector máximo para la pieza central de madera, en N.
- u deslizamiento de la unión, en mm.
- θ ángulo de giro en la clavija.
- $f_{h1(2),\alpha,k}$ tensión de aplastamiento para la madera de la pieza 1 (2), en N/mm².
- d diámetro nominal de clavija, en mm.
- b_1 anchura de aplastamiento en el interior de las piezas laterales de madera, en mm.
- b_2 anchura de aplastamiento en la pieza central de madera, en mm.
- a_1 anchura de aplastamiento exterior entre madera lateral y los extremos de la clavija, en mm.

Simplificando la Ecuación 6-25 se puede despejar el ancho de aplastamiento en la pieza lateral (b_1) con procedimientos análogos a los vistos para el modo de fallo cuatro, haciendo uso del coeficiente adimensional que relaciona las resistencias de aplastamiento (β) entre la pieza de madera central y lateral de una forma análoga como se hizo en el Apartado 2.7.3 llegándose a la Ecuación 6-26.

$$b_1 = \frac{t_1}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right]$$

Ecuación 6-26

La Figura 6-91 muestra un detalle de la sección transversal de la probeta P092 perteneciente a la muestra [M41] una vez ejecutado el ensayo y con una situación avanzada de deslizamiento (u). En ella se pueden apreciar los distintos anchos (b_1 , b_2 y a_1) que dan lugar al aplastamiento en la madera cuando no hay fijaciones en los extremos. El comportamiento coincide con la distribución de tensiones propuesta en la Figura 6-87 para el modo de fallo tres (Johansen, 1949). La probeta tiene una clavija de varilla roscada con diámetro nominal 14 mm. Se debe reseñar que, aplicando las ecuaciones de norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) los resultados analíticos indican un fallo con doble rótula (modo de fallo cuatro). Si atendemos al eje de la clavija, éste presenta una ligera deformación en el punto B, dado que las pendientes en los segmentos DB y BC no son iguales; indicando que, en algún momento, el esfuerzo flector para la clavija en el punto B ha sobrepasado las tensiones de límite elástico. Comportamientos similares ya se mostraron en la Figura 6-57, donde la unión P083 [M41] presentaba los ángulos de giro en la clavija distintos a ambos lados del punto B.

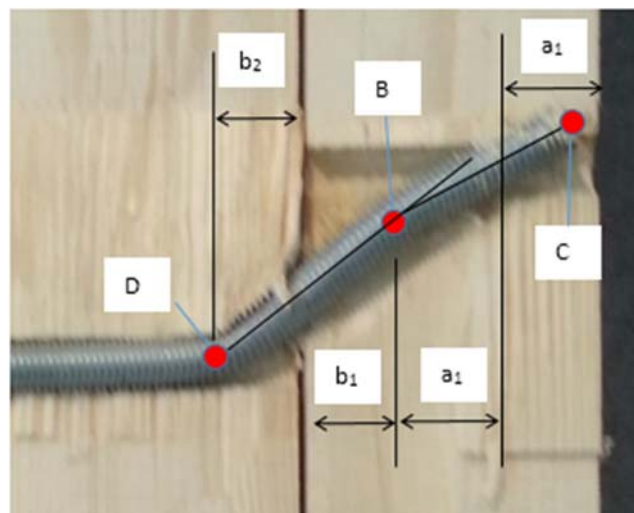


Figura 6-91. Detalle de probeta P092 con el modo de fallo tres y rótula en la pieza central.

Dado que la deformación en el punto B está condicionada por la aparición de tensiones de fluencia (que sobrepasen el límite elástico), se puede analizar la tensión de plastificación atendiendo al comportamiento del acero. Según la Ecuación 6-27, se puede relacionar la tensión del acero en su límite de fluencia ($f_{y,k}$) con el esfuerzo flector en el punto B (M_y^B) y el módulo resistente (w_y), a lo que hay que sumar la componente por esfuerzo de tracción en caso de solicitaciones combinadas con efecto soya.

$$f_{y,k} = \frac{M_{y,ela,int}^B}{w_y} + \frac{F_{B,axil,Clav}}{A_{Clav}} \Rightarrow f_{y,k} = \frac{M_y^B}{\frac{\pi \cdot r_{int}^3}{4}} + \frac{F_{B,axil,Clav}}{\pi \cdot r_{int}^2}$$

Ecuación 6-27

Siendo:

- $f_{y,k}$ tensión de fluencia del acero, en N/mm².
- $M_{y,ela,int}^B$ esfuerzo flector en la clavija en el límite de fluencia del acero $f_{y,k}$, en N·mm.
- $F_{B,axil,Clav}$ esfuerzo axil de la clavija en la sección correspondiente al punto B, en N.
- w_y módulo resistente, en N/mm³.
- A_{Clav} área transversal de la clavija, en mm².
- r_{int} radio interior de la clavija, en mm.

Despejando de la Ecuación 6-27 el valor del esfuerzo flector (en el límite de plastificación de clavija), se puede llegar a la Ecuación 6-28 que también se desarrolla para el caso de clavija de sección circular.

$$M_{y,ela,int}^B = \left(f_{y,k} - \frac{F_{B,axil,Clav}}{A_{Clav}} \right) w_y \Rightarrow M_y^B = \left(f_{y,k} - \frac{F_{B,axil,Clav}}{\pi \cdot r_{int}^2} \right) f_{y,k} \cdot \frac{\pi \cdot r_{int}^3}{4}$$

Ecuación 6-28

El equilibrio estático de momentos en el tramo BC de la clavija para el modo de fallo tres debe esta asociado a una rigidez suficiente en la clavija como para aplastar la madera en los tramos de anchura exterior (a_1). La Ecuación 6-29 refleja el comportamiento de la madera con su capacidad resistente máxima, cuando trabaja con la tensión de aplastamiento ($f_{h1,k}$).

$$\sum M_y^B = 0 \Rightarrow M_y^B + f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot a_1 \cdot \left(\frac{a_1}{2} \right) = f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot a_1 \cdot \left(a_1 + \frac{a_1}{2} \right) \Rightarrow M_y^B = f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot a_1^2$$

Ecuación 6-29

La comparación de la Ecuación 6-28 con Ecuación 6-29 permite identificar el valor del momento que supone el paso del modo de fallo tres a modo de fallo cuatro. Es necesario que se supere el momento flector ($M_{y,ela,int}^B$) que provoca la fluencia en el acero ($f_{y,k}$), para que se pueda producir la rótula del punto B y por lo tanto un modo de fallo cuatro, o lo que es lo mismo, se debe cumplir la Ecuación 6-30 para que la unión permanezca en modo de fallo cuatro.

$$M_{y,ela,int}^B > M_y^B$$

Ecuación 6-30

Sin embargo, el comportamiento de la clavija en el modo de fallo tres puede variar a medida que evoluciona la plastificación de la madera. El momento flector en la clavija ($M_{y,ela,int}^B$) para el cual se llega al límite elástico del acero está muy vinculado con la rigidez de la clavija, y se puede considerar constante si se desprecia el esfuerzo axil. Mientras, el esfuerzo flector en la clavija ($M_{y,Rk}$) evoluciona como una función del estado de carga en la unión ($F_{v,Rk}$), con el deslizamiento (u) y con el ancho de aplastamiento (b_1). Por ello el valor del ancho de aplastamiento exterior (a_1) se ve modificado según la Ecuación 6-33, y puede ocurrir que a medida que aumenta el ancho interior (b_1) la

clavija pase de un modo de fallo cuatro a un modo de fallo tres cuando el ancho de aplastamiento exterior (a_1) sea suficientemente reducido.

$$a_1 = \frac{t_1 - b_1}{2}$$

Ecuación 6-31

Con lo expuesto anteriormente hay una serie de premisas que se deben tener presentes cuando la unión evoluciona en el modo de fallo con rótula central:

- Interesa que la clavija no cause daño en la madera (o sea lo menor posible) y logre la mayor capacidad de carga con un diámetro reducido, porque de lo contrario puede condicionar el dimensionado de las escuadrías de la madera (cuando éstas ya suelen estar prefijadas por lo requisitos de la estructura) y su modificación es más costosa.
- El deslizamiento de la unión debe ser lo más reducido posible y ello supone anchos de aplastamiento interior pequeños (b_1), y por lo tanto anchos de aplastamiento exterior (a_1) grandes, que no impliquen comportamientos de plastificación ni resistencias de aplastamiento en la madera máximas ($f_{h1,k}$) en esos anchos exteriores (véase la Figura 6-87 para el modo de fallo tres).
- Los efectos del fuego también son adversos para este modo de fallo, porque la carbonización afecta a la superficie exterior de la madera, al ancho de aplastamiento exterior (a_1) y por lo tanto debilita la unión frente al modo de fallo cuatro donde la zona de trabajo puede estar más protegida.
- Si se llega a producir el modo de fallo tres, la plastificación que se produce en los extremos de la clavija no contribuye a la capacidad de carga de la unión, porque da lugar a un vector con igual dirección y sentido que la carga exterior ($F_{v,Rk}$).
- Se producen aplastamientos en zonas vistas de la madera y con ellos huecos expuestos al ataque de agentes patógenos en el agujero, como puede verse en la zona de la Figura 6-91 que queda por debajo del extremo de la clavija y es difícil resolver con tapones.
- El modo de fallo tres requiere el trabajo en los extremos de la clavija. Cuando ésta plastifica hay una variación de longitud en sus extremos (ΔL), lo que requiere que ésta sea más larga y sobresalga del plano exterior de la madera en una magnitud relacionada con el deslizamiento (u); con los inconvenientes asociados, especialmente si se quiere disponer de uniones con extremos ocultos, por ejemplo para mejorar la protección frente al fuego. De lo contrario, ocurre lo reflejado en la Figura 6-91: la clavija se embebe en el agujero y el exterior de la clavija (punto C) ya no permite el ancho de aplastamiento exterior (a_1) ideal y definido en la Ecuación 6-33, que debe ser corregido en función de la variación de la longitud en su extremo (ΔL).
- Los coeficientes de seguridad también afectan especialmente a este modo de fallo. Si se quiere trabajar en el modo de fallo correcto, hay que usar valores precisos porque no hay una dirección clara en el lado de la seguridad, de forma similar a lo que ocurre en aeronáutica. Prueba de ello es la muestra [M41], donde la aplicación de ecuaciones de la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) da resultados con la formación de doble rótula (modo de fallo 4) y sin embargo el fallo predominante ha sido de rótula central (modo de fallo 3), como se puede apreciar en la Figura 6-91.
- Tampoco se debe olvidar que uno de los objetivos del trabajo es poder mejorar el rendimiento de la unión, y los componentes que potencian el efecto sogá también dan lugar a inconvenientes. Si se fijan los extremos de la clavija con tuerca y arandela se hace difícil lograr un contacto uniforme entre la superficie de la arandela y de la madera. Esto implica la aparición de momentos sobre la clavija en su extremo exterior, y además se actuaría en contra de la normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009) donde se indica que “la arandela debe tener pleno contacto con la superficie de la pieza”.

En consecuencia, se continúa el estudio de la carga en la unión como función del deslizamiento $F_{v,rk} = f(u)$ para el modo de fallo cuatro. Se limita mediante condicionales el resto de posibles modos de fallo (fenda en la madera, rotura por tracción de la clavija o fallos en los modos uno dos y tres), dado que resulta desaconsejable un diseño orientado a comportamientos en la unión que no sean de doble rótula en la clavija.

Considerando el modelo de laja plana, se puede plantear la capacidad de carga por plano de cortante y elemento de fijación en la Ecuación 6-32.

$$F_{v,Rk} = f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot b_1$$

Ecuación 6-32

El modelo de unión con clavija se ha tratado en composición simétrica, con dos planos de cortante, por lo que la anterior ecuación debe multiplicarse por dos.

$$F_{v,Rk,Clavija} = F_{v,Rk} \cdot 2 = f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot b_1 \cdot 2$$

Ecuación 6-33

Cuando se añaden elementos de fijación complementarios en las intercaras de madera ($F_{v,Rk,Intercaras}$), junto con el sistema de clavija en cortadura doble, se obtiene una capacidad de carga total en la unión ($F_{v,Rk,Total}$), dada por la Ecuación 6-34. Casos de elementos de fijación complementarios en intercaras pueden ser los conectores o placas dentadas, o la fuerza de rozamiento si ésta se potencia de alguna forma, por ejemplo aumentando la fuerza normal en las intercaras de la madera para equilibrar la fuerza axil de la propia clavija. Esta, a su vez, se puede aumentar con fijaciones en los extremos de la clavija o cualquier otro sistema que aumente el efecto sogá. Para aplicar esta ecuación que considera las cargas de intercaras y de la propia clavija, se deben tener presentes los valores de carga particulares para el deslizamiento dado, porque no se puede aplicar la superposición de efectos, con los valores de carga máxima de cada uno de los elementos al no darse de forma simultánea.

$$F_{v,Rk,Total} = F_{v,Rk,Clavija} + F_{v,Rk,Intercaras}$$

Ecuación 6-34

Siendo:

- $F_{v,Rk,Total}$ carga total en la unión por plano de cortante para un deslizamiento relacionado, en N.
- $F_{v,Rk,Clavija}$ carga por contribución de la clavija en el plano de cortante y para un deslizamiento relacionado, en N.
- $F_{v,Rk,Intercaras}$ carga por contribución de elementos en intercaras por plano de cortante y para un deslizamiento dado, en N.

6.5.1 Evolución del momento plástico en la rótula de clavija con el estado de carga

Según las ecuaciones planteadas en el Apartado 2.6.4, existen distintas alternativas para analizar el momento plástico en la rótula. Se puede partir de la Tabla 2-12, donde se definen expresiones que determinan el momento plástico según norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009), que dan lugar a la Ecuación 6-35 y también de otras fuentes (Argüelles et al., 2003), que dan lugar a la Ecuación 6-36. Con estas ecuaciones, para el modelo base planteado al principio de este tema, los resultados del momento plástico toman valores de 59.716 N·mm y 66.666 N·mm respectivamente.

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 500 \cdot 10^{2,6} = 59.716 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ecuación 6-35

$$M_{y,Rk} = 0,8 \cdot f_{u,k} \cdot \frac{d^3}{6} = 0,8 \cdot 500 \cdot \frac{10^3}{6} = 66.666 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ecuación 6-36

Como se indicó en el Apartado 6.4.5.1, el momento plástico en la rótula se puede relacionar con el valor del momento flector máximo. Este valor, según normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), debe ser calculado a partir de la tensión última ($f_{u,k}$). Sin embargo, las consideraciones expuestas en aquel apartado, planteando la necesidad de emplear aceros dúctiles, hacen más aconsejable usar la tensión de fluencia ($f_{y,k}$). Por otro lado, se debe tener presente la norma (UNE-EN 409, 1998), que describe el ensayo para obtener el momento plástico ($M_{y,Rk}$) de forma empírica. En ambos casos, tanto en las ecuaciones analíticas como en la norma que define el ensayo, no se tienen en consideración solicitaciones combinadas, especialmente de tracción de efecto sogá que se puede dar en determinadas uniones de tipo clavija. La deformación final de uniones con tuerca-arandela como fijación en los extremos identifica la tracción en la clavija como un factor de influencia en la flexión de la clavija, puesto que la flecha describe una trayectoria menos acentuada, el ángulo de giro en la clavija es menor y el ancho de aplastamiento (b_t) se incrementa. Es un aspecto que se puede apreciar al comparar las secciones transversales de los ensayos vistos en la Figura 6-74 y la Figura 6-75.

Al introducir variables desconocidas inicialmente, como el ancho de aplastamiento, y tener un diagrama de esfuerzos con distintos orígenes de éstos debido al efecto sogá (como los provocados por la tuerca-arandela, la introducción de adhesivos tipo epoxi o los kits de expansión), resulta complicado describir la ecuación de la línea elástica de la clavija y en consecuencia definir la máxima resistencia a partir de condiciones geométricas.

Sin embargo, la capacidad de carga en la unión presenta una relación con el deslizamiento y el ángulo de giro de la clavija. El efecto de flexión debe evolucionar desde valores de tensión nulos (cuando no está expuesta a carga la unión), pasando por comportamientos elásticos, para llegar a los valores máximos de plastificación que dan lugar a la formación de rótulas plásticas, que pueden evolucionar en distintos puntos de la clavija a medida que se aplica carga y deslizamiento. Este comportamiento se ha observado en los modelos de elementos finitos, donde las tensiones axiales de la clavija, relacionadas con la flexión de la clavija, se incrementan a medida que aumenta la carga. El deslizamiento (u) también aumenta con la carga y la flexión en la rótula, a diferencia del tratamiento analítico que utiliza la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) para el cálculo del momento plástico, el cual arroja un valor constante propio de un estado de fallo último e independiente del deslizamiento.

Afortunadamente, hay estudios que establecen una relación entre el momento de fluencia en flexión del elemento de fijación y el deslizamiento relacionándolos con la tensión de fluencia ($f_{y,k}$), según la Ecuación 6-37 (Awaludin et al., 2008). Dicha ecuación ha sido reconocida y adoptada en otros trabajos con modelos de uniones entre madera y placas de metal (Blass et al., 2000), que describen un coeficiente llamado índice de plasticidad (ξ), que es función del ángulo que forma la rótula. La Ecuación 6-37 (en adelante se llamará ecuación de Blass) permite determinar el momento plástico que, con el índice de plasticidad para el modelo base de estudio (véase Tabla 4-1) arroja un valor de 44.759 N·mm.

$$M_{y,Rk} = \frac{\xi \cdot f_{y,k} \cdot d^3}{6} = 44.759 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ecuación 6-37

Siendo:

- $f_{y,k}$ tensión de fluencia del elemento clavija.
- ξ índice de plasticidad de la clavija.

El índice de plasticidad de la clavija, según (Blass et al., 2000), se describe mediante la Ecuación 6-38 y la Figura 6-92. Cuando la rótula plástica de la clavija está desarrollada con un ángulo de giro de clavija de 45°, con grandes deslizamientos, se toma un valor límite de índice de plasticidad ($\xi = 1,0$), lo que sitúa el índice del lado de la seguridad.

$$\xi = \min \left\{ \begin{array}{l} (0,866 + 0,00295 \cdot \theta) \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-0,248 \cdot \theta}{0,866} \right)} \right) \\ 1 \end{array} \right.$$

Ecuación 6-38



Figura 6-92. Evolución del índice de plasticidad.

En la Figura 6-93 se representa la evolución del momento plástico para distintos diámetros de clavija, calculando éste mediante la ecuación de Blass, por la Ecuación 6-35 propuesta por la normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y mediante la Ecuación 6-36 expuesta en otras publicaciones (Argüelles et al., 2003). Se puede apreciar que la Ecuación 6-35 está del lado de la seguridad frente a la Ecuación 6-36. En cambio son sensiblemente coincidentes con la Ecuación 6-37, especialmente para diámetros con modo de fallo cuatro, donde se produce una plastificación de la clavija con rótulas en madera central y laterales. En el caso base, donde el diámetro toma un valor $d = 10$ mm, la última expresión también permanece del lado de la seguridad (Figura 6-93) y también lo hace en los modos de fallo que toman las clavijas de menor diámetro, mientras que para diámetros mayores se cruza con la de la normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), que es la que se sitúa ligeramente del lado de la seguridad.

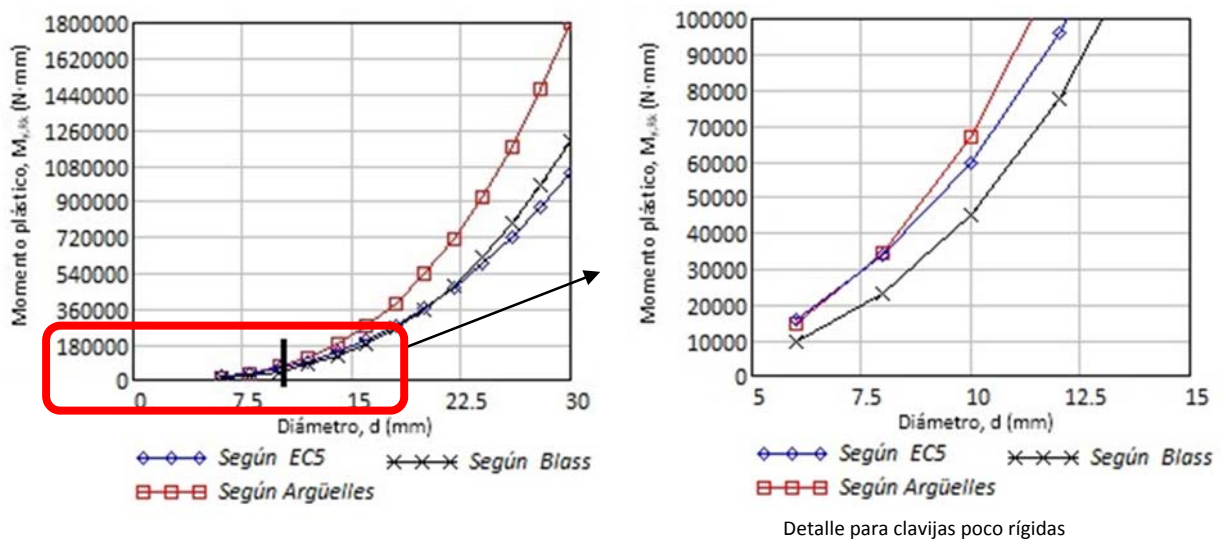


Figura 6-93. Momento plástico frente a variaciones de diámetro.

Las funciones del momento plástico, definidas en normativa (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009) no consideran el deslizamiento de la unión, debido a lo cual no se puede establecer una relación carga-

deslizamiento. Sin embargo, de cara a ratificar los resultados, se puede comparar la tendencia asintótica de la ecuación de Blass con las funciones definidas en la norma (Figura 6-95), donde se puede ver cómo a medida que evoluciona el ángulo de giro en la clavija (θ), la ecuación de Blass, que identifica el momento de resistencia a la flexión en la clavija y el ancho de aplastamiento, se acerca a los valores de la norma desde el lado de la seguridad.

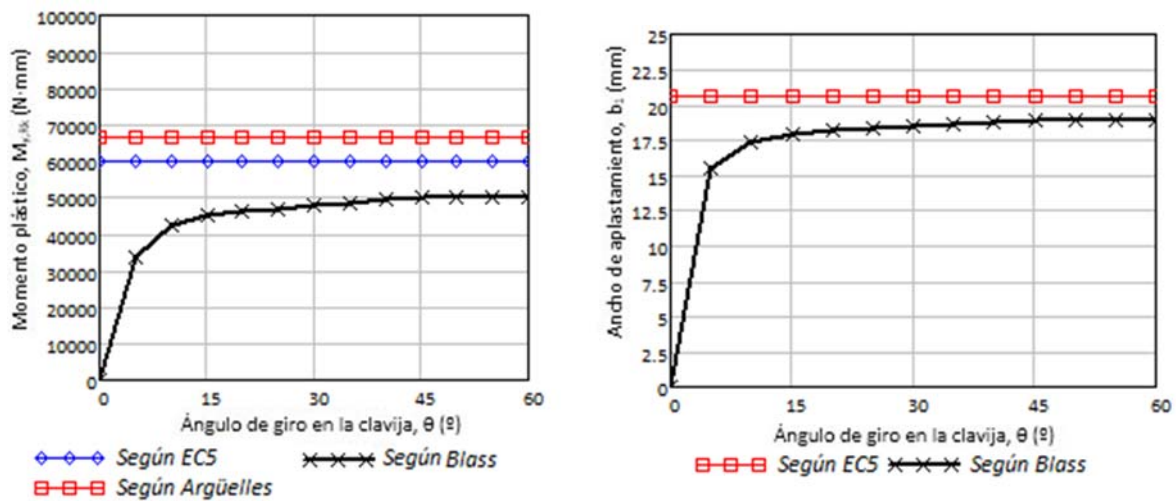


Figura 6-94. Momento plástico frente a variaciones de ángulo en rótula de clavija.

Para resolver la ecuación de Blass se ha planteado la evolución de valores con un desplazamiento $u = 15$ mm, correspondiente a lo indicado en norma de ensayo (UNE-EN 26891, 1992). Estimando como valor de arranque $b_1+b_2=41,27$ mm, según las expresiones de Johansen (Ecuación 2.45), supone un ángulo de clavija $\theta=19,97^\circ$ (Ecuación 6-21). Con ella se define el índice de plasticidad ($\xi = 0,92$), aplicando la Ecuación 6-38, lo que da lugar al momento ($M_{y,Rk} = 46.094$ N·mm), según la Ecuación 6-37, y un valor de ancho total de aplastamiento corregido ($b_1+b_2=36,26$ mm), según la Ecuación 6-24. Con esto se cierra un ciclo de iteración, iniciando de nuevo el procedimiento al sustituir $b_1+b_2 = 41,27$ mm por el nuevo valor de 36,26 mm. Los resultados convergen rápidamente a una solución estable con un ángulo $22,38^\circ$ como se indica en la Tabla 6-22, siempre en la posición de deslizamiento $u = 15$ mm. De igual forma se pueden determinar estos valores para cualquier deslizamiento.

Tabla 6-22. Resultados de iteración al cálculo del momento plástico por la ecuación de Blass.

Iteración	u	b_1+b_2 (mm)	θ ($^\circ$)	ξ	$M_{y,Rk}$ (N·mm)	$b_{t,(1+\beta)}$ (mm)
0	15	41,27	19,97	0,92	46.094,24	36,26
1	15	36,26	22,47	0,93	46.540,01	36,44
2	15	36,44	22,38	0,93	46.524,19	36,43
3	15	36,43	22,38	0,93		

El empleo de esta técnica presenta ventajas significativas:

- Trabaja con el límite elástico de la clavija en su tensión de fluencia ($f_{y,k}$) en vez de con el valor de tensión última ($f_{u,k}$).
- Considera en las ecuaciones de equilibrio la carga axil ($F_{axil,Clav}$) que se puede aplicar a la clavija para evaluar la anchura de aplastamiento (b_t), en un sistema de ecuaciones constitutivas que relacionan carga con deslizamiento, y permite conocer:
 - La evolución del ángulo de giro en la clavija (θ), que puede ser empleado como factor adimensional de rigidez (a diferencia de los 15 mm de deslizamiento fijados como límite en la norma de ensayo, independientemente del tamaño de la pieza).
 - La evolución del ancho de aplastamiento en las distintas piezas (b_1 y b_2).

- El momento flector máximo ($M_{y,Rk}$) que evoluciona a medida que la unión entra en la carga y se produce un mayor deslizamiento.

En la Tabla 6-22 se exponen los resultados para $u = 15$ mm pero dado que su empleo se puede extender a distintos valores de deslizamiento, se hace uso de un algoritmo iterativo. La Tabla 6-23 muestra los valores para distintos deslizamientos.

Tabla 6-23. Evolución del estado de cargas para distintos deslizamientos.

u (mm)	θ (°)	b_1+b_2 (mm)	Carga (N)
0	0,00	0,00	-
1	2,31	24,82	6.961,30
2	3,93	29,15	8.174,54
3	5,43	31,53	8.842,91
4	6,91	33,01	9.258,49
5	8,37	33,98	9.530,73
6	9,83	34,64	9.714,96
7	11,28	35,10	9.843,17
8	12,72	35,43	9.935,10
9	14,16	35,67	10.003,31
10	15,58	35,86	10.055,91
11	16,99	36,01	10.098,17
12	18,37	36,13	10.133,51
13	19,73	36,24	10.164,14
14	21,07	36,34	10.191,51
15	22,38	36,43	10.216,55
16	23,66	36,51	10.239,88
17	24,92	36,59	10.261,90
18	26,15	36,67	10.282,88
19	27,35	36,74	10.303,00
20	28,52	36,81	10.322,37

Esta propuesta de cálculo, a diferencia de la incluida en la normativa (que fija un valor de capacidad de carga único), permite comparar carga con deslizamiento. Por lo tanto, puede ser comparada y validada con la evolución de los ensayos. El modelo con el que se va a hacer la comparación es el correspondiente a las muestras M25 y M26, que emplean a clavijas lisas (la primera de acero S275 JR y la segunda de acero calibrado), según la Figura 6-95. Los resultados de carga para cada deslizamiento dan lugar a una trayectoria teórica acorde con el desarrollo del ensayo visto en el Capítulo 5 (una primera carga con disminución de la rigidez y una zona de meseta), teniendo en cuenta que la ecuación debe corregirse eliminando la holgura inicial. Por otro lado, las clavijas pueden presentar particularidades añadidas que pueden afectar en el caso de grandes deslizamientos, como se indicó en el Apartado 6.4.5.2. En estas muestras, la limitación de la longitud de la clavija hacía que ésta se embebiera dentro del agujero, con lo cual las superficies de contacto se modificaban, según la Figura 6-74, perdiéndose capacidad de carga, lo que ocurre una vez sobrepasados los 15 mm, para deslizamientos del orden de los 40 mm. Por este motivo, la zona de meseta toma pendientes negativas en el último tramo del ensayo. En estas figuras aún no han sido consideradas las componentes axiales ni de fricción, que también modificarían la zona de meseta.

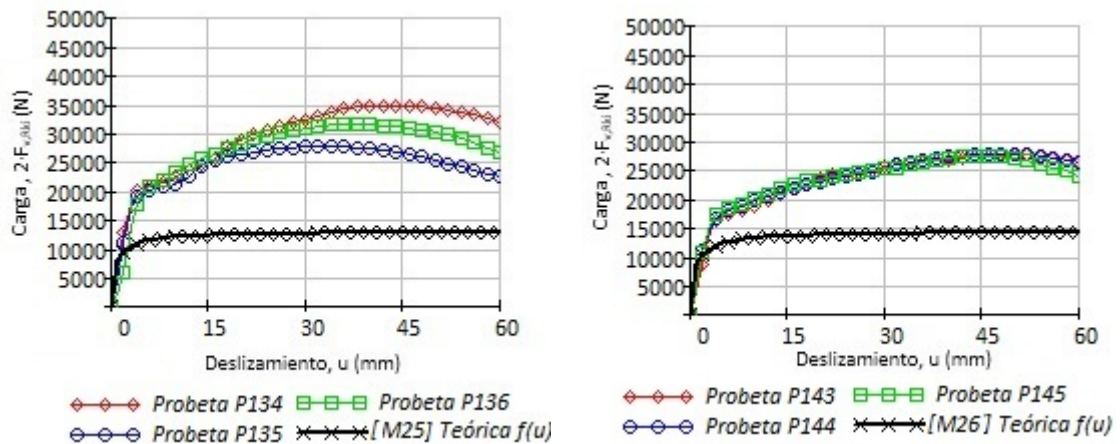


Figura 6-95. Comparación de resultados analíticos y experimentales para las muestra [M25] y [M26].

La expresión analítica hace uso de los valores resistentes propios de la norma, prescindiendo de los coeficientes de seguridad y del factor de modificación (k_{mod}), para el cálculo de la resistencia a aplastamiento en la madera. Para las tensiones de límite elástico del acero en la clavija (según la Tabla 6-1) se toman valores de $f_{y,k}=300 \text{ N/mm}^2$, frente a $f_y=443 \text{ N/mm}^2$ definido en la Tabla 3-22 a partir de los ensayos. Igualmente, la densidad considerada para la madera es de $\rho_k=380 \text{ kg/m}^3$, frente a los 438 kg/m^3 derivados de la medición por pesos de las probetas, haciendo que la función analítica se sitúe del lado de la seguridad. Conviene recordar también que el valor del efecto sogá ($F_{B,axil,Clav}$) de la Ecuación 6-24 no se ha introducido en esta etapa del cálculo analítico, lo que daría lugar a incrementar la pendiente en la zona llamada de meseta (que en caso de fijar los extremos de clavija, debe ser desarrollado). Por otro lado, las primeras fases de carga están condicionadas por criterios distintos a los de aplastamiento junto con rótulas en la clavija, y más propios de una consolidación inicial que reduce los contactos imperfectos. Como se mostró en la Figura 6-96, es previsible la existencia de holguras de montaje y asentamiento iniciales, unidas a una primera fase de comportamiento elástico de la clavija. Según se observa en la Figura 6-96, la curva de plastificación teórica no se sitúa del lado de la seguridad, considerando un ajuste perfecto y un comportamiento plástico ideal desde el primer momento.

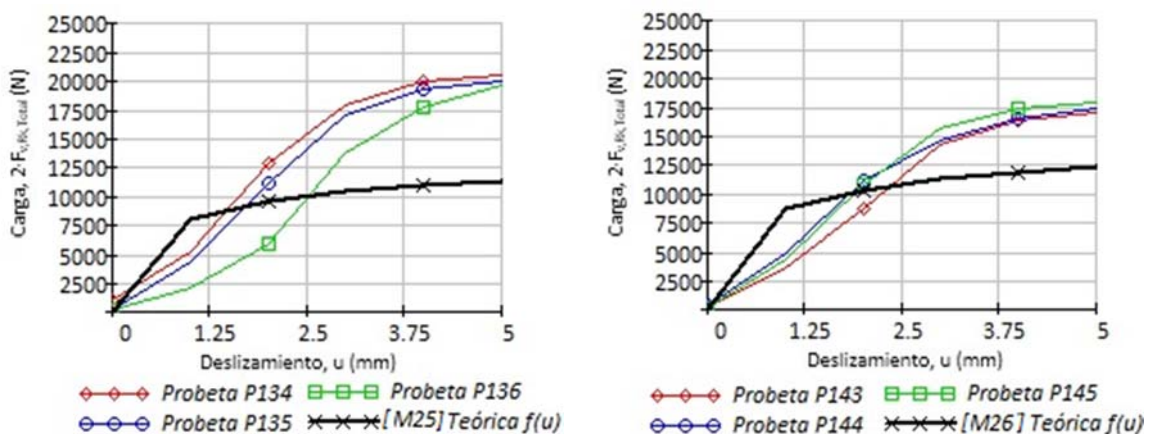


Figura 6-96. Detalle del comportamiento de la unión en los primeros tramos de deslizamiento.

Para corregir el efecto de asentamiento inicial, se considera la Ecuación 6-17 y Ecuación 6-38. Las funciones del deslizamiento son modificadas considerando el efecto de holgura y el asentamiento de la unión en el periodo inicial. El ángulo de giro en la clavija (θ) se debe corregir según la Ecuación 6-39, descontando el deslizamiento asociado a la holgura de la unión (u_{hol}) cuando aún no llega a formar rótulas en la clavija. Se trata como nulo en la fase de consolidación inicial, y evoluciona desde 0° hasta los valores límite de rigidez permitidos en el estado límite de servicio.

$$\operatorname{tag}\theta = \frac{u - u_{\text{hol}}}{b_1 + b_2}$$

Ecuación 6-39

De donde se puede despejar el valor del ancho de aplastamiento a partir de la Ecuación 6-24, que debe ser corregida teniendo que cuenta que durante los deslizamientos relacionados con la holgura no se mejora el efecto sogá, por lo que el ancho de aplastamiento corregido con la holgura queda expresado en la Ecuación 6-40.

$$b_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{y,Rk} + F_{B_axil,Clav} \cdot (u - u_{\text{hol}})}{f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot \left(\frac{\beta + 1}{2 \cdot \beta}\right)}}$$

Ecuación 6-40

La holgura entre clavija y agujero se debe identificar a partir de los criterios de montaje. También hay que considerar la superposición de elementos que se puedan dar sobre la clavija (como envolturas de adhesivo) y la capacidad de deformación de las fibras de madera en contacto con la clavija. Esto permite marcar criterios en la estimación de holguras. Partiendo de la observación del comportamiento de los ensayos, se han establecido los siguientes criterios:

- Clavija lisa en contacto simple con agujero con taladro igual al diámetro de la clavija: $u_{\text{hol}} = 0,5 \text{ mm}$, aunque sería aconsejable establecer relaciones más ajustadas en función de la dureza de la madera, del diámetro de agujero y del sistema de taladro utilizado.
- Clavija roscada: la holgura de contacto simple del caso anterior más el alto de rosca para este caso (con roscas de tipo métrico formadas con flancos a 60° , se considera análogo al paso de rosca) ($u_{\text{hol}} = \text{Paso} + 0,5 \text{ mm}$). A su vez, este deslizamiento da lugar al enclavamiento de las fibras de madera entre las roscas de la clavija.
- Clavija con adhesivo: se considera igual a la holgura de contacto simple ($u_{\text{hol}} = 0,5 \text{ mm}$), siempre que el proceso sea de inyección y se haya garantizado el contacto pleno entre adhesivo, madera y acero de la clavija.
- Clavija con expansión: se considera una holgura nula ($u_{\text{hol}} = 0$), ya que la expansión de la clavija consigue la plastificación de la madera, eludiéndose problemas de holgura y asentamientos en la unión.

Mediante la corrección de estos desplazamientos debidos a las posibles holguras, la curva carga-deslizamiento analítica se desplaza hacia la derecha, lo que le permite ajustarse mejor a los resultados experimentales. A pesar de ello, se debe tener presente que es una simplificación para considerar los asentamientos iniciales y los efectos de comportamiento elástico propios de las primeras fases del periodo de carga. En la Figura 6-97 (muestras M25 y M26), se muestra el detalle del tramo de deslizamiento entre 0 y 5 mm, donde se ve que la línea gruesa representa la evolución analítica corregida. Aun así, en la probeta P136 se puede observar la posibilidad de que existan pequeños tramos que no están del lado de la seguridad, a consecuencia del proceso de fabricación, montaje y comportamiento elástico inicial, lo que hace necesario una corrección en el índice de plasticidad.

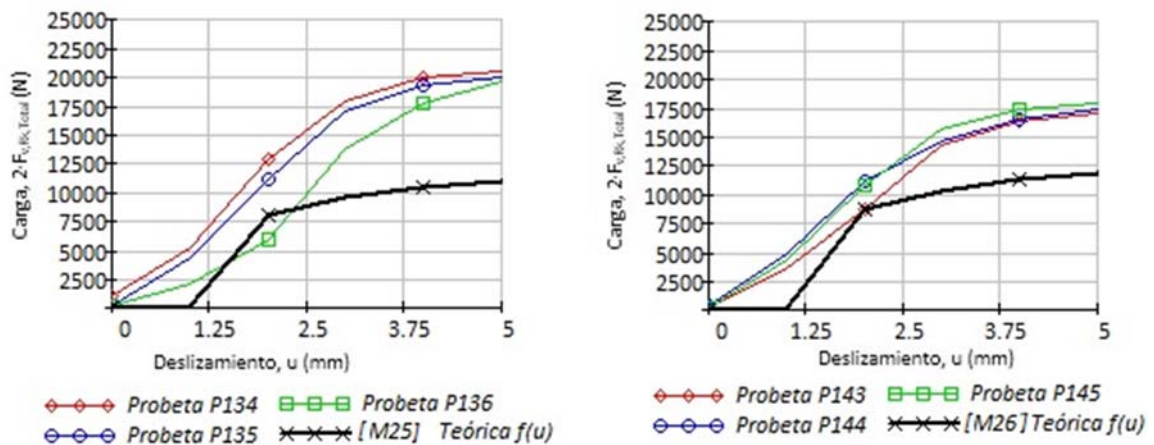


Figura 6-97. Detalle de evolución de deformación con correcciones de holgura.

El índice de plasticidad (ξ) propuesto (Blass et al., 2000) es desarrollado a partir de ensayos con clavijas lisas y se planteó como una función que dependía del ángulo de giro en la clavija (θ) y del diámetro (d). En el trabajo de (Blass et al., 2000) se estudiaron diámetros de agujero de 8, 16 y 24 mm, considerando que la dependencia del diámetro se daba especialmente en la zona donde había más cambio de pendiente al pasar de un comportamiento inicial rígido a una zona de meseta, y se simplificaba posteriormente la expresión al suponer poco relevante la variación del diámetro (d) frente al ángulo de giro en la clavija (θ). En consecuencia, la Ecuación 6-38 solo era tratada en función del ángulo de giro de clavija. Del análisis de las muestras ensayadas se desprende la misma conclusión, pero dado que sí existe una dependencia del coeficiente en función del diámetro y que esa simplificación coloca la función fuera de la zona de seguridad, se plantea la corrección del coeficiente según la Ecuación 6-41 para considerar la influencia del diámetro.

$$\xi = \min \left\{ \begin{array}{l} (0,866 + 0,00295 \cdot \theta) \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-C_{Ate} \cdot \theta}{0,866 \cdot d_{int}^{1,5}} \right)} \right) \\ 1 \end{array} \right.$$

Ecuación 6-41

Siendo:

- ξ índice de plasticidad.
- θ ángulo de giro de la clavija, en radianes.
- d diámetro interior de la clavija, en mm.
- C_{Ate} coeficiente de atenuación al índice de plasticidad, de valor 2,48.

De esta forma, tanto el índice de plasticidad (ξ) como el momento plástico ($M_{y,Rk}$) (ahora ya referido al diámetro interior de la clavija (d_{int}) en lugar del nominal del agujero (d)) se atenúan en la zona de transición entre los estados iniciales de comportamiento elástico y la situación de plastificación, donde las pendientes son menos pronunciadas (véase Figura 6-98).

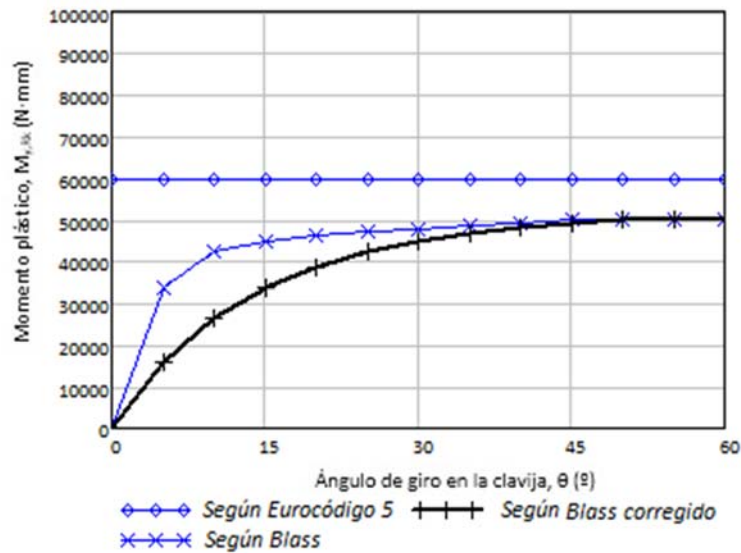


Figura 6-98. Corrección en la resistencia del momento plástico de la clavija.

Así pues, al introducir un desplazamiento a la derecha de la ecuación analítica, al considerar la holgura (u_{hol}) y atenuar la resistencia a flexión en la zona de transición de comportamiento elástico a plástico contemplando el diámetro de clavija, la función analítica propuesta se ajusta de una forma más precisa (y por el lado de la seguridad) al comportamiento de los primeros estados de desplazamiento, como se desprende al comparar la Figura 6-97 y la Figura 6-99.

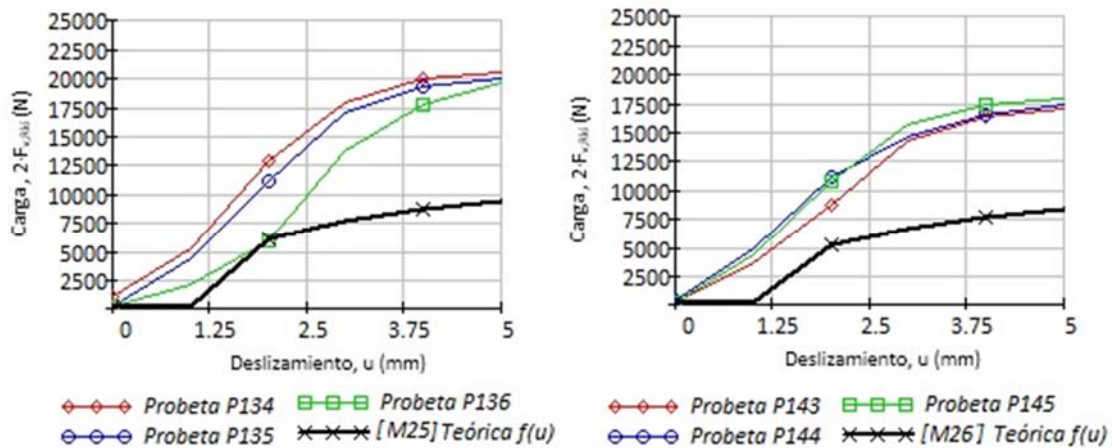
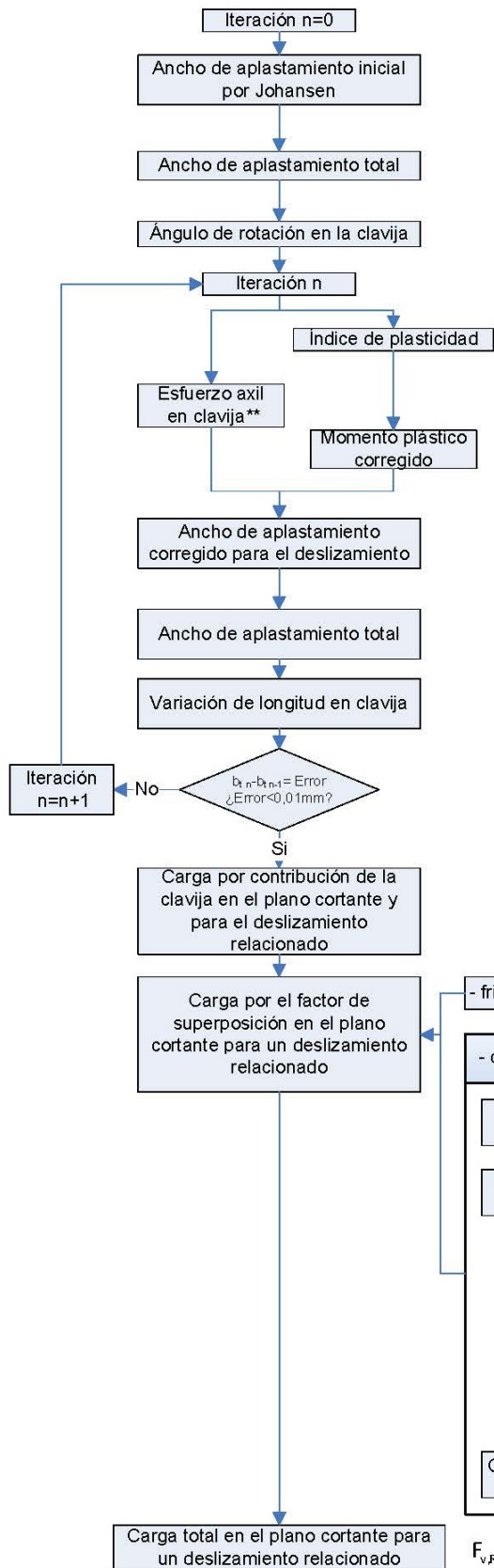


Figura 6-99. Detalle de la evolución de deformación con correcciones de holgura y momento plástico.

El proceso de cálculo requiere hacer una primera estimación del momento plástico. Dado que, inicialmente, el ángulo de giro de la clavija (θ) es desconocido, es necesario plantear una primera iteración de cálculo (iteración 0) sin introducir el ángulo. En la iteración 0 también se desconocen los esfuerzos axiales que se producen en la clavija, ya que en gran medida dependen del ángulo de giro. Una vez estimado θ , ya se puede calcular el índice de plasticidad y la posibilidad de introducir los efectos axiales de la clavija.

Para analizar la capacidad de carga de la unión, puede utilizarse el diagrama de cuerpo libre de la pieza de madera lateral, donde el ancho de aplastamiento (b_1) es un factor determinante; pero también pueden actuar las componentes de capacidad resistente en intercaras de madera descritas en la Ecuación 2-29 y, dado que son dependientes del deslizamiento, deben tratarse como una función de la rigidez. En consecuencia, se plantea el proceso según el flujo de cálculo mostrado en la Figura 6-100.



$$b_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{y,Rk,n=0}}{f_{h1,k} \cdot d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}}$$

$$b_t = b_1 + b_2 = b_1 \cdot \left(\frac{1 + \beta}{\beta}\right)$$

$$\text{tag} \theta = \frac{u - u_{hol}}{b_1 + b_2}$$

$$\xi = \text{mín} \left\{ \begin{array}{l} (0,866 + 0,00295 \cdot \theta) \cdot \left(1 - e^{\frac{-C_{Ap} \cdot \theta}{0,866}}\right) \\ 1 \end{array} \right.$$

$$M_{y,Rk} = \frac{\xi \cdot f_{y,k} \cdot d^3}{6}$$

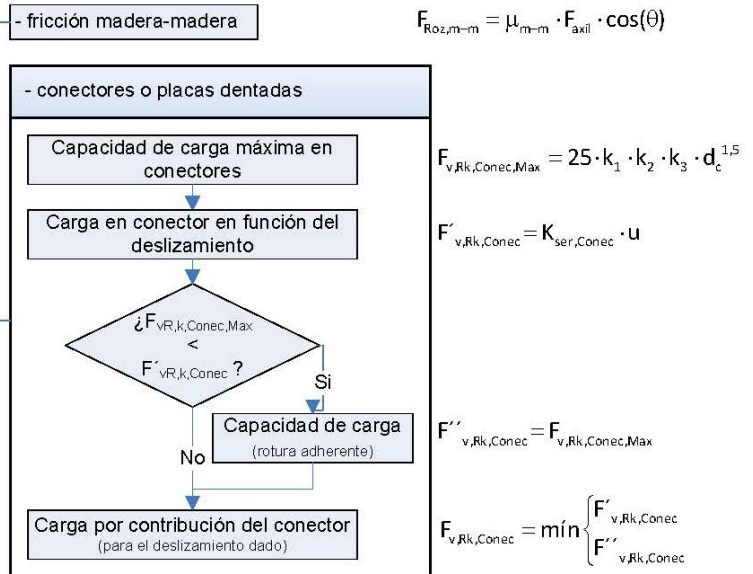
$$b_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot M_{y,Rk} + F_{B_axil,Clav} \cdot (u - u_{hol})}{f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot \left(\frac{\beta + 1}{2 \cdot \beta}\right)}}$$

$$b_t = b_1 + b_2 \cdot \left(\frac{1 + \beta}{\beta}\right)$$

$$\Delta L = u \cdot \left(\frac{1 - \cos(\theta)}{\sin(\theta)}\right)$$

$$F_{v,Rk,Clavija} = f_{h1,\alpha,k} \cdot d \cdot b_1$$

$$F_{Roz,m-m} = \mu_{m-m} \cdot F_{axil} \cdot \cos(\theta)$$



$$F_{v,Rk,Total} = F_{v,Rk,Clavija} + F_{v,Rk,Roz,m-m} + F_{v,Rk,Conec}$$

Figura 6-100. Diagrama de flujo para el cálculo de la relación de carga frente a deslizamiento.

6.5.2 Influencia del efecto sogá

6.5.2.1 Combinación de factores que contribuyen al efecto sogá

Como se ha demostrado en el apartado anterior, la fuerza axil que se produce en la clavija, relacionada con el efecto sogá, afecta a la anchura de aplastamiento (Ecuación 6-40) y, en consecuencia, a la capacidad resistente de la unión con clavija para cada plano sometido a cortante (Ecuación 6-32). Para analizar la fuerza axil, se consideran los esfuerzos que pueden afectar a lo largo de la clavija, especialmente en aquel punto donde el momento flector sea máximo ($F_{B_axil,Clav}$). Teniendo en cuenta que este factor puede afectar a otras componentes, como la fuerza de rozamiento en la intercaras de madera, también es de interés definir el esfuerzo axil en el punto A correspondiente al plano de intersección de clavija e intercaras de madera expuestas a deslizamiento relativo (Figura 6-86 C). Tratando la contribución por esfuerzo axil de una forma amplia, en los modelos estudiados se identifican las componentes de esfuerzos axiles con origen en los distintos factores expuestos en la Ecuación 6-42.

$$F_{B_axil,Clav}=F_{axil,Aran}+F_{axil,Adhe}+F_{axil,Roz,Agu}+F_{axil,Incro}+F_{axil,Expan}$$

Ecuación 6-42

Las componentes que intervienen en la anterior ecuación se describen a continuación:

- Fuerza asociada a fijaciones en los extremos de la clavija ($F_{axil,Aran}$). Uno de los orígenes más habituales de este tipo de fuerzas se vincula con la colocación de tuerca-arandela, que puede dar lugar a plastificaciones en la madera, en la superficie en contacto bajo la arandela, en la misma dirección en la que se desarrolla el efecto sogá. También podría estar relacionado con la existencia ensanchamientos en los extremos de clavija, por ejemplo la cabeza de los clavos.
- Fuerza por adherencia entre la superficie de la clavija y la del agujero ($F_{axil,Adhe}$). En este grupo se pueden encuadrar las componentes de fuerza debidas a adhesivos como el epoxi, especialmente cuando ya se ha producido cierta plastificación en la madera y la aparición de las rótulas plásticas da lugar a trabajo de cortante entre madera y clavija.
- Fuerza por rozamiento entre la superficie de la clavija y la del agujero ($F_{axil,Roz,Agu}$). Esta componente habitualmente se desprecia, pero la técnica de cálculo que se plantea en este trabajo nos permite obtener sus cuantías y, por lo tanto, saber la proporción en que pudiera contribuir de una forma más exacta; especialmente cuando la geometría de la clavija es tratada para potenciar la fricción, como pueden ser las clavijas con moleteado y las zonas de plastificación, donde las fuerzas normales serán mayores (como se pudo ver en los modelos de elementos finitos).
- Fuerza por incrustación entre clavija y madera ($F_{axil,Incro}$). Se puede relacionar con la resistencia a extracción en el caso de tirafondos, pero dado que las exigencias estructurales suponen diámetros de clavija mayores (en los modelos se han llegado a estudiar clavijas de diámetro 30 mm), se relaciona este factor con la colocación de las fibras de madera entre los filetes de sistemas roscados a medida que se produce el deslizamiento en la unión. Una vez que las fibras han ocupado estos espacios y la clavija tiende a desplazarse en sentido longitudinal como consecuencia del efecto sogá, las fibras incrustadas en los filetes presentan una resistencia que se opone al movimiento de la clavija.
- Fuerza por sistemas de expansión ($F_{axil,Expan}$). Dado que los sistemas de expansión tienen un espectro muy amplio, se considera como factor independiente de los anteriores, puesto que cada sistema de expansión posee características muy particulares.

Cada uno de ellos provoca distribuciones de tensiones de tracción distintas en cada sección de la clavija. La Figura 6-101 muestra un análisis simplificado de los esfuerzos de tracción a lo largo de la clavija, considerando los más importantes:

- La fijación de los extremos con tuerca-arandela permite transmitir las tensiones a la superficie de la madera, bajo las arandelas por contacto. En este caso, las tensiones axiales son constantes a lo largo de toda la clavija. Además, como se vio en los ensayos, permiten que la zona de meseta propia de la zona de rótula plástica tome una pendiente positiva, con un aumento de la capacidad resistente de la unión de forma progresiva.
- Los axiales por adherencia entre la superficie de la clavija y la del agujero son destacables porque la capacidad de carga se transmite fuera del ancho de aplastamiento en la pieza lateral (b_1) y permite distribuir tensiones de tipo cortante en las superficies de contacto de la clavija con el agujero. Su definición a lo largo de la clavija no es tan sencilla como en el caso anterior, como exponen trabajos realizados por algunos autores sobre barras encoladas (Otero, 2009) y, además, depende de la longitud adherida (que disminuye al aumentar b_1).
- Otras fuerzas, como las de rozamiento, incrustación o expansión pueden ser más variables en magnitud y zona de aplicación. Por ejemplo, la de rozamiento está ligada a las zonas de plastificación de la madera; esta fuerza se relaciona con las tensiones de compresión en la madera ($f_{c,\alpha,k}$) (que están relacionadas con las fuerzas normales máximas en los tramos de plastificación (b_1)) y, aunque también se da, es menor en las zonas en las que la tensión de aplastamiento de la madera es más reducida (a_1), siendo nula en la transición.

En la Figura 6-101 se representan aproximaciones a los diagramas de esfuerzo axial que se puedan dar en la clavija para parte de los sumandos de la Ecuación 6-42, habiendo un estudio más detallado en los apartados siguientes. Resulta interesante conocer el esfuerzo de tracción en el punto “B”, donde el momento flector es máximo, según se indicó en la Figura 6-88, porque es el que se debe introducir en la ecuación que define el ancho de aplastamiento. También es importante conocer el esfuerzo de tracción en el punto “A”, porque con él se define la componente perpendicular a las intercaras de madera expuestas a deslizamiento y, por lo tanto, afecta a la fuerza de rozamiento en éstas ($F_{roz,m-m}$). Ambos puntos van a ser tratados como análogos a efectos de cálculo de esfuerzos axiales; las magnitudes mayores de estos axiales van a surgir en zonas que no se sitúan entre ellos (es decir, entre los puntos “A” y “B”, no se considera una variación significativa de axiales).

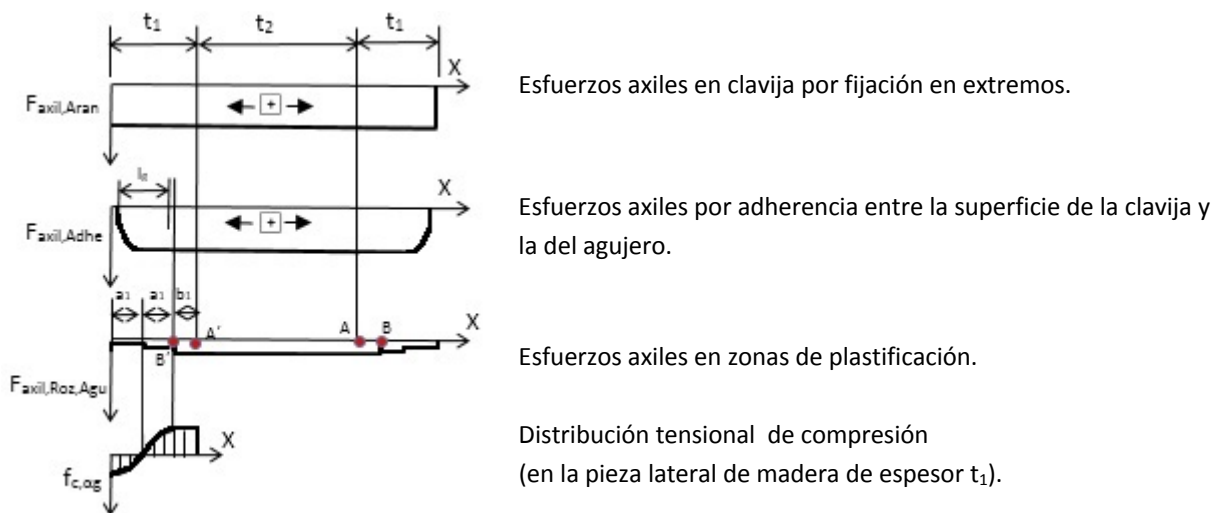
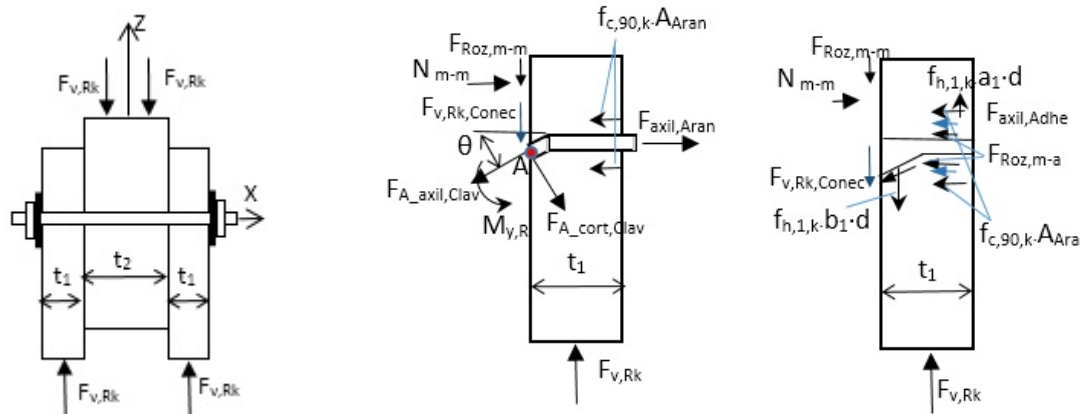


Figura 6-101. Distribución de componentes por esfuerzo axial.

Considerando las tensiones de tracción de la clavija colocadas sobre la unión, se actualizan los diagramas de cuerpo libre según se muestran en de la Figura 6-102.



A) Modelo de unión con el sistema de referencia. B) Pieza de madera de espesor t_1 junto con la porción de clavija embebida. C) Pieza de madera de espesor t_1 .

Figura 6-102. Diagramas de cargas en la unión con fuerzas axiales en la clavija.

Si se hace el análisis de las fuerzas sólo para la componente alineada con las intercaras del nudo (dirección del eje Z según Figura 6-102 A), se deben tratar las ecuaciones de equilibrio desde el punto "A", dando lugar al vector ($F_{A_axil,Clav,z}$) definido a partir del vector $F_{A_axil,Clav}$ (Ecuación 6-43). El sistema material de la clavija junto con la pieza lateral de la madera está representado la Figura 6-102 B, donde la componente en la dirección de la carga para la unión evoluciona desde 0, creciendo con el ángulo de giro de la clavija (θ) a medida que aumenta la plastificación (Figura 6-103); pero presenta el inconveniente de tener que caracterizar la componente de esfuerzo cortante ($F_{A_cort,Clav,z}$), motivo por el cual se centra el trabajo en analizar el diagrama del cuerpo libre sólo con la pieza de madera (Figura 6-102 C), donde se requiere la fuerza axil en la clavija para el punto "B".

$$F_{A_axil,z} = F_{A_axil,Clav} \cdot \text{sen}(\theta)$$

Ecuación 6-43

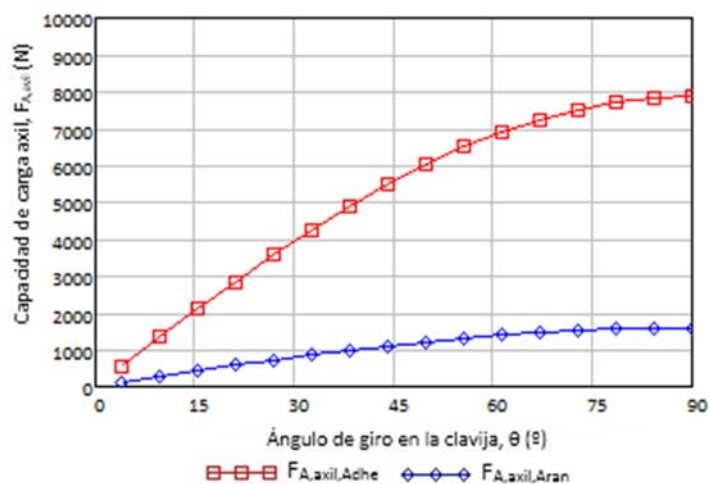


Figura 6-103. Carga axil frente a la evolución de ángulo de rótula.

Los esfuerzos de tracción evolucionan según la posición de la unión, por lo que el bloque definido como "Esfuerzo axil en clavija ***" en el flujograma de la Figura 6-100 se desarrolla con valores que tendrán distinto comportamiento en función del deslizamiento que tenga la unión. Estas componentes se exponen en el diagrama de flujo de la Figura 6-104 y, dado que cada uno de ellos puede presentar particularidades, son estudiadas con más detalle en los siguientes apartados.

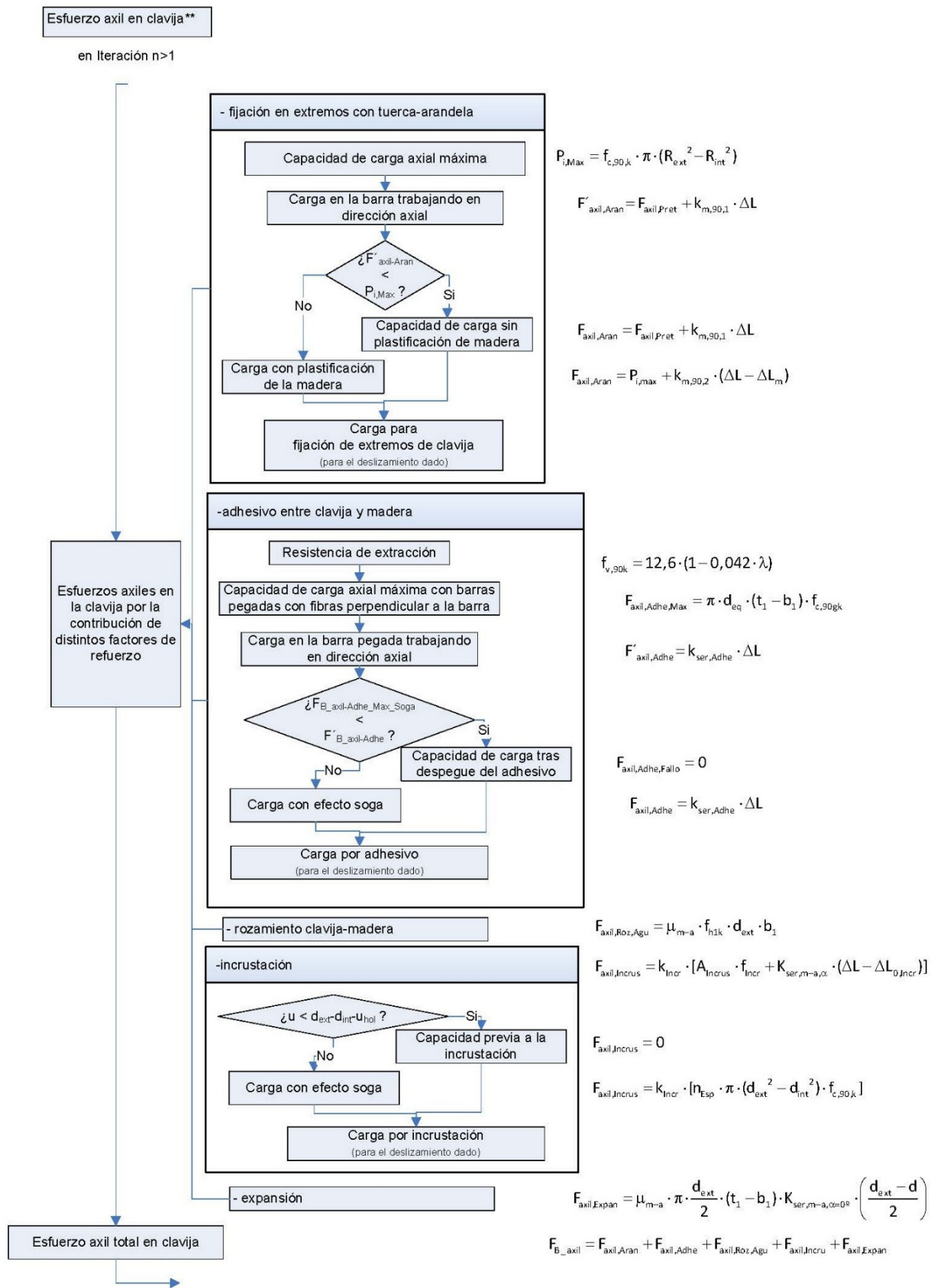


Figura 6-104. Flujoograma principal para la determinación de cargas axiales en la clavija en función del deslizamiento.

6.5.2.2 Factor sogá por fijaciones de extremo de clavija con tuerca y arandela

Las gráficas de los ensayos han mostrado cómo la fijación con tuerca-arandela en los extremos de la clavija mejora la resistencia de la unión en comparación con la clavija en flexión simple (Figura 6-58), permitiendo a estos sistemas incrementar la capacidad de carga de la unión a medida que se produce mayor deslizamiento. Al analizar las secciones en el corte transversal de las probetas, se pueden apreciar mejoras debido a:

- La redistribución de tensiones en la madera hacia las regiones de la periferia, especialmente en la superficie de contacto de la arandela con la madera.
- El incremento del ancho de aplastamiento en la madera, derivado del efecto sogá al transmitir la carga desde la zona de deslizamiento de las intercaras de la madera a los extremos de la clavija.
- La mejora de las fuerzas de rozamiento en las intercaras, de modo progresivo y continuado al aumentar la fuerza normal en estos planos.
- La limitación de desplazamientos de la clavija en los agujeros de la madera, que facilita la incrustación de las fibras de madera en la clavija cuando toda la clavija presenta irregularidades, por ejemplo, por roscado. También mejora el rozamiento entre clavija y madera.

Estos efectos no se producen de forma simultánea, no son muy relevantes con pequeños deslizamientos pero, proporcionalmente, contribuyen más en las fases avanzadas de plastificación de la madera, cuando se forman las rótulas plásticas, por lo que se hace necesario identificar los parámetros que les afectan. El diámetro de arandela es uno de los factores más relevantes, como así lo sugieren las recomendaciones que exigen que tenga al menos tres veces el diámetro de la clavija (DB SE M, 2009). La superficie de contacto de la arandela y la madera está relacionada con el efecto sogá y la transmisión de compresión sobre estos planos exteriores. Teniendo en cuenta los diagramas de cuerpo libre en estas zonas (véase Figura 6-86 D), se pueden identificar los valores que relacionan la tensión en la madera y la superficie expuesta a aplastamiento, según la Ecuación 6-44.

$$F_{axil,Aran} = f_{c,90,k} \cdot A_{Aran} = f_{c,90,k} \cdot \pi \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$$

Ecuación 6-44

Siendo:

- $F_{axil,Aran}$ carga axial producida por la arandela.
- $f_{c,90,k}$ tensión de plastificación en la superficie de contacto madera-arandela, suponiendo las fibras de la madera contenidas en el plano perpendicular al eje X.
- A_{Aran} área de contacto entre madera y arandela.
- R_{ext} radio exterior de arandela.
- R_{int} radio interior de arandela.

La fuerza axil por estas fijaciones es variable, siendo necesario establecer una relación que la facilite una precarga inicial que es conveniente aplicar, es decir, un pretensado de valor conocido (a modo de unión con empaquetadura), que evolucione incrementando el axil en la clavija a medida que los planos de contacto entre arandela y madera sufran plastificación. El objetivo es conocer el origen de esfuerzos axiales, para sumarle el valor obtenido a partir de la deformación en la dirección de la clavija y la rigidez en la empaquetadura, para valorar el incremento de esfuerzo axil en la clavija como función del deslizamiento.

6.5.2.2.1 Pretensado en la clavija con fijación en extremos de tipo tuerca-arandela

Para minimizar las posibles holguras y lograr un trabajo lo más simultáneo posible, es necesario definir un apriete correcto. Por ello se plantea la necesidad de estudiar el pretensado como factor de diseño que facilita el ajuste en los sistemas roscados (Shighey et al., 2008). La definición de un pretensado correcto permite mejorar el trabajo a tracción de la clavija, reduciendo los efectos cortantes que dan lugar a las rótulas plásticas y ampliando el ancho de

aplastamiento en las zonas más críticas de la unión. Además, mejora el efecto de fricción, que si bien se ha venido despreciando en la unión clavija (Johansen, 1949), como se vio en el Capítulo 2, puede ser más significativo al aumentar el efecto soga. Definir un pretensado inicial controlado presenta una serie de ventajas:

- Permite fijar un valor de la fuerza axil de modo más preciso y, en consecuencia, evaluar esta componente de efecto soga.
- Reduce holguras y el deslizamiento inicial.
- Impide la separación de los elementos por cargas o deformaciones imprevistas.
- Mejora la resistencia a posibles cargas cíclicas y de fatiga.

En consecuencia, un control del pretensado permite mejorar la correcta disposición de clavijas con tuerca-arandela. Para evaluarlo, se debe tener en cuenta la rigidez relativa de los distintos elementos que forman el sistema de empaquetadura, en función de la carga y la deformación, quedando relacionado con este valor; en el caso de tener elementos con distintas propiedades mecánicas, como pueden ser el acero y la madera, la rigidez responde a un valor equivalente, según la Ecuación 6-45.

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_i}$$

Ecuación 6-45

Si se considera la clavija de material metálico, la rigidez se puede definir con la Ley de Hooke. Debido a las posibles variaciones de esfuerzos de tracción a lo largo de la clavija (Figura 6-101), la rigidez puede presentar distintos valores, por lo que debe estar relacionada con la carga (P) que se aplica en cada zona, según la Ecuación 6-46.

$$k_a = \frac{P_a}{\Delta L_a} = \frac{A_{Clav} \cdot E_{Clav}}{L_a}$$

Ecuación 6-46

Siendo:

- k_a rigidez de la clavija de acero, en N/mm.
- P_a carga de tracción a lo largo de la clavija, en N.
- ΔL_a variación de longitud por alargamiento en la clavija, en mm.
- A_{Clav} área de la sección transversal de la clavija, en mm². En el caso de varillas roscadas se toma como función del diámetro interior de la clavija (d_{int}), por lo que se aplica la relación $A_{Clav} = \pi \cdot d_{int}^2 / 4$.
- E_{Clav} módulo de elasticidad de la clavija, en N/mm².
- L_a Longitud de la clavija expuesta a las cargas (P_a), en mm.

Cuando los esfuerzos de tracción axiles debidos a las fijaciones tuerca-arandela se supongan mayores frente a otros (como la fuerza de rozamiento entre agujero y clavija), la fuerza de tracción se puede aproximar a un valor constante a lo largo de toda la clavija, aunque se debe tener cuidado con esta simplificación, especialmente si se introduce otro tipo de esfuerzos como: la incrustación de elementos en los agujeros mediante las pestañas de kits de expansión o la inyección de adhesivos entre clavija y agujero.

En el caso del material de empaquetadura, el volumen de la madera sometida a la compresión de la arandela no puede obtenerse con facilidad, porque la compresión se difunde desde la cabeza de tuerca y arandela en un área que no es uniforme. Algunos trabajos identifican que la presión se mantiene alta hasta una distancia de aproximadamente 1,5 radios del perno y disminuye a medida que se aleja (Shighey et al., 2008), con lo que sugiere emplear el método del cono de presión de Rotscher para calcular la rigidez, que responde a la Ecuación 6-47.

$$k_m = \frac{P_m}{\Delta L_m} = \frac{\pi \cdot E_{90gm} \cdot d \cdot \tan(\alpha_i)}{\ln \left(\frac{(2 \cdot t_1 \cdot \tan(\alpha_i) + D_{Ext} - D_{Int}) \cdot (D_{Ext} + D_{Int})}{(2 \cdot t_1 \cdot \tan(\alpha_i) + D_{Ext} + D_{Int}) \cdot (D_{Ext} - D_{Int})} \right)}$$

Ecuación 6-47

Siendo:

- k_m rigidez de la empaquetadura.
- P_m carga de tracción a lo largo de la clavija, en N.
- ΔL_m variación de longitud por aplastamiento en la madera, en mm.
- α_i ángulo del tronco de cono. Con empaquetaduras metálicas se plantean ángulos de 45º, pero para materiales blandos debe ser reducido. De los ensayos se desprenden valores de 4º.
- D_{Ext}, D_{Int} diámetro de la arandela: exterior e interior, respectivamente.
- t_1 espesor de las piezas de madera sometidas a la distribución tensional. Para el modelo de unión con clavija en cortadura doble se fija en t_1 , al considerar que el comportamiento de plastificación de la empaquetadura no se propaga fuera de pieza lateral.

Teniendo en cuenta las constantes de rigidez, se puede plantear una precarga límite ($P_{i,max}$) a partir de la cual la madera plastificaría. Este valor sirve como referencia para fijar un pretensado de la unión ($P_{axil,Pret}$) menor y debe estar relacionado con el par torsor a dar en la tuerca durante el montaje de la unión. La Figura 6-105 representa el modelo de empaquetadura, con la clavija evolucionando en tracción y la madera en compresión (motivo por el cual la variación de longitud se representa en valor absoluto). En el plano de contacto entre madera y arandela se incrementa la carga de compresión y la pérdida de espesor en un factor ($k_m \cdot P$) a medida que la madera se va plastificando. En el factor de rigidez cabe esperar dos comportamientos: un primer valor en el cual la madera responde a un comportamiento elástico ($k_{m,\alpha,1}$) hasta sobrepasar los límites de plastificación, y un segundo tramo en el cual la madera presente otra rigidez ($k_{m,\alpha,2}$) propia de un comportamiento plástico.

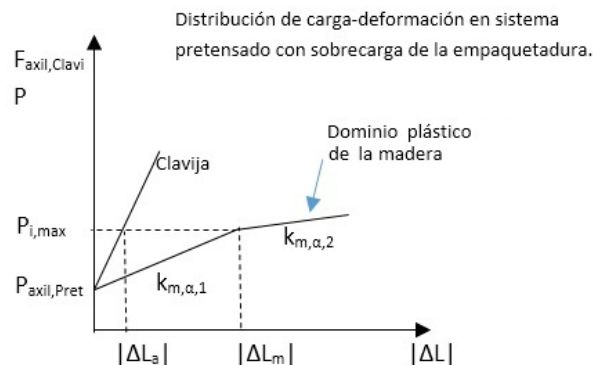


Figura 6-105. Comportamiento de pretensado en clavija y empaquetadura.

En Figura 6-105, las funciones no están escaladas, de tal forma que el comportamiento elástico del acero, en la realidad, es más rígido en relación a la madera. En consecuencia, la variación de longitud por alargamiento en la clavija de acero (ΔL_a) es mucho menor que la debida a la compresión que se puede producir en la empaquetadura de madera (ΔL_m), al ser un material mucho más blando. En la madera se sobrepasan los límites de plastificación de forma semejante a lo que ocurre en la zona de aplastamiento del agujero por la clavija. Esto queda representado a la derecha de la segunda línea discontinua vertical, donde la arandela se incrustaría en la madera, siempre que los valores de la precarga límite ($P_{i,max}$) se hubieran sobrepasado.

A partir de la carga de pretensado ($P_{axil,Pret}$) dada en los extremos de la clavija, el esfuerzo axial se va incrementando a medida que la superficie de contacto de la madera con la arandela se ve sometida a compresión. En los ensayos donde se ha expuesto la unión a deslizamientos extremos (se han llegado a valores de $u = 60$ mm), ha dado lugar

también a plastificaciones apreciables en los extremos de la clavija (ΔL). Incluso se han dado situaciones de plastificación de la arandela, adoptando forma troncocónica por el efecto de la tuerca y la presión de la madera (Figura 6-106). En consecuencia, la plastificación en las superficies de contacto entre madera y arandela da lugar a incrementos en las tensiones ejercidas sobre la arandela, llegando a sobrepasar el límite elástico del metal. Por ello, los límites de pretensado deben considerar la capacidad de carga de la madera y del acero. En el caso de la madera, pueden estar relacionados con la tensión de aplastamiento a compresión de este material ($f_{c,\alpha,k}$); mientras que, en el acero, los fallos se pueden dar en la arandela o por fallo de la clavija. Debe considerarse el fallo en tracción de la clavija como el más relevante, dado que puede dar lugar a un estado límite último (ELU) para la unión. Tanto en la rigidez de la madera ($k_{m,\alpha,i}$) como en la tensión de compresión de la madera ($f_{c,\alpha,k}$), el ángulo expuesto en el subíndice (α) representa la orientación entre las fibras de madera y la orientación de la carga de pretensado. Se toma $\alpha = 90^\circ$, dado que habitualmente se dispondrán las fibras en sentido transversal a las cargas de pretensado.

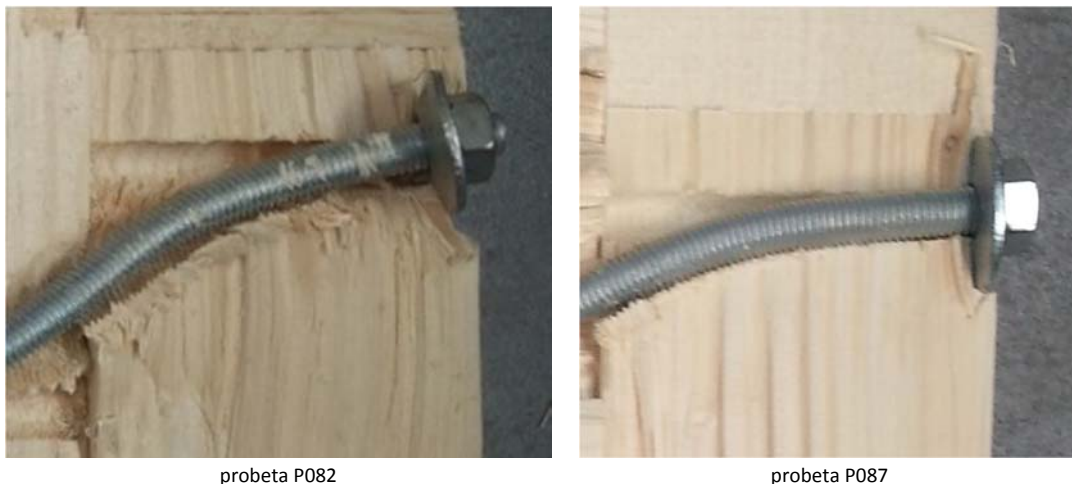


Figura 6-106. Detalle de estado final en extremos de clavija fijados con tuerca-arandera.

Para calcular el pretensado de la unión ($P_{axil,pret}$), se parte de la precarga límite ($P_{i,Max}$) que se podría aplicar a la clavija, según la Ecuación 6-48. Habitualmente la madera es el material más blando y, por lo tanto, el límite de aplastamiento de la madera suele ser el mínimo, frente a los límites de capacidad de carga de la clavija si se considera de acero.

$$P_{i,Max} = \min \begin{cases} f_{c,90,k} \cdot A_{Arandela} \\ f_{y,k} \cdot A_{Clavija} \end{cases}$$

Ecuación 6-48

Siendo:

- $P_{i,Max}$ precarga límite aplicada a la tuerca a partir de la cual se produce plastificación en la empaquetadura, en N.
- $f_{c,90,k}$ resistencia a compresión en la madera en dirección perpendicular a la fibra, en N/mm^2 .
- $f_{y,k}$ tensión de fluencia en la clavija, en N/mm^2 .
- A_{Aran} área de la arandela en contacto con la madera, en mm^2 .
- $A_{Clavija}$ área neta de la clavija, en mm^2 .

Dado que en la madera se aumentan las tensiones de compresión y en la clavija aparecen otros esfuerzos, a medida que la unión entra en carga, que obligan a considerar tensiones de comparación combinadas, el pretensado de la unión ($P_{axil,pret}$) que debe ser aplicado debe estar por debajo del límite establecido en la Ecuación 6-48. Se tomará un 50 % del mayor límite ($P_{axil,pret} = 0,5 \cdot P_{i,max}$), aunque se considera que, una vez que la clavija se vea expuesta a carga (de forma análoga a la zona interior), la madera pueda plastificar en la zona de contacto con la arandela, mientras que la arandela se considera suficientemente rígida como para no presentar deformaciones permanentes.

Para aplicar el pretensado a la unión ($P_{axil, Pret}$) o aquella otra carga (P_i) que fuera necesaria, se requiere conocer el momento torsor aplicable a la llave dinamométrica. En este momento intervienen tres factores: el propio momento necesario para conseguir el pretensado ($M_{torsor, Pi}$), el requerido para vencer la fricción en la tuerca en la zona de contacto con la arandela ($M_{torsor, Tuerca}$) y el momento que se debe aplicar para vencer la fricción entre tuerca y planos de flanco de los filetes de contacto de la varilla roscada ($M_{torsor, Filete}$), suma que da lugar a la Ecuación 6-49.

$$M_{torsor} = M_{torsor, Pi} + M_{torsor, Tuerca} + M_{torsor, Filete}$$

Ecuación 6-49

Para determinar cada uno de los tres sumandos, se consideran las tres ecuaciones siguientes.

$$M_{torsor, Pi} = P_i \cdot \frac{\text{Paso}}{2 \cdot \pi}$$

Ecuación 6-50

$$M_{torsor, Tuerca} = P_i \cdot \mu_{Tuerca} \cdot R_{Tuerca}$$

Ecuación 6-51

$$M_{torsor, Filete} = \frac{P_i \cdot \mu_{Filete} \cdot r_{medio}}{\cos(\alpha_{Filete})}$$

Ecuación 6-52

Siendo:

- $M_{torsor, Pi}$ momento torsor para conseguir el pretensado.
- $M_{torsor, Tuerca}$ momento torsor para vencer la fricción en la tuerca.
- $M_{torsor, Filete}$ momento torsor para vencer la fricción en el filete.
- P_i precarga aplicada a la tuerca, en N.
- μ_{Tuerca} coeficiente de rozamiento entre la tuerca y la arandela.
- R_{Tuerca} radio medio de la tuerca.
- r_{medio} radio medio del flanco de filete de rosca.
- μ_{Filete} coeficiente de rozamiento entre la tuerca y el filete de rosca.
- α_{Filete} ángulo en el flanco de filete de rosca.

Los coeficientes de rozamiento entre acero y acero se establecen según (Shighey et al., 2008) en la Tabla 6-24; se fija en 0,2 para los modelos de cálculo.

Tabla 6-24. Coeficientes de fricción en acero [(Shighey et al., 2008) Tabla 8.5].

Material de clavija	Material de la tuerca			
	Acero	Bronce	Latón	Hierro fundido
Acero	0,15-0,25	0,15-0,23	0,15-0,19	0,15-0,25
Acero lubricado con aceite	0,11-0,17	0,10-0,16	0,10-0,15	0,11-0,17
Bronce	0,08-0,12	0,04-0,06	-	0,06-0,09

Los valores propios de la geometría del sistema de roscado en la clavija (paso, radios medios o ángulo en el flanco del filete) se determinan a partir de las relaciones establecidas para el roscado métrico utilizado (Tabla 3-13 y Figura 3-21). En el caso de las arandelas se fijó el empleo de arandela de ala ancha con el fin de amentar la superficie de contacto y se midió directamente como muestra la Figura 6-107.



Figura 6-107. Geometría de la arandela.

Se resumen en la Tabla 6-25 las variables aplicadas al modelo de cálculo inicial.

Tabla 6-25. Variables para cálculo del pretensado (Muestra M03).

Clavija	5.6	Madera	GL24 h
Varilla roscada	M10	Diámetro de agujero	d = 10 mm
Diámetro interior de rosca, Tabla 3-15	d _{int} = 7,9 mm	Ángulo de cono en empaquetadura	α _{emp} = 4º
Diámetro exterior de rosca	d = 10 mm	Módulo de elasticidad	E _{90,g,m} = 390 N/mm ²
Módulo de elasticidad (DB SE A, 2009)	E _a = 210.000 N/mm ²	Resistencia a compresión en la madera en dirección perpendicular a la fibra	f _{c,90,g,k} = 2,7 N/mm ²
Tensión de fluencia, Tabla 3-22	f _{y,k} = 300 N/mm ²	Coefficiente de plastificación de la madera	γ _{mad} = 1,04
Coefficiente de plastificación de acero	γ _a = 1,04		
Área neta de clavija	A _{Clav} = 48,89 mm ²		
Paso de tuerca, Tabla 3-14	P=1,5 mm		
Semiángulo de filete para rosca métrica	α _{Filete} = 30º		
Radio medio de tuerca	R _{Tuerca} = 15 mm		
Diámetro medio de filete $d_{med} = \frac{d + d_{int}}{2}$	d _{med} = 8,95 mm		
Diámetro exterior de arandela, Figura 6-107	D _{ext} = 29,8 mm		
Diámetro interior de arandela, Figura 6-107	D _{int} = 10,5 mm		
Área de arandela A _{Aran} = π·(R _{ext} ² -R _{int} ²) = π·(D _{ext} ² -D _{int} ²)/4	A _{Aran} = 618,93 mm ²		
Coefficiente de rozamiento acero-acero, Tabla 6-24	μ _{a-a} = μ _{Tuerca} = μ _{Filete} = 0,2		

A partir de las anteriores variables, se obtienen los resultados expuestos en la Tabla 6-26.

Tabla 6-26. Resultados para pretensado.

Rigidez de clavija	k _a = 32.085 N/mm
Rigidez de empaquetadura de madera	k _m = 3.640 N/mm
Carga límite por plastificación en corona de madera	f _{c,90,k} ·A _{Arandela} = 1.737,94 N
Carga límite por plastificación en clavija	f _{y,k} ·A _{clavija} = 15.254,52 N
Precarga máxima	P _{1,Max} = 1.527 N
Pretensado de la unión (P _{axil,Pret})	P _{axil,Pret} = 763 N
Momento por precarga de apriete	M _{torsor,Pi,Max} = 1,82 N·m
Momento por fricción en cabeza de tuerca	M _{torsor,Tuerca} = 1,60 N·m
Momento por fricción en filete de rosca	M _{torsor,Filete} = 3,21 N·m
Momento torsor de apriete	M _{torsor} = 7,64 N·m

En la Figura 6-104 se estableció el procedimiento iterativo para la determinación de la componente axil sobre la clavija para la fijación con tuerca y arandela, pero que solo se podía aplicar a partir de la iteración n > 1. El motivo era que, previamente, había que conocer la carga axil de pretensado (P_{axil,Pret}); cuyo valor se puede calcular ahora en la iteración n = 1 con las ecuaciones vistas en este apartado, según se expone en la Figura 6-108.

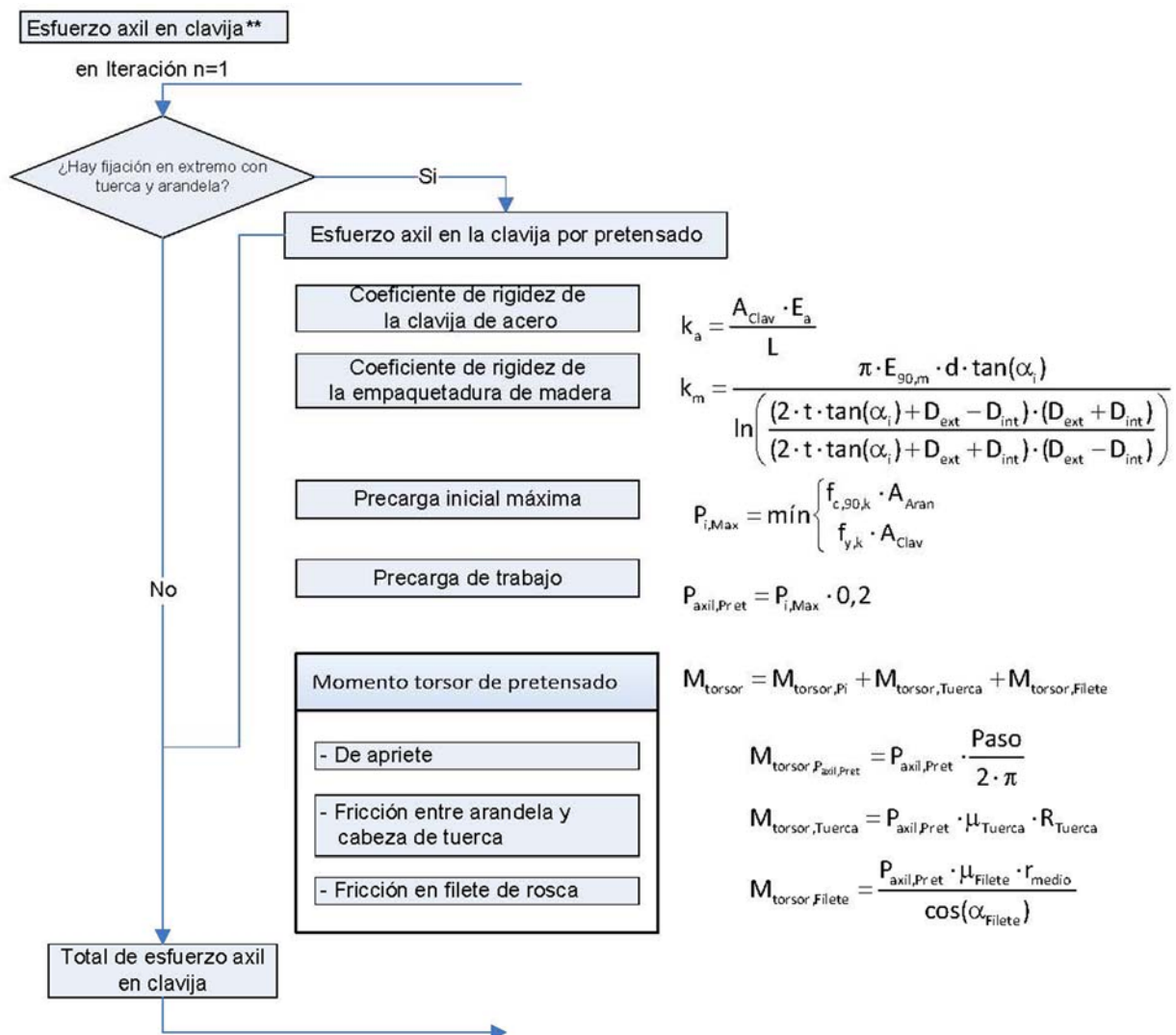


Figura 6-108. Fuerza axil con fijación en extremo de clavija y pretensado con tuerca y arandela.

6.5.2.2 Evolución de la fijación de clavija en las superficies de contacto entre madera y arandela

Es importante relacionar los resultados asociados a la evolución de la carga y la posición de la arandela a medida que evoluciona la plastificación de la madera en estas superficies. Dado que se puede establecer una relación entre el momento torsor aplicado con la llave dinamométrica y la fuerza axil que aparece en la clavija midiendo el ángulo de giro de la misma, se pueden extraer resultados sobre el comportamiento a rigidez de la empaquetadura simplificando el sistema de ensayo a una sola pieza de madera sin efectos de flexión. En definitiva, el par torsor aplicado responde al resultado teórico de aplastamiento de la madera; con el fin de ratificar los resultados numéricos, se puede plantear el ensayo de aplastamiento sencillo. Para ello se hace uso de una pieza de madera de espesor controlado (t_2). A ésta se aplica un momento torsor de apriete que se incrementa manualmente en un 1 N·m cada 30 s, midiendo la profundidad de la huella de la arandela y, por lo tanto, la variación de longitud en el extremo de la clavija (ΔL), a partir del giro con el que se relaciona (mediante el paso de rosca de la clavija, que es conocido ya que se trata de varilla roscada de tipo M10). Este ensayo resulta sencillo en su ejecución (como muestra la Figura 6-109), no requiere de equipos muy costosos, se puede realizar en paralelo con los procesos de construcción y da información sobre la rigidez con la cual evoluciona la empaquetadura.



Figura 6-109. Ensayo de resistencia al par torsor.

Con este procedimiento se comprobó la evolución de la rigidez en el sistema de empaquetadura (Figura 6-110). Con pares de apriete (M_{torsor}) de hasta 7,48 N·m no se producían plastificaciones significativas en la madera. En la Figura 6-110 A, se exponen los resultados de los distintos ensayos del momento de apriete; observándose ondulaciones que pueden estar relacionadas con la aplicación del momento torsor de forma gradual (cada 30 s). Las plastificaciones apreciables se han detectado a partir de $M_{\text{torsor}} = 9 \text{ N}\cdot\text{m}$, donde las curvas de momento torsor (M_{torsor}) frente a la variación de longitud en el extremo de la clavija (que se podría considerar como el deslizamiento de empaquetadura (ΔL)) presentan pendientes menos inclinadas (Figura 6-110 B). Las pendientes positivas en ambos tramos, indican que, ante efectos de aplastamiento, el momento torsor de apriete se puede incrementar más allá del relacionado con la precarga límite ($P_{i,\text{max}}$). El cambio de pendiente significativo, a partir de un deslizamiento de empaquetadura $\Delta L = 0,75 \text{ mm}$ (Figura 6-110 B), se pueden relacionar con las constantes de rigidez $k_{m,90,1}$ y $k_{m,90,2}$, lo que permite determinar de una forma experimental la evolución de la empaquetadura.

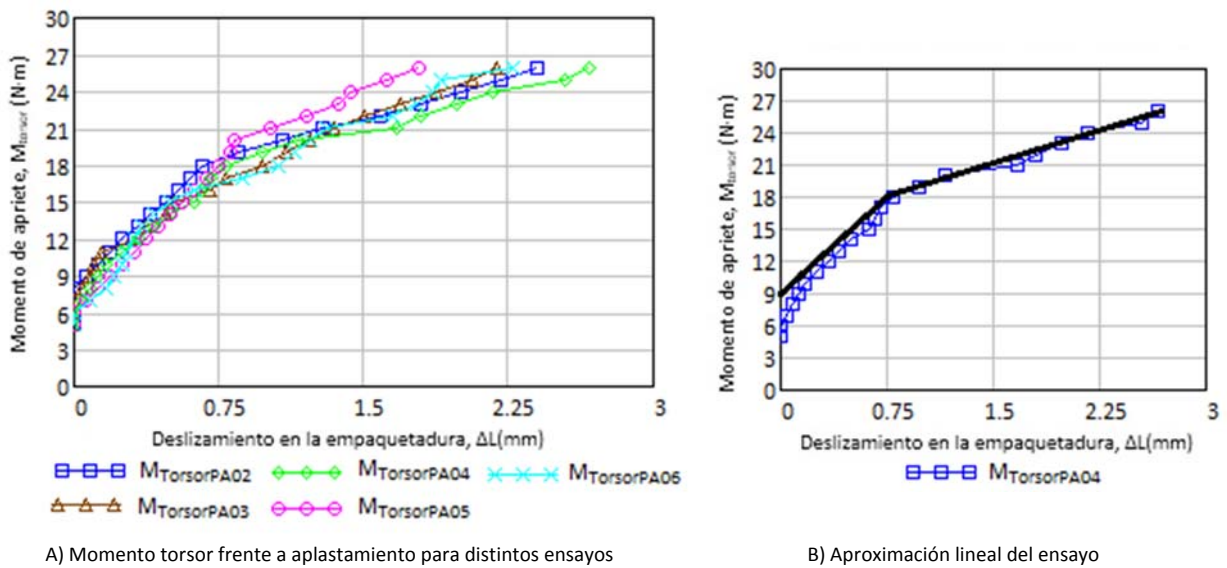


Figura 6-110. Evolución de la plastificación en la madera por el momento torsor en la empaquetadura con la clavija.

Desarrollando el problema inverso sobre la Ecuación 6-49, con los datos del ensayo descrito en este apartado, se puede determinar la evolución de las cargas de apriete (P_i). Para ello se debe conocer del momento torsor (M_{torsor}) que se aplica con la llave dinamométrica. De esta manera, a partir de Ecuación 6-53 y de la Ecuación 6-54 se puede obtener la carga de apriete (P_i), mediante la Ecuación 6-55.

$$M_{\text{torsor}} = M_{\text{torsor},P_i} + M_{\text{torsor},\text{Tuerca}} + M_{\text{torsor},\text{Filete}} = P_i \cdot \frac{\text{Paso}}{2 \cdot \pi} + P_i \cdot \mu_{\text{Tuerca}} \cdot R_{\text{Tuerca}} + \frac{P_i \cdot \mu_{\text{Filete}} \cdot r_{\text{medio}}}{\cos(\alpha_{\text{Filete}})} = \frac{P_i}{d} \cdot \left(\frac{d \cdot \text{Paso}}{2 \cdot \pi} + d \cdot \mu_{\text{Tuerca}} \cdot R_{\text{Tuerca}} + \frac{d \cdot \mu_{\text{Filete}} \cdot r_{\text{medio}}}{\cos(\alpha_{\text{Filete}})} \right)$$

Ecuación 6-53

$$M_{\text{torsor}} = \frac{P_i}{d} \cdot \left(\frac{d \cdot \text{Paso}}{2 \cdot \pi} + d \cdot \mu_{\text{Tuerca}} \cdot R_{\text{Tuerca}} + \frac{d \cdot \mu_{\text{Filete}} \cdot r_{\text{medio}}}{\cos(\alpha_{\text{Filete}})} \right) = \frac{P_i}{d} \cdot (u_{\text{torsor,Pi}} + u_{\text{torsor,Tuerca}} + u_{\text{torsor,Filete}})$$

Ecuación 6-54

La Ecuación 6-55 establece la relación de cargas de apriete (P_i) a partir del momento torsor como alternativa a la Ecuación 6-48.

$$P_i = \frac{M_{\text{torsor}} \cdot d}{(u_{\text{torsor,Pi}} + u_{\text{torsor,Tuerca}} + u_{\text{torsor,Filete}})}$$

Ecuación 6-55

Al relacionar la carga de apriete con el deslizamiento de la empaquetadura, según la Ecuación 6-55, se establece una relación de proporcionalidad lineal para cada sistema roscado. En la Figura 6-111, correspondiente al ensayo de pretensado, se puede ver cómo evoluciona la carga de apriete con el deslizamiento de la empaquetadura y también se pueden establecer los valores de $k_{m,90,1} = 3.728,81 \text{ N/mm}^2$ y $k_{m,90,2} = 916,67 \text{ N/mm}^2$. Estos valores de rigidez se pueden comparar con los calculados analíticamente (según la Tabla 6-26), en los que se determinó una rigidez en el sistema de empaquetadura para la madera de valor $k_m = 3.640 \text{ N/mm}$, a partir de la Ecuación 6-47 con un ángulo de cono pequeño ($\alpha_i = 4^\circ$) propio de materiales blandos. Tanto el ángulo de cono, como el comportamiento en la zona de plastificación avanzada de la madera se podrían someter a estudios más avanzados, pero con los datos de estos ensayos ya se puede establecer una relación de proporcionalidad del tipo $k_{m,90,2} = k_m / 10$. Al ser necesaria la rigidez para determinar la evolución de la unión, se hace uso de la rigidez en el estado avanzado ($k_{m,90,2}$), cuyo valor se identifica con una plastificación completa en la madera y sitúa la carga de apriete del lado de la seguridad. La rigidez en estado avanzado se relaciona con la pendiente de la empaquetadura ($K_{\text{ser,Empa}}$), es decir, un coeficiente que debe ser particular para cada empaquetadura y que no tiene por qué coincidir con el descrito para toda la unión clavija (K_{ser}), que combina distintos factores.

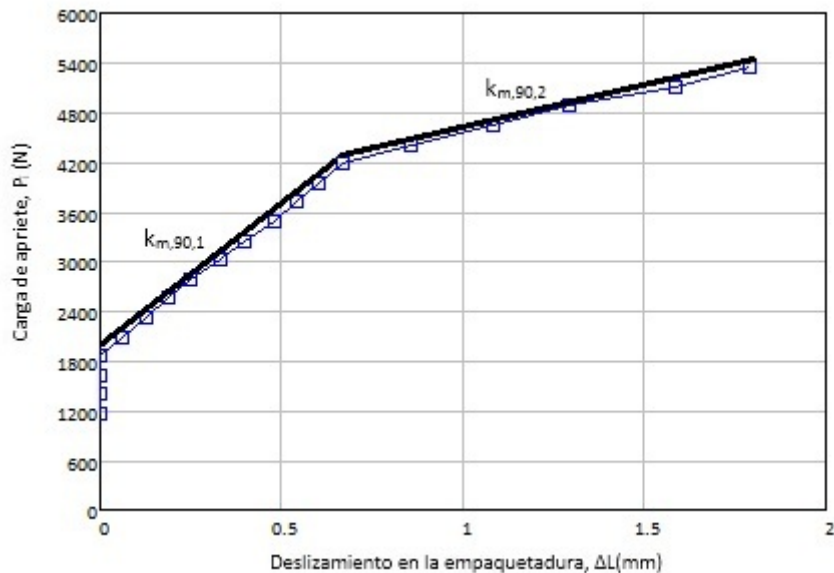


Figura 6-111. Evolución de la plastificación en la madera debida a la carga de apriete en la empaquetadura con la clavija.

Para poder sumar la contribución de los distintos esfuerzos, es necesario relacionar la carga axial por plastificación debido al contacto de la madera con la arandela con el deslizamiento (u) de la unión. Dado que la rigidez de la clavija a tracción es grande en comparación con la que presenta la madera a compresión (como se puede apreciar en la Tabla 6-26), el alargamiento de la clavija por tracción (ΔL_s) es mucho menor que el debido a la compresión de la

madera (ΔL_m). Esto se puede apreciar al tener en cuenta los órdenes de magnitud del módulo de elasticidad del acero ($E_a=210.000 \text{ N/mm}^2$) en comparación con el de la madera GL24h ($E_{90,g,m}=390 \text{ N/mm}^2$) y unido a la plastificación previa en la madera frente al acero que lleva a reducir aún más este último. Por lo tanto, la variación de longitud del conjunto se puede relacionar con el desplazamiento de la arandela al incrustarse en el plano de contacto con la madera y relacionarse con la variación de longitud provocada por las modificaciones geométricas de la clavija deformada, es decir, $\Delta L_m = \Delta L$ (Figura 6-112).

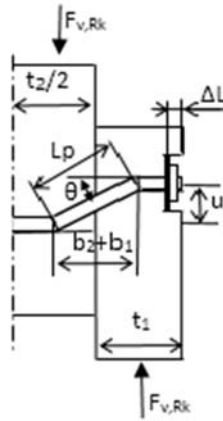


Figura 6-112. Desplazamiento de las fijaciones en extremos de clavija.

Trabajos previos (Awaludin et al., 2008) proponen la relación entre la variación de longitud en el extremo de la clavija (ΔL) y el deslizamiento del nudo según la Ecuación 6-56, que, tomando el desarrollo expuesto (Ecuación 6-57), puede llevar a una relación con el ángulo de giro que se da en la clavija para un solo plano en cortadura simple (Ecuación 6-58).

$$\Delta L_{Awa} = \left(\sqrt{u^2 + \frac{u^2}{\tan^2 \theta}} - \frac{u \cdot \cos^2 \theta}{\text{sen} \theta} \right) \cdot \cos \theta$$

Ecuación 6-56

$$\Delta L_{Awa} = u \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{1}{\text{tg}^2 \theta}} - \frac{\cos^2 \theta}{\text{sen} \theta} \right) \cdot \cos \theta = u \cdot \left(\sqrt{\frac{\text{sen}^2 \theta + \cos^2 \theta}{\text{sen}^2 \theta}} - \frac{\cos^2 \theta}{\text{sen} \theta} \right) \cdot \cos \theta = u \cdot \left(\frac{1}{\text{sen} \theta} - \frac{\cos^2 \theta}{\text{sen} \theta} \right) \cdot \cos \theta$$

Ecuación 6-57

$$\Delta L_{Awa} = u \cdot \text{sen} \theta \cdot \cos \theta$$

Ecuación 6-58

Realizando un análisis con la simplificación geométrica reflejada en la Figura 6-112, se puede definir la variación de longitud en el extremo de la clavija (ΔL) a partir de la distancia entre las dos rótulas plásticas de la clavija (L_p) y el ancho total de aplastamiento ($b_1 + b_2$) según la Ecuación 6-59.

$$\Delta L = L_p - (b_1 + b_2) = \frac{u}{\text{sen} \theta} - \frac{u}{\text{tg} \theta} = u \cdot \frac{1 - \cos \theta}{\text{sen} \theta}$$

Ecuación 6-59

En la Figura 6-113 se representa la variación de longitud en el extremo de la clavija (ΔL) cuando el deslizamiento en la unión se fija ($u = 15 \text{ mm}$). Para el desarrollo de la Ecuación 6-58 (Awaludin et al., 2008) se puede apreciar que a medida que aumenta el ángulo de giro por encima de los 45° la variación de longitud (ΔL) se reduce, lo que resulta contraproducente para ser aplicada en el modelo base. Además se debe remarcar que esta expresión fue planteada para uniones de madera con placa metálica, por lo que el movimiento de la fijación de tuerca-arandela frente a la placa metálica (en sustitución de la pieza de madera de espesor t_1) está más limitado. Mientras, para la Ecuación 6-59 aumenta a medida que aumenta el ángulo de giro. Resulta lógico pensar que la configuración de este triángulo,

donde u es constante e igual a 15 mm, supone que con ángulos de giro en la clavija $\theta = 90^\circ$ el valor del ancho de aplastamiento (b_1+b_2) debe ser nulo y por lo tanto $\Delta L = u$. En la práctica, esta disposición con $\theta = 90^\circ$ no se llega a dar en la unión, porque a medida que aumenta la carga y el ángulo de giro en la clavija (θ) también aumenta el ancho de aplastamiento de las dos piezas (b_1+b_2), y tanto el valor del deslizamiento en la unión (u) como del acortamiento en el extremo de la clavija (ΔL) tienden a infinito, rompiendo la unión antes de que esto ocurra. En el modelo se asume la variación de longitud en el extremo de la clavija (ΔL) desarrollada en la Ecuación 6-59 considerando que la propuesta hecha en la Ecuación 6-58 (Awaludin et al., 2008) debe ser revisada.

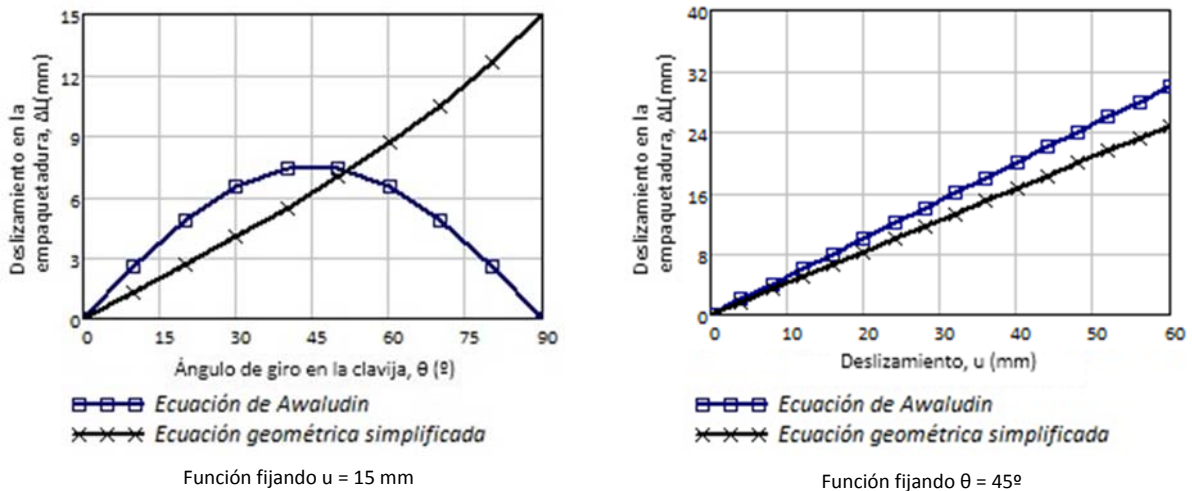


Figura 6-113. Relación entre deslizamiento de la unión y de la empaquetadura.

A medida que la unión entra en carga, se considera que la contribución de la fijación con tuerca-arandela es variable, distinguiendo el comportamiento en dos tramos, según la Ecuación 6-60. El primero, si no se ha sobrepasado el valor de la carga de apriete que provoca la plastificación ($P_{i,max}$), haciendo uso de la rigidez inicial $k_{m,90,1}$. El segundo si se ha sobrepasado esta carga ($P_{i,max}$), haciendo uso de la Ecuación 6-61, combinando la ecuación con la rigidez propia de plastificaciones permanentes.

$$F_{axil,Aran} = F_{axil,Pre} + k_{m,90,1} \cdot \Delta L$$

Ecuación 6-60

$$F_{axil,Aran} = P_{i,max} + k_{m,90,2} \cdot (\Delta L - \Delta L_m)$$

Ecuación 6-61

En la Figura 6-114 se representa la carga en la unión obtenida a partir de los ensayos realizados con las probetas P014 y P027 (muestra [M03]), donde se fijaron los extremos de la clavija con tuerca y arandela. Al compararse con la línea negra (de trazo con aspa) que muestra los valores de la carga teórica ($2 \cdot F_{v,Rk} = f(u)$) obtenidos con el flujo de cálculo propuesto, se aprecia una tendencia parecida entre los resultados experimentales y teóricos, estando estos últimos del lado de la seguridad. Estos resultados ratifican la necesidad de introducir en las ecuaciones analíticas el efecto sogas como una función del deslizamiento (u) y cómo mejora la capacidad de carga de la unión a medida que aumenta el deslizamiento frente a la clavija que no presentan efecto sogas. Situaciones análogas se dan en otras muestras donde también se fijaron los extremos con tuerca y arandela ([M06], [M09], [M37] y [M39]), y donde se puede ver que, una vez desarrolladas las rótulas plásticas, los valores de carga evolucionan con pendientes similares y trayectorias prácticamente paralelas a medida que aumenta el deslizamiento.

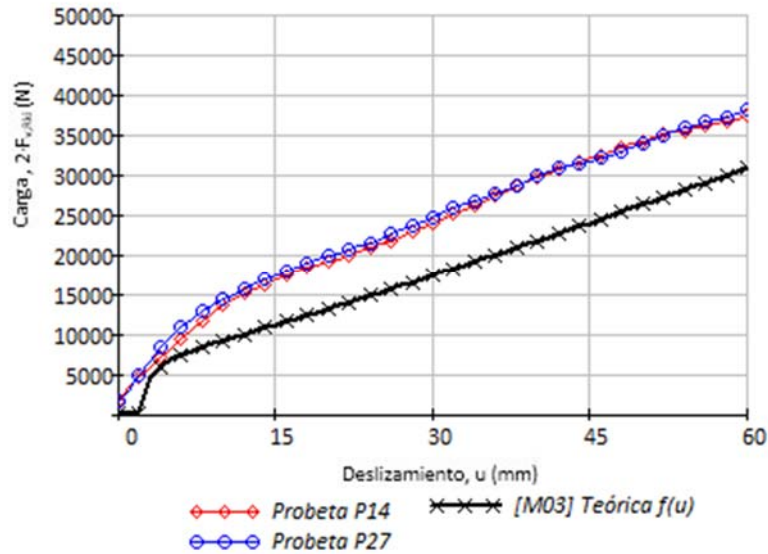


Figura 6-114. Comparación de resultados analíticos y experimentales para la muestra [M03] con fijación de tuerca y arandela.

6.5.2.3 Factor sogá debido a fuerzas en la superficie de la clavija

6.5.2.3.1 Contribución de adhesivo en clavija

Los ensayos con probetas donde se inyectó epoxi sobre la clavija (correspondientes a las muestras [M01], [M04], [M07], [M10], [M12], [M14], [M16], [M18], [M22], [M23], [M24], [M35], [M40], [M45] y [M50]) presentan una evolución más rígida en las primeras fases de aplicación de carga. En parte de ellas se pueden distinguir dos tramos donde el adhesivo actúa con distinta rigidez (Figura 6-115). El primer tramo tiene una rigidez muy alta por la resistencia que presentan las tensiones de tracción en el adhesivo. Esta situación se localiza especialmente en las esquinas señaladas (zona 1), según se indica en la sección transversal de la probeta P036 (Figura 6-115). A continuación se identifica un escalón más o menos pronunciado, que actúa como transición a un segundo tramo donde predomina el efecto sogá del adhesivo (zona 2). El escalón de ajuste permite el deslizamiento necesario para que se propague la tensión cortante que da lugar al efecto sogá. Una vez que se propagan en el adhesivo las nuevas tensiones cortantes aumenta ligeramente la rigidez, a la vez que el ancho de aplastamiento (b_1) va restando longitud de adherencia (l_g), hasta llegar a un valor de capacidad de carga máxima en la unión. Una vez que se llega a la situación de fallo generalizado del adhesivo, se produce una caída en la curva de la capacidad de carga con una pendiente negativa para acercarse al caso de clavija sin adhesivo.

El segundo tramo de rigidez, donde predomina la resistencia por efecto sogá de la zona 2, aparece en todos los ensayos. Por el contrario, el tramo inicial con muy alta rigidez, asociado a las tensiones de tracción en la zona 1, es casi inexistente para algunos ensayos (por ejemplo P008, P016 o P043). Ello es debido a que en las superficies donde el adhesivo está sometido a tracción (zona 1) se da una localización de tensiones inicial muy alta en las esquinas señaladas, y rápidamente se inicia el desprendimiento para pasar al comportamiento por efecto sogá.

Además, la alta rigidez del primer tramo está relacionada con un pegado efectivo entre la madera y la clavija que se da especialmente en las probetas con una distribución del adhesivo muy buena; pero hay otras donde se identifican imperfecciones en el reparto del adhesivo por la baja rigidez de la unión en este mismo tramo. También se han presentado comportamientos muy rígidos si, por un proceso defectuoso de ejecución de la probeta de ensayo, el adhesivo se extiende entre las intercaras de madera (Figura 6-49), lo que llevó a modificar en su día los procesos de pegado para asegurar que no se volviera a reproducir este tipo de defecto. Tras la pérdida de adherencia en tracción del adhesivo se produce el escalón de transición, a partir del cual se da un segundo tramo de rigidez un poco menos

pronunciado que el anterior. La superposición de efectos no se da en estas etapas tempranas (con deslizamientos relativamente pequeños por tracciones del adhesivo) sin posibilidad de plastificación en la madera y rótulas en la clavija. Es decir, el comportamiento en tracción del adhesivo se puede considerar como aplicado en serie y de forma previa al desarrollo de trabajo en la clavija, con sus rótulas plásticas y sus mayores capacidades de carga. En consecuencia, no se consideran los efectos de tracción en el adhesivo de cara a integrarlo con la resistencia de la clavija frente al deslizamiento.

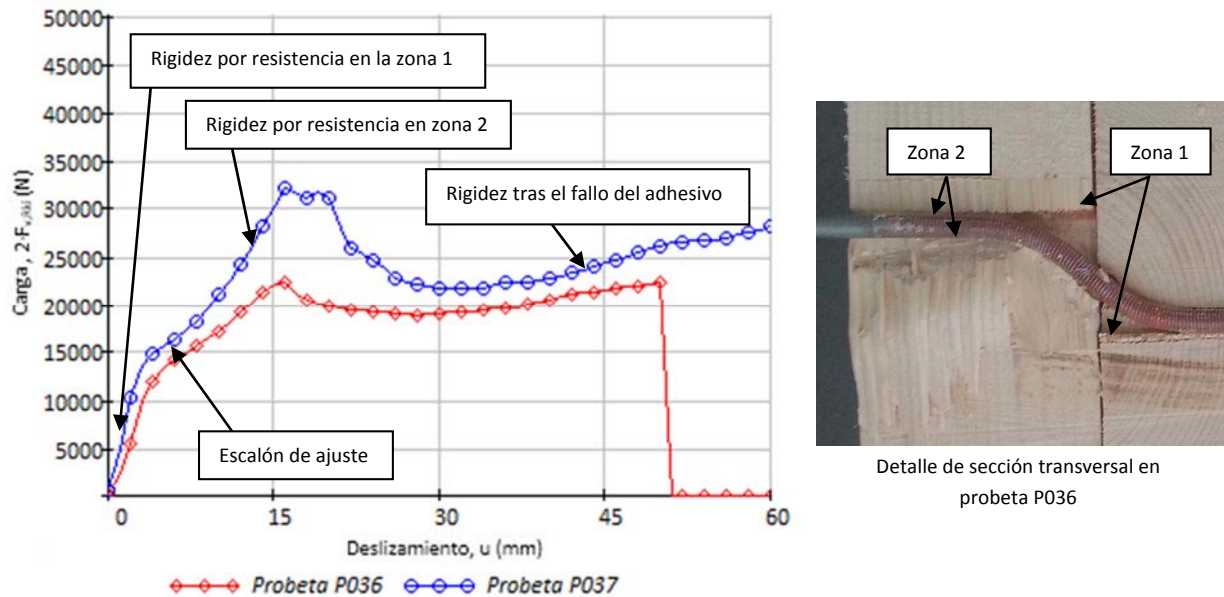


Figura 6-115. Capacidad de carga frente a deslizamiento en probetas con adhesivo [M24].

Las fuerzas por efecto sogas derivadas del adhesivo están relacionadas con la longitud encolada (l_g), según se vio en el Apartado 3.6.5.1.1 referente a capacidad de carga en barras sometidas a esfuerzos axiales. El valor del axil por efecto sogas debe limitarse a la capacidad de carga axial máxima ($F_{axil,Adhe,Max,Soga}$), a partir de la cual se considera que el adhesivo ha fallado ($F'_{axil,Adhe,Fallo}$). Hasta ese valor se debe establecer una relación entre la carga recogida por el adhesivo y el deslizamiento. Esto supone hacer uso de un condicional a modo de comparador, tal y como se describe en el flujograma de la Figura 6-104.

Para el cálculo de la capacidad de carga máxima ($F_{axil,Adhe,Max,Soga}$) se trabaja con la definida en la Ecuación 3-5, existiendo investigaciones que han señalado que no debe ser función de la densidad de la madera encolada (Estévez et al., 2007). Como particularidades a la ecuación anterior, se plantea la Ecuación 6-62 debido a que:

- La longitud encolada (l_g) debe ser modificada a medida que la unión avanza en deslizamiento (u) y aumenta el ancho de aplastamiento (b_1), con lo cual es necesario calcularla para cada posición de deslizamiento, de forma que $l_g = t_1 - b_1$.
- Las fibras de madera están en posición perpendicular a la clavija, con lo cual la resistencia a la extracción ($f_{v,\alpha,k}$) supone disposiciones con ángulos $\alpha = 90^\circ$.

$$F_{axil,Adhe,Max,Soga} = \pi \cdot d_{eq} \cdot l_g \cdot f_{v,\alpha,k} = \pi \cdot d_{eq} \cdot (t_1 - b_1) \cdot f_{v,90,k}$$

Ecuación 6-62

La Ecuación 6-63 y la Ecuación 6-64 definen la contribución del adhesivo a medida que evoluciona el deslizamiento en el punto B (véase Figura 6-88). La transición de la primera a la segunda ecuación debe hacerse en el punto de carga de extracción, según la Ecuación 6-62. Para definir el valor máximo de carga que aguanta el adhesivo mientras se propaga el deslizamiento de la unión es preciso conocer el valor de la pendiente y, por lo tanto, la rigidez en el comportamiento de extracción de clavija madera ($k_{ser,Adhe}$). Esta pendiente tiene que estar relacionada con la

variación de longitud en la clavija (ΔL), según la Ecuación 6-58. Como en el Apartado anterior, correspondiente a la empaquetadura de tuerca-arandela con madera, se considera que la deformación de la clavija por alargamiento es despreciable por la alta rigidez del acero.

En definitiva, la Ecuación 6-63 define la capacidad de carga de la unión con adhesivo ($F'_{B_axil,Adhe}$) antes de llegar a la capacidad de carga máxima ($F_{axil,Adhe,Max,Soga}$), y una vez sobrepasada ésta, la Ecuación 6-64 refleja la capacidad de carga de la unión tras el fallo del epoxi por cortante ($F''_{B_axil,Adhe,Fallo}$).

$$F'_{B_axil,Adhe,Soga} = k_{ser,Adhe} \cdot \Delta L$$

Ecuación 6-63

En la Ecuación 6-64 se considera la fuerza axil entre clavija y agujero nula, pero puede ser modificada (a efectos de contribución en el efecto sogá) cuando las irregularidades del adhesivo al desplazarse a lo largo del agujero alteren el coeficiente de fricción o existan aplastamientos por incrustación, en un comportamiento semejante al de fijación en extremos por tuerca-arandela o la interacción de resaltos de expansión con el agujero. Para potenciar el efecto sogá por adhesivo también se puede plantear hacer huecos en la madera ensanchando zonas estratégicas a lo largo del agujero de la madera (por mecanizado o por composición de piezas de madera laminada superpuestas), lo que facilita el conseguir una unión oculta a efectos de resistencia al fuego, como plantean determinadas investigaciones (Otero, 2009).

$$F''_{B_axil,Adhe,Fallo} = 0$$

Ecuación 6-64

La comparación de la Ecuación 6-62 con la evolución de los ensayos tras las crestas de carga máxima pone de manifiesto que la ecuación analítica está del lado de la seguridad. Por otro lado, no se han encontrado antecedentes que definan de forma analítica la rigidez en el comportamiento de extracción de clavija madera ($k_{ser,Adhe}$), motivo por el cual se ha optado por fijar tanto $F_{axil,Adhe,Max,Soga}$ como $k_{ser,Adhe}$ a partir de los ensayos en previsión del desarrollo de estudios más específicos al respecto. Una vez aplicado el algoritmo tal y como se refleja en la Figura 6-104 dentro del bloque "adhesivo entre clavija y madera", se obtienen los resultados reflejados con línea negra (de trazo con aspa) de la Figura 6-116.

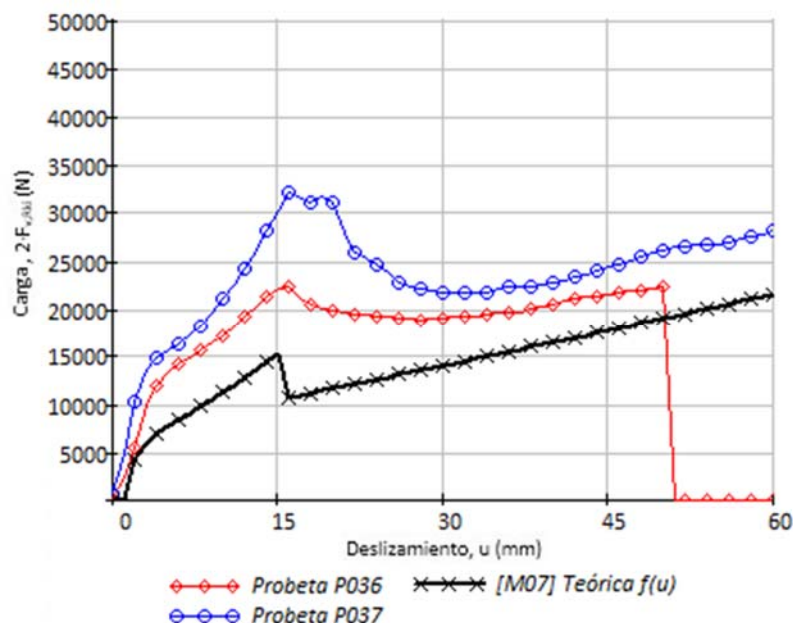


Figura 6-116. Comparación de resultados analíticos y experimentales para la muestra [M07] con adhesivo.

6.5.2.3.2 Contribución por rozamiento entre clavija y agujero

Inicialmente, los trabajos para la determinación de la resistencia en la unión con clavija despreciaron la fuerza de rozamiento (como se vio en el Apartado 2.7.3) y así se ha adoptado en la norma (Ecuación 2-55), pero no se debe olvidar que la fuerza de rozamiento es un factor variable con cierta influencia en función de las superficies en contacto y la fuerza normal, según se vio en el Apartado 3.2.1.6. Su contribución entre clavija y agujero es de interés para valorar la mejora en la unión con este factor y permite valorar, por ejemplo, el introducir un moleteado en las clavijas de superficie lisa. La fuerza de rozamiento ($F_{axil,Roz,Aguj}$) se puede evaluar a partir del coeficiente de rozamiento (μ_{m-a}) entre madera y clavija (de acero para el caso estudiado) y la fuerza normal (N) definida a partir de la hipótesis de laja plana. Por su parte, la fuerza normal es función de la distribución tensional (descrita en la Figura 6-87); pudiéndose identificar la componente axil con que la fuerza de rozamiento contribuye al efecto sogá según la Ecuación 6-65, donde se considera que los tramos de la clavija donde la distribución de tensiones es variable (a_1) podría llegar hasta los valores máximos de plastificación de la madera. Por este motivo se introduce la función $F(f'_{h_1}, a_1)$, junto con la contribución a la normal dada en el ancho ya plastificado ($f_{h_1} \cdot b_1$). No obstante, lo ideal es disponer de la función que describe esta tensión para poder integrarla; una aproximación puede tratar estos segmentos como una distribución triangular.

$$F_{B_{axil,Roz,Aguj}} = \mu_{m-a} \cdot N = \mu_{m-a} \cdot d \cdot (f_{h_1} \cdot b_1 + F(f'_{h_1}, a_1)) = \mu_{m-a} \cdot f_{h_1} \cdot d \cdot \left(b_1 + \frac{a_1 + a_1}{2} \right)$$

Ecuación 6-65

El coeficiente de rozamiento (μ_{m-a}) se tratará en su valor estático, justificándose en la aplicación lenta y gradual de la carga. Existen estudios que han analizado el coeficiente de fricción (Gorst & Williamson, 2003) de los que se deduce (Tabla 6-27) que puede tomarse un valor de 0,3 a 0,4. En el modelo de cálculo, se fija el coeficiente de fricción $\mu_{m-a} = 0,4$. En el caso de la unión con adhesivo epoxi se considera una fricción $\mu_{m-adh} = 0,5$, y que el desprendimiento se da precisamente entre madera y adhesivo (no entre acero y adhesivo), aspecto que se puede comprobar al hacer el corte transversal de las probetas y por la presencia de filetes a lo largo de la clavija montada con varilla roscada, porque el epoxi se comprime contra los flancos de la rosca, a los que mejora su capacidad de carga en comparación con los cortantes que se dan para el contacto con la madera, lo que ya han reflejado otros trabajos (Proyecto LICONS, 2003) como pudo verse en la Figura 3-4. Para el caso de clavijas moleteadas (M 57 y M58) también se toma $\mu_{m-a} = 0,5$, aunque hay autores que indican la necesidad de verificar experimentalmente este factor con más profundidad (Dorn et al., M., 2013) debido a la amplia cantidad de aspectos que pueden presentar las superficies en lo referente a su tribología.

Superficie 2		Superficie 1											
		Acero				Aluminio	Madera				Hormigón		
		Inoxidable	Oxidado	Galvanizado	Pintado		Blanda		Dura			Vigas	Pulido
						Paralela	Perp.	Paralela	Perp.				
Acero	Inoxidable	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.1	
	Oxidado	0.4	0.4	0.3	0.6	0.3	--	--	0.6	--	0.4	--	
	Galvanizado	0.3	0.3	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	--	
	Pintado	0.3	0.6	0.4	0.7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.0	
Aluminio		0.2	0.3	0.2	0.4	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	--	
Madera	Blanda	Paralela	0.3	--	0.4	0.4	0.4	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.8
		Perpendicular	0.4	--	0.5	0.4	0.4	0.5	--	0.4	--	0.3	0.7
	Dura	Paralela	0.4	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5
		Perpendicular	0.5	--	0.5	0.5	0.3	0.4	--	0.5	--	0.4	0.7
		Vigas	0.5	0.4	0.4	0.5	0.2	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	--
Hormigón	Pulido	0.1	--	--	0.0	--	0.8	0.7	0.5	0.7	--	0.4	
	Fratasado	0.5	0.7	0.2	0.6	0.4	1.1	0.7	0.7	0.6	0.6	0.4	

Tabla 6-27. Fricción de madera con distintos materiales [(Gorst & Williamson, 2003) Tabla 11].

La función que relaciona la fuerza normal con las tensiones [$F(f_{h1}, a_1)$] puede ser muy compleja, y la simplificación con distribuciones triangulares, imprecisa. Esto es así especialmente en clavijas menos rígidas porque los extremos exteriores no tienen por qué llegar a la plastificación máxima (f_{h1}), pudiendo tener tensiones muy bajas para el aplastamiento en la madera, además de presentar holguras o contactos irregulares al no evolucionar la plastificación. Por este motivo, y siempre pensando en trabajar desde el lado de la seguridad, la Ecuación 6-65 se simplifica despreciando este término correspondiente a los anchos en los tramos que no llegan a plastificar, con lo que resulta la Ecuación 6-66.

$$F_{B_axil, Roz, Aguj} = \mu_{m-a} \cdot f_{h1} \cdot d_{ext} \cdot b_1$$

Ecuación 6-66

6.5.2.3.3 Contribución por incrustaciones en clavija

El planteamiento de clavijas con barras roscadas a lo largo de toda la longitud de la clavija supone que las fibras de la madera se insertan en los flancos de filete a medida que la unión entra en deslizamiento. Aquellas que están más alejadas de las intercaras tienden a ser arrastradas por el desplazamiento de la clavija debido al ángulo de giro, mientras que las que están cerca de las intercaras se ven expuestas a aplastamiento provocado por unas fuerzas que actúan inicialmente en un ángulo de 90° con respecto a la clavija, ángulo que va variando según aumenta el deslizamiento (Figura 6-117). En el modelo objeto de estudio se ha fijado un sistema de rosca métrica con ángulo de 60° respecto al eje, pero puede ser muy variable (Shighey et al., 2008), llegando a los 75,5° en el sistema roscado ACME o incluso a los 90° el roscado cuadrado. En consecuencia, una vez que el deslizamiento sobrepasa valores mayores al paso de rosca, las fibras se enclavan y envuelven la rosca generando también efecto soga. En la probeta P092 (perteneciente a la muestra M41) se retiró la clavija tras realizar el corte transversal de la probeta y se comprobó que la huella de la rosca en la madera se presentaba en un arco de 180° considerado el semicírculo de la sección de clavija que avanza provocando el aplastamiento (según esquema de la derecha en la Figura 6-117), lo cual es previsible porque la clavija tiene que abrirse paso entre las fibras de madera a medida que avanza la deformación. Se introduce por ello un coeficiente de incrustación (k_{incr}) que refleja la parte del área transversal expuesta a incrustación; para el caso de roscado en todo el contorno, se toma $k_{incr} = 0,5$. El coeficiente de incrustación también es aplicable sobre otros posibles sistemas, como algunos de los sistemas de expansión descritos en el Apartado 3.8,

especialmente cuando en estos hay mecanismos como la apertura de pestañas o los resaltes que se clavan en la madera.



Figura 6-117. Evolución de la incrustación de fibras en las irregularidades de la clavija.

Como se desprende de la Figura 6-117, el efecto de incrustación está condicionado a que exista un deslizamiento de la unión (u) suficiente como para que las fibras se enclaven, y es considerado nulo cuando u es menor que el paso (p) más la holgura (u_{hol}). Podría dar lugar al estudio de una ecuación particular pero, considerando que esta condición es superada en las primeras etapas de plastificación, resulta más importante centrar el estudio en la etapa donde las fibras ya se han ajustado a la rosca y donde se puede introducir en la siguiente fórmula para calcular el axil que provoca (Ecuación 6-68).

$$F'_{axil,Incrus} = k_{Incr} \cdot [K_{ser,e,m-a,\alpha} \cdot \Delta L_{0,Incr} + K_{ser,p,m-a,\alpha} \cdot (\Delta L - \Delta L_{0,Incr})]$$

Ecuación 6-67

$$F_{axil,Incrus} = k_{Incr} \cdot [A_{Incrus} \cdot f_{Incr} + K_{ser,p,m-a,\alpha} \cdot (\Delta L - \Delta L_{0,Incr})]$$

Ecuación 6-68

Siendo:

- $F_{axil,Incrus}$ componente axil sobre la clavija en el punto B por incrustación de resaltes de la clavija en la madera, en N.
- k_{Incr} coeficiente de incrustación.
- A_{Incr} área transversal expuesta a incrustación, en mm^2 .
- f_{Incr} tensión de incrustación en la madera, en N/mm^2 .
- $K_{ser,e,m-a,\alpha}$ módulo de deslizamiento en los planos de incrustación en el comportamiento elastico, en N/mm .
- $K_{ser,p,m-a,\alpha}$ módulo de deslizamiento en los planos de incrustación en el comportamiento plástico, en N/mm .
- ΔL variación de longitud de la clavija para el deslizamiento dado de la unión, en mm.
- $\Delta L_{0,Incr}$ variación de longitud inicial del proceso de plastificación de las fibras incrustadas, en mm.

Siguiendo la estrategia de apartados anteriores, se propone simplificar la Ecuación 6-68 para tratar solo sus aspectos más relevantes. Tanto la variación de longitud de la clavija al desplazarse a lo largo del agujero que es función del deslizamiento de unión (u) y la posición a lo largo del eje de la clavija, como el proceso de incrustación de las fibras en las posibles irregularidades de la clavija es compleja. En la Figura 6-118 se representa el caso particular de la unión con las fibras de la madera orientadas en la dirección de la carga ($\alpha = 0^\circ$) cuando la clavija presenta una geometría roscada y se puede apreciar como las fibras sufren deformaciones distintas:

- En los primeros estados de carga la superficie de contacto se da solo en la cresta de la rosca y es más reducida que para el caso de la clavija lisa, por lo que la fase de asentamiento es mayor (Figura 6-118 A)
- Cuando la clavija no tiene desplazamientos en su eje ni ángulos de giro por plastificación (θ) la madera desliza por los flancos y sus fibras presentan zonas de flexión y de compresión condicionados por el ángulo de flanco (Figura 6-118 B).

- Para deslizamientos más elevados, en la Figura 6-118 B se aprecia que uno de los costados del filete se ve sometido a mayor aplastamiento mientras que el otro costado incluso puede perder del contacto según la relación entre el ángulo de giro por plastificación (θ) y el deslizamiento (u).
- Si el desplazamiento de la clavija en su eje continúa pueden producirse situaciones aún más complejas como un efecto sierra.

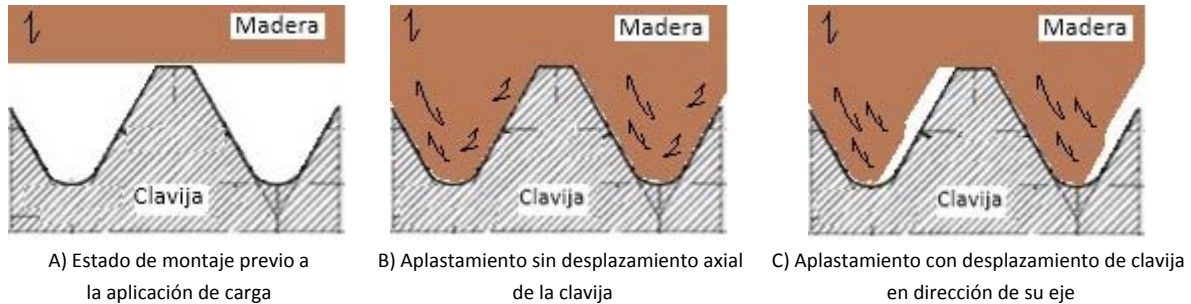


Figura 6-118. Fases de la incrustación de fibras de madera frente al roscado continuo de la clavija.

En definitiva, el coeficiente de rigidez en los planos de incrustación tiene particularidades, porque se modifica en función de la posición de las fibras por los esfuerzos variables que se den en un proceso de aplastamiento que también varía la geometría del material en el que se incrusta.

Retomando la Ecuación 6-68, y particularizando el estudio de incrustación del sistema roscado en un eje perpendicular a la clavija, se toma para el primer sumando:

- El área transversal expuesta a incrustación (A_{inc}) como semejante al de una corona que limita por los diámetros interior y exterior de rosca (descritos en la Tabla 6-25), dando lugar a la Ecuación 6-69.

$$A_{inc} = n_{Esp} \cdot \pi \cdot \frac{(d^2 - d_{int}^2)}{2}$$

Ecuación 6-69

- Las tensiones de incrustación (f_{inc}), que se simplifican con los valores de compresión en la madera para cargas situadas a 90° respecto a la fibra ($f_{c,90,k}$). Por lo tanto se asume que son semejantes ($f_{inc} \approx f_{c,90,k}$) al valor definido previamente en la Tabla 6-26
- El módulo de deslizamiento en los planos de incrustación ($K_{ser,p,m-a,\alpha}$) está asociado a las fases de plastificación avanzada cuando se ha sobrepasado la resistencia característica ($f_{inc} \approx f_{c,90,k}$) con un deslizamiento del plano expuesto a incrustación ($\Delta L_{0,inc}$). Está asociado a plastificaciones avanzadas, con poca pendiente (véase Figura 6-111) y por este motivo se considera muy pequeño ($K_{ser,p,m-a,\alpha} \approx 0_k$)

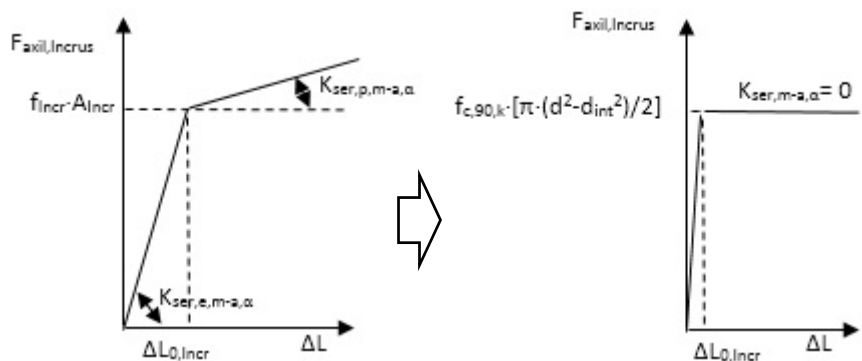


Figura 6-119. Simplificaciones al comportamiento de incrustación.

En consecuencia, se toma una componente axial sobre la clavija ($F_{axil,Incrus}$) del lado de la seguridad y da lugar a la Ecuación 6-70 como simplificación de la Ecuación 6-68.

$$F_{axil,Incrus} = k_{Incr} \cdot \left[n_{Esp} \cdot \pi \cdot \frac{(d^2 - d_{int}^2)}{2} \cdot f_{c,90,k} \right]$$

Ecuación 6-70

En cualquier caso, debe recordarse que pueden existir distintas formas de lograr incrustaciones entre la madera y la clavija, por ejemplo con kits expansivos, por lo que cada caso debe ser estudiado de una forma particular.

6.5.2.3.4 Contribución por expansión

Los procesos de expansión son muy diversos (véase Apartado 3.8) y cada uno de ellos puede tener un tratamiento de cálculo analítico particular. Aunque los apartados anteriores referentes a efecto soga derivado de fuerzas de rozamiento y el debido a superficie de incrustación están muy relacionados con los procesos de expansión, parece aconsejable descomponerlos en términos separados ya que hay una posible superposición de efectos. El procedimiento de expansión que se ha descrito en el Apartado 3.8.4, donde se procedía a expansionar un tubo hueco que, posteriormente, se rellenaba mediante una clavija interior, parece interesante, al repartir las presiones en toda su superficie. Esto requiere el ajuste de un diámetro nominal de agujero (d) a un nuevo diámetro (d_{ext}), a la vez que plastifica todo el contorno de la madera, lo que permite generar mayores fuerzas de rozamiento en toda la superficie exterior del cilindro de la clavija. Las muestras M33, M38, M52 y M54 se han ejecutado siguiendo este procedimiento.

En un primer estado, cuando aún no se ha aplicado carga sobre la unión, la fuerza axial máxima en la dirección de la clavija está relacionada con:

- La superficie cilíndrica de la clavija y su diámetro exterior (d_{ext}) tras el proceso de expansión.
- La presión que ejerce la expansión en dirección perpendicular a la superficie de contacto entre la clavija y la madera. Esta presión está relacionada con la resistencia de la madera en función de la posición de sus fibras. Por ello se trabaja de una resistencia por expansión (f_{ext}) de forma análoga a la resistencia característica al aplastamiento ($f_{h,k}$).
- El coeficiente de rozamiento entre la madera y el acero (μ_{m-a}) que permite relacionar la fuerza normal (asociada al producto de la presión por el área) con la fuerza en dirección tangente a la superficie.

En posteriores estados, con el proceso de carga en la unión, la clavija se ve obligada a intentar desplazarse en la dirección de su eje, por lo que la fuerza de rozamiento derivada de la expansión presenta valores máximos oponiéndose al movimiento, pero el área y la presión se ven modificadas. Prestando atención a la formación de rótulas plásticas de la clavija, la zona relacionada con el ancho de aplastamiento (b_1) se ve sometida a deformaciones que modifican la resistencia por expansión (f_{ext}), llegando a ser nulas en la zona donde se pierde el contacto mientras que en la zona donde progresa el aplastamiento la presión de expansión pierde influencia, especialmente si hay ciclos de carga y descarga en la estructura de forma independiente de la expansión inicial. El ancho restante ($t_1 - b_1$) que no esté expuesto a los aplastamientos derivados de la carga en la unión, no sufre modificaciones tan altas en los valores de presión por expansión y se considera constante, especialmente si la rigidez de la clavija es pequeña por lo que da lugar a la Ecuación 6-71.

$$F_{axil,Expan} = \mu_{m-a} \cdot f_{Exp} \cdot A_{Exp} = \mu_{m-a} \cdot f_{Exp} \cdot \pi \cdot d_{ext} \cdot (t_1 - b_1)$$

Ecuación 6-71

La Ecuación 6-71 debe corregirse si se quiere estudiar la variación del diámetro desde la situación de agujero inicial de la madera a la situación de éste una vez expansionada, por lo que se propone la Ecuación 6-72 para reflejar la expansión radial.

$$F_{axil,Expan} = \mu_{m-a} \cdot \left[k_{exp} \cdot \left(\frac{d_{ext} - d}{2} \right) \right] \cdot \pi \cdot d_{ext} \cdot (t_1 - b_1)$$

Ecuación 6-72

Siendo:

- $F_{axil,Expan}$ componente axil sobre la clavija en el punto B por expansión de la clavija en la madera, en N.
- μ_{m-a} coeficiente de fricción entre la clavija (considerada de acero) y la madera.
- A_{Exp} área expansionada, en mm².
- f_{Exp} tensión por expansión en la madera, en N/mm².
- d diámetro nominal del agujero, en mm.
- d_{ext} diámetro del agujero una vez producida la expansión del tubo, en mm.
- k_{Exp} coeficiente de expansión, en N/mm³.

De forma análoga a la fricción entre clavija y agujero de madera en el ancho de aplastamiento por la resistencia característica al aplastamiento ($f_{h,k}$), el coeficiente de rozamiento (μ_{m-a}) se trata en sus valores estáticos (justificándose en la aplicación lenta y gradual de la carga). El aplastamiento de la fibras modifica la rugosidad de la madera y, según el tipo de contacto, la superficie puede verse modificada, primero porque el proceso de expansión aplasta la madera y modifica la superficie (frente al acabado superficial ordinario de ésta) y luego porque el deslizamiento de la clavija en el agujero puede pulir o erosionar la superficie, motivo por el cual el coeficiente de rozamiento se debe reducir (se fija en $\mu_{m-a} = 0,3$).

El coeficiente de expansión (k_{Exp}) debe relacionar la tensión (provocada por la expansión) y la variación de la dimensión radial (que supone pasar del diámetro nominal al exterior) en distintas direcciones de la fibra. Este coeficiente debe relacionarse con el módulo de elasticidad paralelo ($E_{0,g,medio}$) y el módulo de elasticidad perpendicular medio ($E_{90,g,medio}$), considerando que es distinto en función del ángulo formado entre la dirección de las fibras de madera y la presión ejercida por la expansión de la clavija. La determinación de los módulos de elasticidad de la madera se ha descrito en los apartados 5.2.2 y 5.2.3, y es de interés si se quiere establecer una relación entre la variación de la longitud en la madera y la longitud inicial de la probeta. Se describe en las normas de ensayo (UNE-EN 408, 2004) y (UNE-EN 1193, 2010), pero presenta un inconveniente porque, al emplear una probeta de longitud igual a n veces la menor dimensión de la sección transversal, resulta difícil establecer una corrección simple entre los valores $E_{0,g,medio}$ y $E_{90,g,medio}$, definidos en kN/mm², (véase la Tabla 3-1 y Tabla 3-5 para las clases resistentes ensayadas) y el valor de k_{Exp} (en N/mm³) para la madera del modelo. Se asume que el factor de penalización es igual a 0,5 una vez que la unión ha entrado en servicio, que debe estar asociado a la rigidez de la clavija en las zonas expuestas a esfuerzos flectores. Esta penalización se aplica desde el coeficiente de expansión, por lo que se propone para su determinación la Ecuación 6-73. En consecuencia, para la madera del modelo (GL24h) se toma un valor de $k_{Exp} = 2,44$ N/mm³.

$$k_{exp} = 0,5 \cdot \left(\frac{E_{0,medio} - E_{90,medio}}{2 \cdot 1000} \right)$$

Ecuación 6-73

6.5.3 Influencia de elementos en la dirección de la carga

6.5.3.1 Factor de resistencia en intercaras de madera

La capacidad de carga por plano de cortante y por elementos de fijación ($F_{v,Rk}$) se ha relacionado principalmente con la contribución de la clavija ($F_{v,Rk,Clavija}$). Sin embargo, se debe tener presente la posibilidad de que existan otros factores que mejoran la capacidad de carga de la unión, y que pueden tener la misma dirección y sentido que la carga aplicada en la unión. La Ecuación 6-74 muestra la capacidad de carga, tal y como la describe la norma

(Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), añadiéndole un nuevo término: la capacidad de carga por plano de cortante total ($F_{v,Rk,Total}$) que pretende recoger otros factores.

$$F_{v,Rk,Total} = F_{v,Rk,Clavija} + F_{v,Rk,Roz,m-m} + F_{v,Rk,Conec}$$

Ecuación 6-74

Como se indicó en el Apartado 2.7.13 (relativo a los medios de fijación en conjunto), no es posible considerar de forma simultánea los valores máximos de la capacidad de carga de los distintos elementos resistivos presentes, y su porcentaje de participación en la resistencia total debe considerarse que es función de términos como la carga de trabajo y la deformación que se produce en la unión. La Ecuación 6-74 recoge, junto con la contribución de la clavija, otros factores como:

- Fricción en las intercaras de madera ($F_{v,Rk,Clavija}$).
- Elementos de tipo conectores ($F_{v,Rk,Conec}$) acoplados en las intercaras de madera (Figura 3-43). Estos presentan diseños adecuados para integrarse dentro de las uniones de tipo clavija, como se vio en el Apartado 3.7, pero curiosamente no tienen un tratamiento profundo en las normativas de diseño (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) que faciliten el cálculo de la resistencia por superposición de ambos elementos (conector junto con clavija).

Para los conectores, existen expresiones que permiten calcular su capacidad de carga máxima ($F_{v,Rk,Elem,Max}$), pero para aplicar una superposición entre los elementos que configuran la unión sería necesario disponer de una función que describa el comportamiento de cada elemento a medida que se incrementan la carga de trabajo y el deslizamiento [$F(u)$]. En la integración de elementos en contacto con la clavija (como los que mejoran el comportamiento axial), el cálculo es más complicado porque se mezclan las variables de distintas componentes (por ejemplo, el ancho de plastificación de la clavija modifica la longitud de encolado por el efecto sogá); afortunadamente, en los elementos descritos en la Ecuación 6-74, la interdependencia de variables se reduce.

La capacidad de carga máxima ($F_{v,Rk,Elem,Max}$) suele estar relacionada con algún tipo de fallo generalizado para ese tipo de unión (por ejemplo, para el elemento adhesivo, la pérdida de adherencia con la madera), por lo que la carga máxima puede ser un límite que permite distinguir dos funciones:

- La capacidad de carga “pre-fallo” del elemento en el contexto de la unión ($F_{v,Rk,Elem,Prefallo}$), descrita con una función [$F'(u)$] propia de la capacidad de carga del elemento antes del valor máximo de fallo; pero de ese elemento en concreto, no de toda la unión con clavija.
- La capacidad de carga “post-fallo” ($F_{v,Rk,Elem,Postfallo}$), descrita con otra función [$F''(u)$] para describir el comportamiento del elemento, sobrepasada $F_{v,Rk,Elem,Max}$ en el contexto de la unión.

La Figura 6-120 refleja este sistema de cálculo considerando que el comportamiento de los elementos responde a ecuaciones de tipo lineal. Éstas aproximan la carga ($F_{v,Rk,Elem}$) como producto de una constante de rigidez propia del elemento ($K_{Ser,Elem}$) por el deslizamiento. En la figura se identifica la expresión que se debe aplicar, alineada a la derecha de su bloque correspondiente.

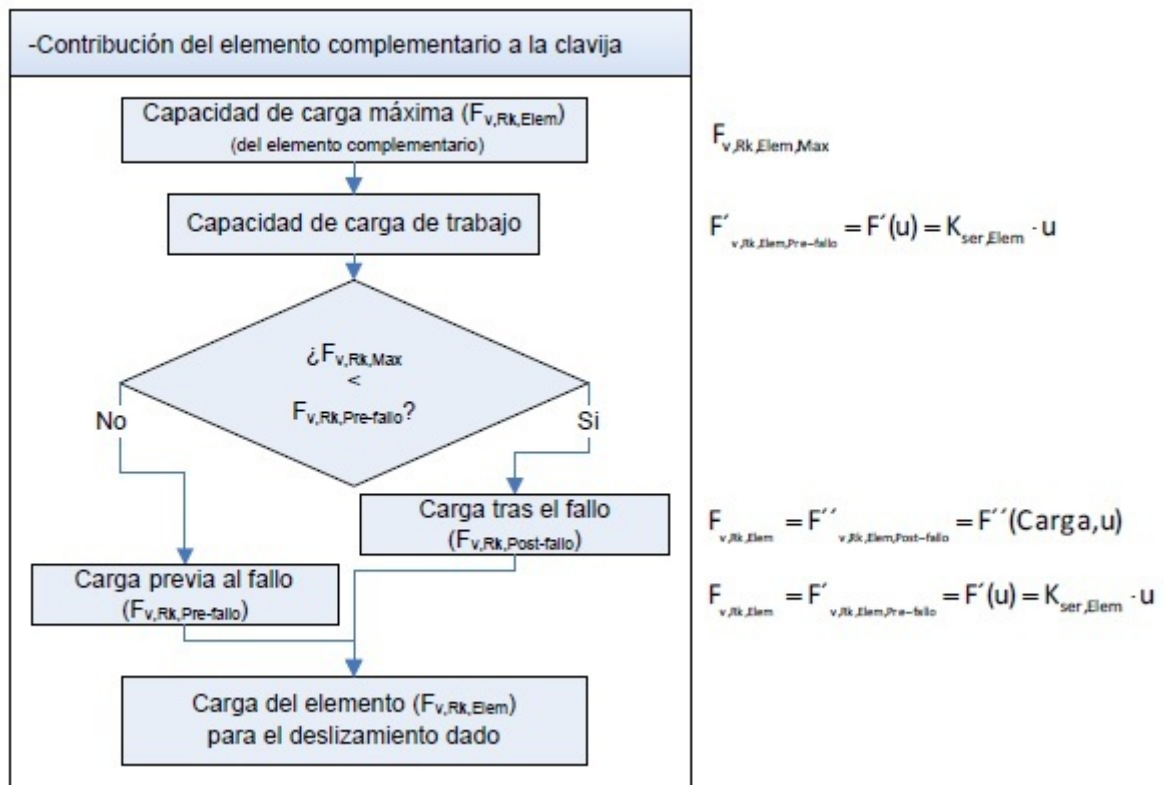


Figura 6-120. Sistema de cálculo de capacidad de carga del elemento complementario.

6.5.3.1.1 Contribución por rozamiento en las intercaras de madera

La contribución de las fuerzas de rozamiento en las intercaras de madera se ha venido despreciando (véase Apartado 2.7.3), de forma semejante a lo que ocurre con la contribución por rozamiento entre clavija y madera, pero este factor puede llegar a ser de interés si la fuerza axil que se da en la clavija es relevante. Esta debe considerarse en la sección de las intercaras de madera identificada en el punto “A” (Figura 6-86). El aumento es significativo cuando se añaden elementos de refuerzo (Apartado 2.7.2), como por ejemplo fijaciones tuerca-arandela o adhesivo en la clavija.

En la Tabla 6-27 se reflejaron valores de coeficientes de rozamiento para distintos materiales (Gorst & Williamson, 2003); para el caso de madera que nos ocupa, se puede considerar la madera del modelo como blanda. En función de si las fibras de la unión están paralelas entre sí ($\alpha = 0^\circ$) o perpendiculares ($\alpha = 90^\circ$), se puede recoger un coeficiente de rozamiento (μ_{m-m}) de entre 0,6 y 0,5.

No obstante, la madera utilizada para los ensayos ha sido tratada superficialmente para el control dimensional por control numérico o cepillado, lo que hace prever que los coeficientes de fricción pudieran ser distintos. El ensayo para determinar el coeficiente de fricción es relativamente sencillo y no destructivo. Se compone un plano de deslizamiento con las mismas piezas de madera que posteriormente se emplean en el ensayo con clavija para identificar el ángulo de rozamiento (α_{Roz}), que se puede relacionar con el coeficiente de rozamiento exacto entre madera y madera según la Tabla 6-27. Con las medidas realizadas sobre la composición de la Figura 6-121, donde se ha ido incrementando la pendiente, se determina un ángulo de rozamiento con un valor de $17,5^\circ$, para el cual se inició el deslizamiento del bloque; por lo tanto, para el coeficiente de rozamiento estático de la madera GL24h se toma un valor de $\mu_{m-m} = 0,31$. Con la modificación en la orientación de las fibras no se encontraron cambios significativos en el coeficiente.

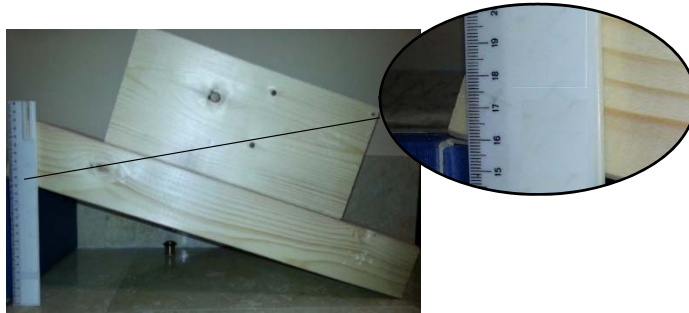


Figura 6-121. Revisión de coeficiente de fricción.

$$\mu_{m-m} = \tan(\alpha_{Roz}) = \tan\left(\arcsen\left(\frac{16,5}{55}\right)\right) = 0,31$$

Ecuación 6-75

Tras el proceso iterativo que fija el ancho de aplastamiento (b_1) se puede conocer el esfuerzo axil en la clavija, según la Ecuación 6-42 suponiendo que la sección de clavija con el momento flector máximo "B" y la sección de intercaras de madera "A" presentan la misma tensión de tracción.

Dado que la unión ha plastificado y la clavija presenta un ángulo de giro (θ), solo la componente normal a las intercaras de madera (N_{m-m}) se relaciona con la fuerza de rozamiento, la cual a su vez es una porción de la fuerza axil o de efecto sogá en la clavija (Ecuación 6-76).

$$F_{Roz,m-m} = \mu_{m-m} \cdot N_{m-m} = \mu_{m-m} \cdot F_{axil} \cdot \cos(\theta)$$

Ecuación 6-76

Atendiendo a este efecto relacionado con el giro (θ), no es aconsejable tener ángulos de rótula muy elevados porque esto reduce la componente normal a las intercaras de madera (Figura 6-122). Sin embargo, el ángulo de rótula también supone un aumento de la mayor parte de los sumandos que contribuyen al esfuerzo axil en la clavija, por lo cual se debe optar por una solución de compromiso en función de los elementos que se añadan para aumentar el efecto sogá.

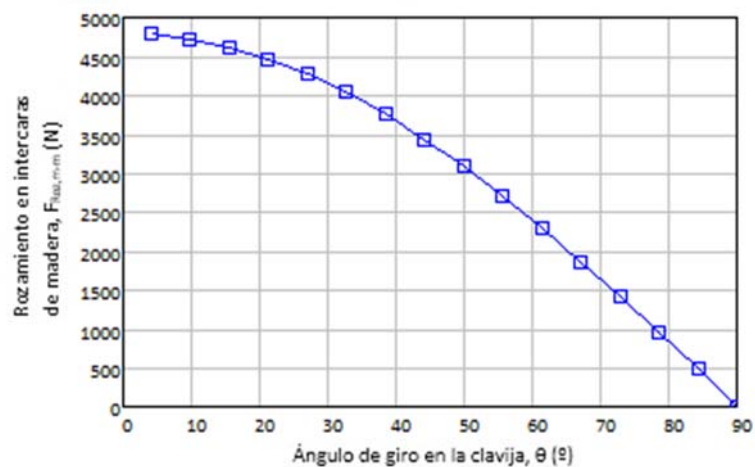


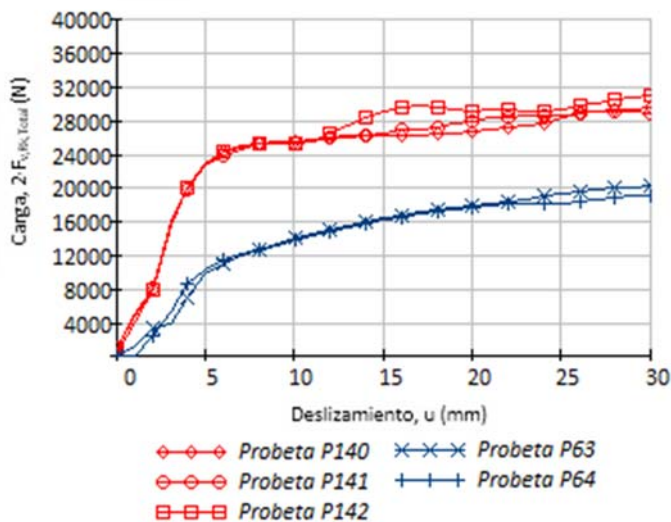
Figura 6-122. Contribución por fricción en intercaras de madera.

6.5.3.1.2 Contribución por conectores y placas dentadas

Se ha estudiado la relación entre carga y deformación, comparando los resultados de una serie de ensayos con probetas donde se mantiene el modelo base de la unión (muestra M31) con la clavija (de tipo roscado y métrica 10 mm), frente a otra serie donde (manteniendo el mismo tipo de clavija) se le añade un conector dentado en las intercaras de madera (muestra M21).

Para la unión con clavija y elementos de tipo conector (y a diferencia del caso de resistencia por rozamiento) se puede aplicar el algoritmo descrito en la Figura 6-120. Al añadir el conector, aumenta la rigidez en las primeras etapas de carga (de forma similar a lo que ocurría con el adhesivo que pegaba la clavija con la madera), pero aquí no aparece una cresta significativa con posterior caída o escalones (Figura 6-123). Se pueden identificar dos comportamientos distintos:

- El conector dentado recoge la mayor parte de la carga frente a la clavija consiguiendo una mayor rigidez para los deslizamientos iniciales de la unión.
- Un segundo tramo, donde ya se ha producido la plastificación de la madera en contacto con los dientes y la clavija, lo que da lugar a una reducción de la rigidez con la zona de meseta propia de plastificaciones avanzadas.



A) Gráficas de ensayos con clavija roscada:

- sin conector (Probetas P63 y P64 de la muestra M31)
- con conector (Probetas P140, P141 y P142 de la muestra M21)



B) Detalle de plastificación en la zona de intercaras de madera para combinación de clavija y conector P141.

Figura 6-123. Evolución de ensayos con conectores.

En la primera etapa se puede hablar de una capacidad de carga “pre-fallo” ($F_{v,Rk,Conec,Pre-fallo}$) que se define con la función $[F'(u)]$; para ratificar o ajustar ésta, se comparan los ensayos realizados con la muestra M21 (probetas P140, P141 y P142) y los de la muestra M31 que es su análoga sin conector, según se expone en la gráfica (Figura 6-123 A).

En el ensayo se puede apreciar que:

- El conector incrementa la pendiente del conjunto durante las primeras fases de deslizamiento.
- No hay una caída significativa de la capacidad de carga, sino una modificación de la pendiente a los 6 mm, a partir de la cual la unión evoluciona con una meseta de plastificación.
- No se identifican escalones previos a este cambio de pendiente por fallo del conector (como ocurre con las clavijas pegadas con adhesivo epoxi), con lo que el punto de $F_{v,Rk,Conec,Max}$ se puede fijar a los 6 mm.

La zona de meseta identifica la capacidad de carga “post-fallo” ($F_{v,Rk,Elem,Post-fallo}$). Según la Ecuación 6-77 se fija con un valor constante (igual a $F_{v,Rk,Elem,Max}$) porque, tras analizar con detalle la zona de la unión (Figura 6-123 B), se ha observado que los dientes del conector han seguido manteniendo la plastificación en las intercaras de madera; además, no se aprecian caídas significativas en la gráfica de carga frente a deslizamiento.

$$F_{v,Rk,Conec,Post-fallo} = F''(u) = F_{v,Rk,Conec,Max}$$

Ecuación 6-77

Es posible determinar la capacidad de carga máxima ($F_{v,Rk,Elem,Max} = F_{v,Rk,Conec,Max}$), según lo descrito en el Apartado 3.7 (Ecuación 6-78). También se puede relacionar el módulo de deslizamiento de elemento ($K_{ser,Elem}$) como el del conector ($K_{ser,Conec}$), según la Ecuación 6-79. Estas ecuaciones (Ecuación 4-17 y Ecuación 4-25) han sido aplicadas al modelo estudiado, dando lugar a valores de $F_{v,Rk,Conec,Max} = 4.360 \text{ N}$ y $K'_{ser,Conec} = 6.413 \text{ N/mm}$.

$$F_{v,Rk,Conec,Max} = 25 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot d_c^{1,5}$$

Ecuación 6-78

$$K'_{ser,Conec} = 1,5 \cdot \rho_m \cdot \frac{d_c}{4}$$

Ecuación 6-79

Definidas las dos variables analíticas ($F_{v,Rk,Conec,Max}$ y $K'_{ser,Conec}$), se pueden integrar con el algoritmo que relaciona la carga con el deslizamiento y verificar los resultados de los ensayos. Los valores de $F_{v,Rk,Conec,Max}$ están del lado de la seguridad. Pero con el módulo de deslizamiento ($K'_{ser,Conec}$) se puede identificar una situación semejante a la correspondiente a la clavija, que ya se describió en el Apartado 6.4.6.3. Hay un desajuste entre el $K'_{ser,Conec}$ analítico (según la Ecuación 6-79) y el real. Si analizamos con detalle la capacidad de carga máxima dada por la Ecuación 6-78 y el módulo de deslizamiento dado por la Ecuación 6-79, no es posible que la transición a la zona de meseta se dé para un deslizamiento de la unión de 6 mm, como se ha visto que ocurre experimentalmente (véase Figura 6-123 A). En consecuencia, la ecuación que define el módulo de deslizamiento para el caso de superposición con clavija debe ser tratada con más detalle; hay variables que deben ser tenidas en cuenta, como el hecho de que la clavija no se fije en los extremos. Para el modelo planteado, se identifica un módulo de deslizamiento de 727 N/m (Ecuación 6-80), lo que supone un 11 % del anteriormente propuesto; es decir, que $K'_{ser,Conec}$ es corregido según la Ecuación 6-81 para ser sustituido finalmente en la Ecuación 6-82 e integrarse en el algoritmo.

$$K_{ser,Conec} = \frac{F_{v,Rk,Conec,Max}}{u_{Max}} = \frac{4.360\text{N}}{6\text{mm}} = 727 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Ecuación 6-80

$$K_{ser,Conec} = 1,5 \cdot 0,11 \cdot \rho_m \cdot \frac{d_c}{4} = 0,17 \cdot \rho_m \cdot \frac{d_c}{4}$$

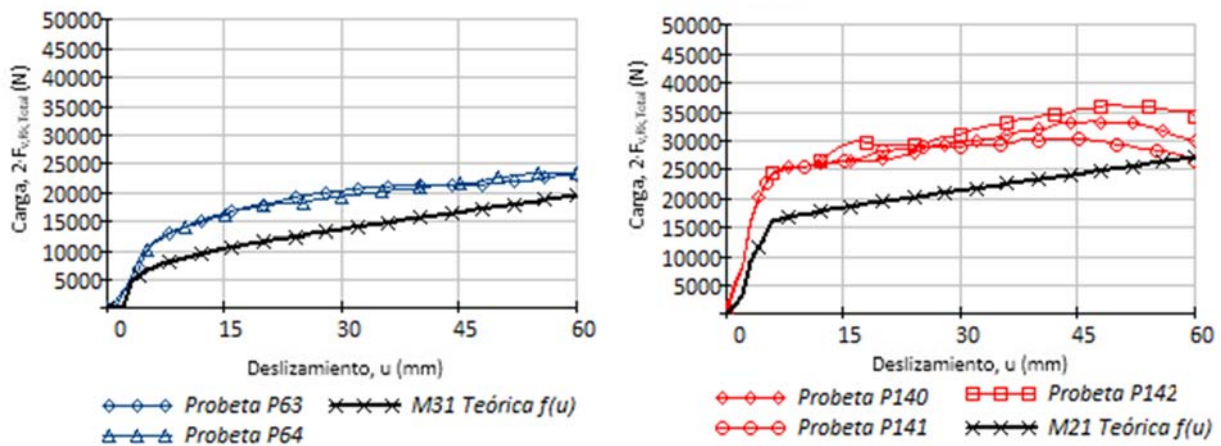
Ecuación 6-81

$$F_{v,Rk,Conec,Pre-fallo} = F'(u) = K_{ser,Conec} \cdot u$$

Ecuación 6-82

Para ratificar la correcta integración del aumento en la capacidad de carga con el conector y el procedimiento numérico que relaciona capacidad de carga y deslizamiento, se muestran las líneas remarcadas en trazo grueso, correspondiente al proceso analítico, frente a los resultados de los ensayos (más finas) para conector y clavija (M21) y solo con clavija (M31), según la Figura 6-124. Frente a la Figura 6-95, donde solo se trataba el efecto de aplastamiento en la madera con rótulas plásticas de la clavija, en la Figura 6-124 también se contempla de forma analítica la acumulación de otros factores vistos anteriormente, como el de incrustación de las fibras de madera en la rosca o la fricción. Vistos estos diagramas, se observa que los cálculos analíticos tienen la misma tendencia que

los experimentales, pero con cierta diferencia en cuanto a la magnitud de resultados por el lado de la seguridad, recordando que se han tomado valores característicos conocidos (X_k) propios de norma.



Probetas y muestra con clavija roscada sin conector

Probetas y muestra con clavija roscada y conector

Figura 6-124. Comparación de resultados analíticos y experimentales para muestras de probetas sin y con conectores.

6.6 Validación de resultados

Todo modelo debe ser testado para asegurar que es fiable, no tiene errores y que es aceptable para su posible uso. Requiere ser validado para determinar si los resultados que arroja se aproximan a los del caso real y, en cualquier caso, están dentro de los intervalos de seguridad. Para ello, se realiza una comparación entre los resultados del modelo analítico propuesto con los resultados experimentales, en los que se realizaron tres ensayos de repetición para definir el comportamiento de cada muestra con las mismas características de diseño. En apartados anteriores ya se ha venido anticipando esta comparación, a medida que evolucionaba la carga con el deslizamiento y se integraban distintos elementos como: la fijación con tuerca y arandela en los extremos de clavija, la inyección de adhesivo en el agujero o la inserción de conectores en las intercaras de madera (Figura 6-114, Figura 6-116 y Figura 6-124 respectivamente). En todos los casos se ha identificado la misma tendencia de la propuesta analítica como una aproximación a la real desde el lado de la seguridad.

Atendiendo al modelo base con clavija lisa, se retoma la comparación de la muestra [M25], montada con acero dúctil (S275 con $f_y = 443 \text{ N/mm}^2$), con la muestra [M26], montada con acero calibrado de mayor dureza (F111 con $f_y = 545 \text{ N/mm}^2$), como se puede ver en la Figura 6-125. Se han aplicado los distintos efectos propuestos donde ya se pueden apreciar el resto de efectos descritos en los diagramas de cuerpo libre (Figura 6-86), frente a la Figura 6-125 en la que el estudio se centraba en la evolución de la plastificación con las rótulas de la clavija. Un factor que se añade a la capacidad de carga es, por ejemplo, la contribución por rozamiento entre clavija y agujero descrita en el Apartado 6.5.2.3.2, lo que da lugar a una zona de meseta (una vez que se presentan las rótulas plásticas de la clavija) con cierta pendiente, más cercana al comportamiento real de la unión.

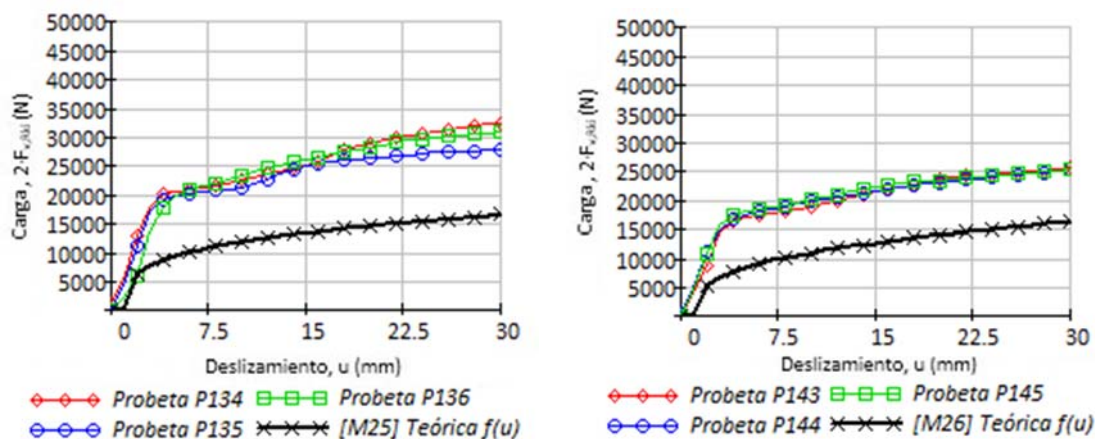


Figura 6-125. Comparación de resultados analíticos y experimentales

Para realizar la validación de resultados, se prepara un procedimiento a aplicar a todas las muestras que sigue el esquema por bloques expuesto en la Figura 6-126, donde se fijan las variables de entrada en un panel extendido (similar al mostrado en la Tabla 6-1), que luego se emplea para el cálculo numérico con el algoritmo desarrollado en apartados anteriores (véase Figura 6-104) y para el diseño de probetas para los ensayos experimentales. Finalmente se integran los resultados en un bloque que permite comparar los distintos resultados.



Figura 6-126. Flujo de integración de los distintos métodos de investigación.

Los bloques descritos en la Figura 6-126, junto con la información que da lugar a la validación de los resultados analíticos frente a los experimentales, se materializan en el Anexo G donde se encuentran los ficheros descritos a continuación:

- *00DatosDePartida.xls*, cumple las funciones de panel extendido para las variables de entrada (más de treinta), que describen el diseño de la unión con clavija y los elementos de refuerzo que se pueden combinar como, por ejemplo, las fijaciones con tuerca arandela y los conectores dentados. Los diseños de unión responden a la relación expuesta en la Tabla 5-5.
- *Mnn.xls*, realiza las operaciones en las muestras (donde “nn” es el número de la muestra), al agrupar los resultados experimentales de las distintas probetas y conectarlos con el algoritmo de cálculo. En definitiva realiza los cálculos, operaciones y tareas indicadas en el bloque con forma de flecha de la Figura 6-126 y de los bloques que están justo encima a las hojas de cálculo:
 - MXX, que agrupa los resultados de los ensayos de carga frente a deslizamiento para cada una de las probetas ensayadas de cada muestra y calcula los valores promedio, las desviaciones típicas y la pendiente de rigidez en cada intervalo de deslizamiento de 1 mm ($\Delta u = 1 \text{ mm}$).
 - Analítica, que es la hoja de cálculo que dispone de los resultados del flujo de cálculo analítico. Incluye las ecuaciones relacionadas con este proceso y la información de las variables calculadas como el ancho de aplastamiento (b_1), la carga total en la unión ($2 \cdot F_{v,Rk, \text{Total}}$), el ángulo de giro en la clavija (θ), la variación de longitud en extremos de clavija (ΔL) o la capacidad de trabajo en la unión

(W) entre otros. En la misma hoja se recogen los condicionales que indican la aparición de otros posibles modos de fallo indeseado (como el de fenda en la madera, la rotura por tracción en la clavija o los modos de fallo 1 y 2 propios de clavijas muy rígidas). También se pueden ver las componentes de capacidad resistiva para los distintos factores, por ejemplo por rozamiento, incrustación o efecto sogá, todo el proceso iterativo y el error cometido al término de las iteraciones.

- PXXX, donde XXX es el número de probeta interpola los datos que contienen los archivos procedentes de la máquina de ensayo en puntos de deslizamiento concretos (en intervalos de un milímetro), con los cuales se realizan los cálculos analíticos.

Junto con los ficheros *MXX.xls* se facilitan los denominados *02GraficasComparacionMXX_YY.xmcd* que generan las gráficas extendidas para los distintos valores de carga total en la unión ($F_{v,Rk,Total}=f(u)$) para validar con los ensayos que pertenecen a la misma muestra. Ejemplos de este tipo de gráficas de validación son las reflejadas en la (Figura 6-114, Figura 6-116, Figura 6-124 y Figura 6-125).

- *01ValidacionDeResultados.xls*, actúa como comparador de validación al recoger los datos de interés para las distintas muestras en un punto concreto de deslizamiento.
- *02GraficasComparacionMXX_YY.xmcd*, genera la integración de las “i” muestras para dar lugar a la representación gráfica expuesta en la Figura 6-127 y siguientes.

Dado que la información descompuesta en la propuesta analítica y contenida en los ficheros *Mnn.xls* es muy amplia, se hace necesario condensar parte de ella y generalizarla a todas las muestras, en consideración de que junto con la clavija pueden montarse otros elementos como los conectores dentados. Por ello se opta por los criterios citados en la norma de ensayos con elementos metálicos (UNE-EN 26891, 1992) y se extrae la capacidad de carga en la unión para un deslizamiento fijo ($u = 15 \text{ mm}$). La Figura 6-127 expone los resultados de comparación para las muestras [M10] a [M20], representando en el eje de abscisas la capacidad de carga propuesta para la unión con el cálculo analítico descrito en este apartado frente al eje de ordenadas que refleja la capacidad de carga para el mismo deslizamiento resultante de los ensayos. Si los resultados fueran iguales los distintos puntos coincidirían en la bisectriz de los dos ejes de coordenadas (marcada en verde). Las desviaciones en pendiente de las líneas respecto de la bisectriz reflejan el grado de seguridad. Como se puede apreciar todas las probetas se han situado en la zona de seguridad (por debajo de la línea del modelo propuesto), y además la gran mayoría de ellas están en una banda entre el 40 y el 110% de factor de seguridad. Si se tienen presentes los coeficientes de seguridad expuestos en la Figura 6-76 y Figura 6-77, que comparaban la capacidad de carga en la unión según las ecuaciones de norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), se recordará que estos coeficientes de seguridad presentaban una oscilación mayor, llegando hasta el 400 %, a la vez que no facilitaban información sobre el estado real del deslizamiento y despreciaban distintos efectos como el de fricción y la integración de complementos resistentes como el adhesivo o los conectores.

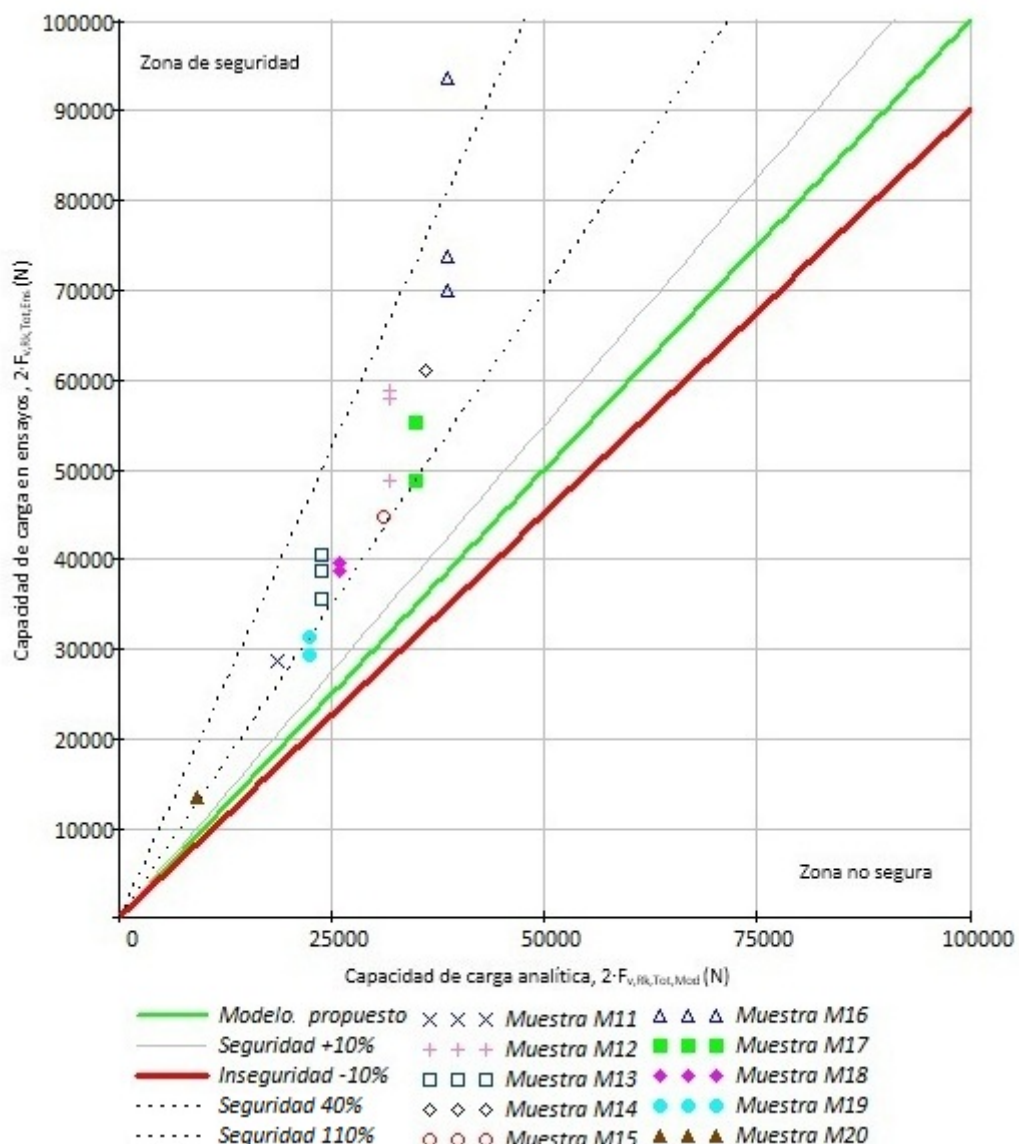


Figura 6-127. Validación de resultados. Comparación del modelo analítico frente a los resultados de los ensayos (1).

La Figura 6-128, Figura 6-129 y Figura 6-130 son similares a la anterior y reflejan la validación de resultados en el resto de muestras. En todos los casos la propuesta de cálculo analítico se sitúa del lado de la seguridad.

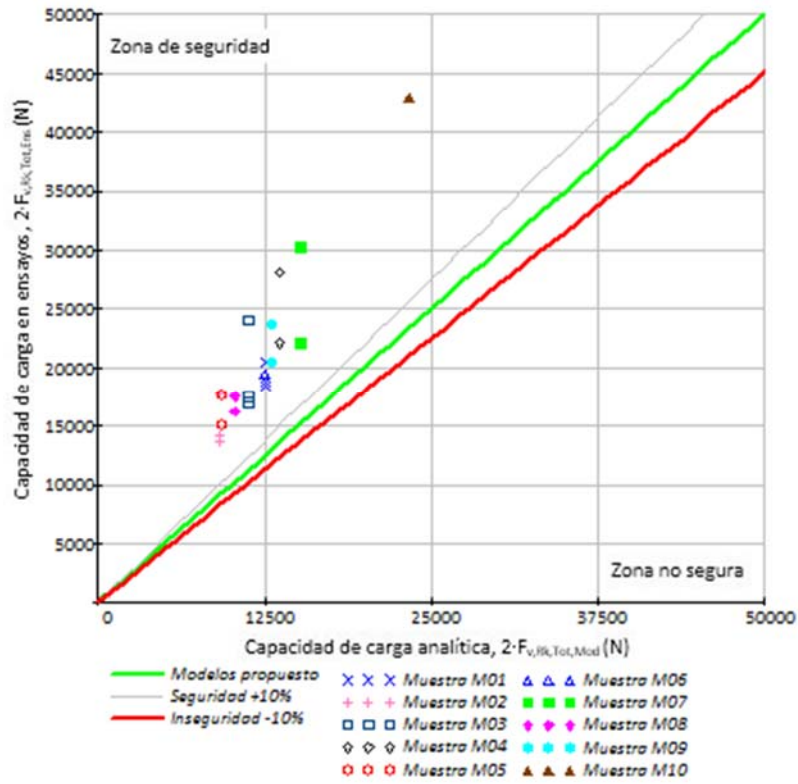


Figura 6-128. Validación de resultados. Comparación del modelo analítico frente a los resultados de los ensayos (2).

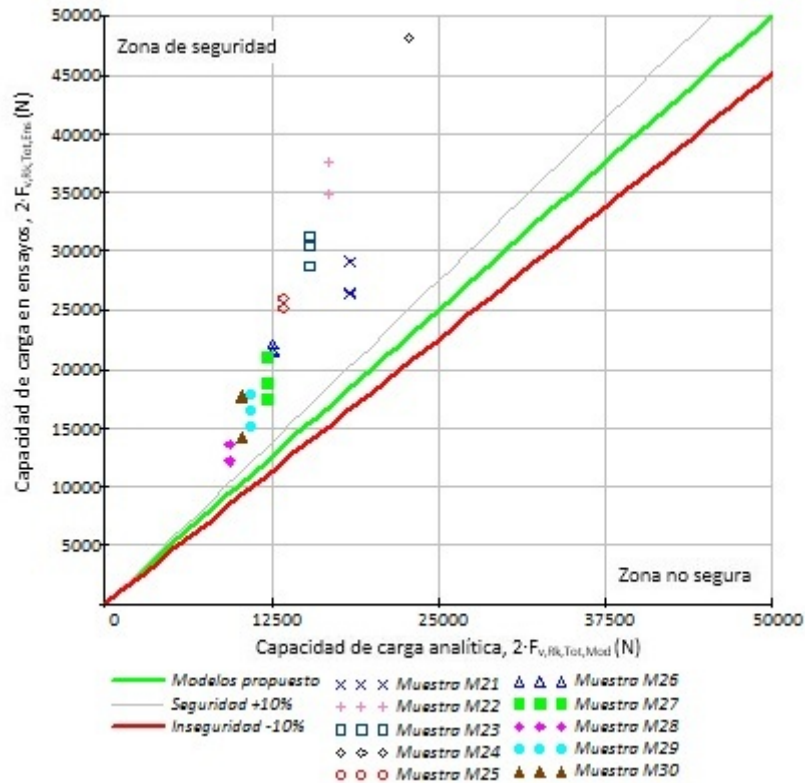


Figura 6-129. Validación de resultados. Comparación del modelo analítico frente a los resultados de los ensayos (3).

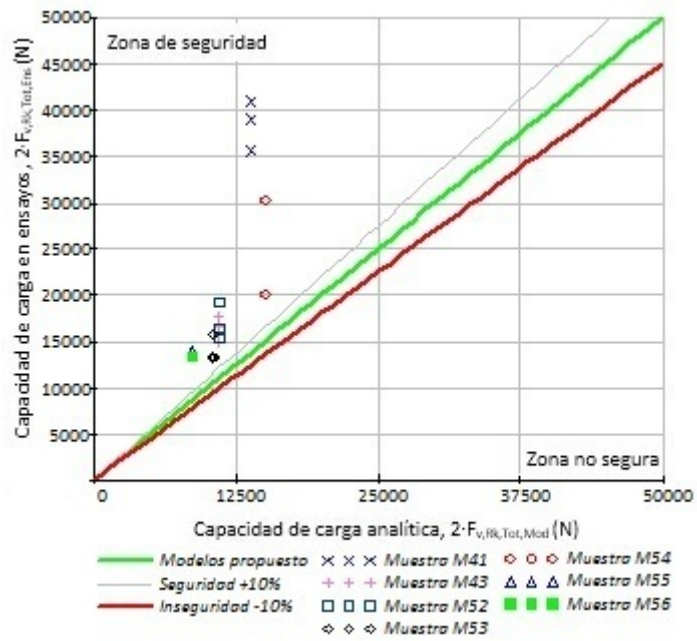


Figura 6-130. Validación de resultados. Comparación del modelo analítico frente a los resultados de los ensayos (4).

En general, permiten afirmar que los resultados de los ensayos realizados están por encima del valor esperado, que ha sido calculado con el modelo propuesto con un factor de seguridad de al menos el 10 %.

7 Conclusiones

7.1 Introducción

En este capítulo es momento de analizar el grado de consecución de los objetivos y la mejora de conocimiento en torno al eje fundamental de investigación: las conexiones tipo clavija en uniones estructurales de madera.

Partiendo de la identificación de los objetivos establecidos en el capítulo de introducción, se valora la consecución de los mismos a través del trabajo descrito en los distintos capítulos, considerando la documentación recopilada, los modelos desarrollados y los resultados expuestos junto con su discusión.

Se exponen las conclusiones de tipo técnico alcanzadas, sugiriendo las posibles líneas de trabajo a futuro y otros aspectos que han estado asociados al trabajo de investigación como patrocinios, colaboraciones, publicaciones y congresos que han derivado en paralelo con el trabajo de la investigación.

7.2 Consecución de objetivos

En el Apartado 1.4 se establecieron los siguientes objetivos, cuya consecución a continuación se valora:

- 1) *Analizar el estado del arte en lo referente a uniones en estructuras de madera e identificar tipologías afines al contexto de la madera estructural, junto con sus posibles variantes de diseño.*

Se han descrito la composición de la madera, así como los distintos modelos de comportamiento resistente para, posteriormente, identificar sus propiedades mecánicas. Una vez definida la madera como material estructural, se analizan sus posibles defectos de tipo biológico, físico y químico, así como la interacción con factores del ambiente de trabajo como la humedad, la temperatura o la resistencia al fuego. También han sido revisados distintos tipos de unión por la forma de encuentro y medio de fijación, particularmente aquellos en los que intervienen elementos tipo clavija detallando posibles variantes de diseño como la inyección de adhesivo en el agujero o la colocación de conectores dentados.

- 2) *Someter a revisión las expresiones que permiten determinar la resistencia de las uniones tipo clavija. Estudiar cuáles son las principales sugerencias e indicaciones de diseño propuestas por las normas, así como sus límites. Analizar las ecuaciones de dimensionado e identificar propuestas que mejoren el estado de la técnica, tanto en resistencia como en rigidez.*

Partiendo de la recopilación del estado de investigación sobre uniones con elementos clavija y de la actividad investigadora sobre la madera, se revisan las tipologías de unión que se pueden dar en estructuras de madera. En las uniones tipo clavija se ha hecho un estudio pormenorizado de las expresiones de cálculo empleadas para su dimensionado, con especial atención a las ecuaciones analíticas adoptadas en las normas (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009), y de los factores de seguridad complementarios que se les aplican. Se ha descrito el origen de las ecuaciones sobre las que se basa la norma y las simplificaciones que asumen, con un principal exponente en la teoría del rendimiento implementada en los años cuarenta (Johansen, 1949). A partir de estos fundamentos, se identifican otros factores a considerar en la unión tipo clavija, como los refuerzos que provocan efecto soga, el incremento del número de clavijas y la aparición de otros modos de fallos, a priori con dificultades de caracterización; o como los debidos a la superposición de elementos complementarios como los adhesivos, los conectores dentados o los kits de expansión. En relación a los estados de servicio, se muestran las ecuaciones analíticas y los algoritmos que permiten calcular la deformación o el deslizamiento de la unión debidos a los distintos estados de carga.

- 3) *Estudiar los elementos que participan en la unión, para garantizar su buen comportamiento, caracterizando los materiales empleados así como otros elementos que pudieran suponer una contribución positiva al comportamiento del conjunto; realizar un acercamiento a estructuras reales y casos prácticos con exigencias concretas, tanto estructurales como de durabilidad, a fin de dar una proyección aplicada al trabajo de investigación e identificar motivos de fallo en estructuras operativas, tomándolas como referencia para definir nudos, materiales, geometrías, cargas y comportamientos prácticos y aplicados.*

Se enumeran las premisas necesarias para un buen diseño de la unión, como la disposición geométrica aconsejable, la identificación de los factores que pueden afectar a su comportamiento, como la fricción entre las superficies de la clavija y el agujero, la fricción en los planos de contacto de las intercaras de madera o la densificación de la madera en zonas más sensibles a fallo. Se ha vinculado todos estos apartados con los autores de referencia.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de variables que intervienen en el comportamiento de estas uniones, se han recopilado las especificaciones de conformidad exigibles para su empleo. Se ha tenido en cuenta la verificación de las propiedades de los materiales a emplear, especialmente con los certificados de conformidad del mercado CE, la consideración de estos con la normativa vigente y los documentos de idoneidad técnica exigibles a la construcción de obra civil. En los materiales donde el cumplimiento de la documentación garante de sus propiedades ha sido más comprometida, se han realizado ensayos para la ratificación de las propiedades más sensibles. Por ello, el acero de la clavija ha sido expuesto a ensayos de tracción simple, cristalografía y dureza Vickers, y se han verificado los diámetros en las varillas de tipo roscado mediante un proyector de perfiles. También se ha revisado el peso de la madera de las probetas (para ratificar densidades) y se ha controlado la humedad de las mismas.

En la búsqueda de otros elementos que pudieran suponer una contribución a la mejora del comportamiento de la unión por clavija, se ha valorado la inclusión de distintos adhesivos, placas clavo (en su variante de conectores dentados) o sistemas de expansión, con objeto de seleccionar aquellos que mejor se pudieran integrar con la unión. Considerando propiedades y referencias bibliográficas, se ha puesto foco en adhesivos Epoxi, conectores de doble dentado en las intercaras de madera y expansión mecánica con clavija maciza.

- 4) *Realizar un acercamiento a estructuras reales y casos prácticos con exigencias concretas, tanto estructurales como de durabilidad, a fin de dar una proyección aplicada del trabajo de investigación e identificar motivos de fallo en estructuras operativas, tomándolas como referencia para definir nudos, materiales, geometrías, cargas y comportamientos prácticos y aplicados.*

Una vez recopilados y caracterizados los materiales de base y los elementos complementarios, se ha revisado su integración en una estructura de carácter histórico: los Almacenes de Picos las Dársenas del Canal de Castilla en Alar del Rey (Palencia). A esta estructura se le ha hecho un seguimiento, a lo largo del proceso de rehabilitación, que ha permitido identificar composiciones habituales en las uniones, órdenes de magnitud en las cargas que actúan sobre ellas y condiciones de fallo que les pueden afectar. También se hizo un estudio sobre las causas que provocaron su degradación, de las nuevas composiciones de nudos con clavija que se han empleado en su rehabilitación, y qué materiales disponibles hoy en día se consideran para su reconstrucción.

- 5) *Desarrollar modelos numéricos, especialmente de elementos finitos o el relacionado con los diagramas de cuerpo libre y las ecuaciones de equilibrio estático en distintas situaciones de carga, con la intención de conocer en detalle la evolución de las distintas clases de unión con clavija a medida que entran en carga y las magnitudes de las tensiones en las zonas de interés, especialmente interiores a la unión, que de otra forma, sería complicado determinar.*

En el trabajo se han aplicado las ecuaciones de cálculo analítico sobre un modelo de unión con parámetros numéricos, lo que ha permitido deducir valores de cálculo resistente tanto para la clavija como para la madera, y para la capacidad de carga de la unión. Este modelo se ha integrado en una aplicación a modo de hojas de cálculo

en Mathcad®, lo que permite desarrollar gráficas tridimensionales para ver la evolución de las distintas variables. En dichas gráficas se ve cómo evolucionan las funciones analíticas con los distintos términos independientes, especialmente la carga admisible del nudo frente a: variaciones de diámetros, espesores de piezas de madera, ángulo relativo que forma la dirección de la fibra entre las distintas piezas de madera y la clavija o tipos de materiales utilizados en la clavija o en la madera (tanto lateral como central).

También se han preparado modelos de elementos finitos, inicialmente de una forma simple, con pocos nudos y algoritmos de programación básicos en Matlab®; de los que se pasó a modelos en tres dimensiones con Abaqus® que representan la unión y sus partes con sus volúmenes reales. Los resultados de los modelos de elementos finitos desarrollados han permitido identificar de forma detallada el comportamiento del nudo; en particular, la evolución de las tensiones en las distintas zonas de contacto entre madera y clavija durante todo el proceso de carga de la unión. Como fruto de estos desarrollos, se anexan a la presente memoria los programas de cálculo y los modelos que han permitido componer el dimensionado, la simulación de la unión y el detalle de las zonas de trabajo con más interés.

- 6) *Estudiar el comportamiento de los nudos desde un enfoque experimental, fijando los procedimientos de ensayo, y estableciendo el número de ensayos representativos y su composición en muestras como base de posibles tratamientos estadísticos. Realizar gráficas comparativas y valorar posibles fallos en la unión. Comparar los resultados experimentales con los correspondientes a las simplificaciones asumidas por las normas y los modelos de elementos finitos.*

Se ha desarrollado un procedimiento de ensayo, basado en las referencias normativas, considerando las distintas variantes de ensayo.

Las máquinas de ensayo han sido caracterizadas por sus parámetros técnicos (en especial los grados de precisión) y se ha asegurado la validación de sus resultados, comprobando que estaban sometidas a los correspondientes procesos de calibración y verificación. Se han diseñado y fabricado herrajes específicos para el montaje de las probetas y su colocación en la máquina de ensayos. Se han establecido los parámetros, procedimientos y controles con uniones de tamaño real, para que los ensayos tengan garantías en la definición de los resultados obtenidos. En el anexo se facilitan los informes de resultados de más de cien ensayos y una agrupación de las probetas por muestras, lo que permite definir modos de fallo, cargas, deslizamiento, rigidez, energía, variantes de dimensionado y hasta setenta variables que definen la unión con clavija y el ensayo al que ha sido sometida. A partir de estos resultados, se han podido evaluar comportamientos y comparar la desviación respecto de ellos de las distintas alternativas.

- 7) *Integrar los resultados obtenidos de los ensayos en una aplicación de gestión que permita generar informes normalizados, de modo de sirvan como base de datos para otros trabajos futuros y facilite el tratamiento y análisis de la información.*

La búsqueda de software especializado para los procedimientos aplicados en la ejecución de los ensayos, plantillas normalizadas y sistemas de gestión de información específicos para este tipo de uniones, incluso en centros especializados en ensayos con madera, ha dado resultados escasos. Por este motivo se ha desarrollado una base de datos a medida (que se anexa a la presente memoria), a modo de sistema gestor que permita la generación documental, incluyendo información de la unión y el ensayo al que ha sido sometida. También está conectada con hojas de cálculo, por lo que integra datos de cálculo analíticos y dispone de herramientas para la entrada y salida de información y generación de informes de forma automática. Tiene capacidad para, en caso necesario, poder gestionar un mayor volumen de información y conectarse con otras aplicaciones.

- 8) *Valorar elementos adicionales que puedan reforzar a la unión con clavija, al objeto de reducir los valores del diámetro de clavija y evitar el debilitamiento de las vigas de madera.*

Se han estudiado y validado, por cálculos numéricos y ensayos experimentales, distintos elementos de refuerzo para la clavija. Como reseña de lo expuesto en el capítulo de resultados y en las conclusiones técnicas, es de resaltar la mejora de rendimiento por efecto sogá, con la fijación de los extremos de la clavija haciendo uso de tuerca-arandela, que incrementa significativamente la ductilidad; y el adhesivo epoxi, que mejora la rigidez y reduce el deslizamiento.

- 9) *Obtener las conclusiones finales del estudio y propuestas de mejora que puedan ampliar los conocimientos sobre el diseño de este tipo de uniones.*

Se exponen a continuación.

7.3 Conclusiones

Las conclusiones técnicas, que derivan de lo comentado a lo largo de la memoria y, especialmente, del capítulo de resultados y discusión de los mismos, se recapitulan de forma más breve a continuación.

1. Las uniones en estructuras de madera con elementos de tipo clavija dan lugar a sistemas estructurales solventes. En el caso de emplear disposiciones en cortadura doble se evita la aparición de excentricidades en la transmisión del esfuerzo entre los diferentes elementos que se unen. Aunque los posibles tipos de uniones son muchos, en el momento en el que se pasa a grandes luces, de más de 15 o 20 m, la revisión de estructuras de referencia indica que hay una tendencia a emplear madera certificada, y a resolver las uniones con algún tipo de clavija o agrupaciones de ellas que habitualmente se fijan en sus extremos. En los diferentes modelos numéricos y ensayos estudiados no se identificaron fallos inesperados, como los asociados a la aparición de hienas; en el caso de madera laminada, las líneas de encolado del laminado tampoco dieron lugar a roturas por este motivo, concluyendo que se hace necesario la utilización de maderas con calidades certificadas y respetar los modos de fallo con rótulas en la clavija propios de diámetros de ésta más pequeños.
2. Se debe diseñar la unión buscando, siempre que se pueda, un modo de fallo dúctil. Implica unas dimensiones en la unión que provoquen la aparición de modos de fallo con rótulas en la clavija para optimizar el trabajo de la misma. En estructuras, un fallo dúctil es interesante ya que avisa del mismo. Los otros modos de fallo, que se producen con aplastamiento generalizado en la madera, obligan al redimensionado de la escuadría como consecuencia fallo frágil de la unión, y a tratar las diferencias entre la sección bruta y neta de la madera para evitar otros fallos como los de hienda. Estos modos de fallo frágiles están relacionados con clavijas rígidas y afectan a piezas más grandes y costosas. Por este mismo motivo, las clavijas tubulares huecas suponen mayores diámetros de agujeros y tampoco son aconsejables. El modo de fallo con una sola rótula en la clavija tampoco es aconsejable, porque causa daños en aquellas zonas donde la clavija presenta un comportamiento rígido, sin contribuir a la capacidad de carga en la unión y presenta dificultades para la fijación de elementos tipo tuerca y arandela en los extremos que mejoren el efecto sogá. El desarrollo de las rótulas de plastificación en la clavija puede variar en función de las holguras y el deslizamiento que presenta la unión y, como en el caso de los modos de fallo con aplastamiento generalizado en la madera, puede condicionar el redimensionado de la escuadría de la madera. Por lo tanto, es aconsejable una disposición de la unión simétrica con modos de fallo que den lugar a una doble rótula plástica en la clavija.
3. Se identifican las ecuaciones analíticas desarrolladas por Johansen (1949) como una base fundamental para el estudio de la resistencia en las uniones con clavija. Estas ecuaciones, que partieron de estudios sobre clavijas sin fijaciones en sus extremos, establecen simplificaciones como el concepto aproximar las piezas de madera por lajas planas y su aplastamiento por parte de la clavija. Con ellas se define la capacidad de carga fija en la unión, contemplando efectos de plastificación tanto en la madera como en el acero. Sus bases de cálculo han sido revisadas y ratificadas durante más de medio siglo de uso. La introducción de la normativa de cálculo estructural específica para madera (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009) establece cómo debe ser el dimensionado de las uniones de madera y, en consecuencia, un uso más solvente en las técnicas de diseño, ejecución y ensayo. Estas normativas han considerado el dimensionado de las uniones con clavija, asumiendo las ecuaciones definidas por Johansen y aplican coeficientes parciales de seguridad en las propiedades resistentes de los materiales que forman la unión. La comparación con los ensayos y con los modelos de elementos finitos colocan la capacidad resistente de las uniones dimensionadas con esta normativa del lado de la seguridad.

4. En base a las ecuaciones analíticas desarrolladas por Johansen y asumidas en las normas de cálculo estructural, se ha estudiado cómo mejora la capacidad de carga de la unión en función de las distintas variables. El aumento del diámetro de la clavija es una de las variables que logra mejoras más significativas. Aplicar valores que penalizan la capacidad resistente en los materiales que participan en la unión induce a aumentar el diámetro de la clavija en el proceso de diseño para cumplir las necesidades en la capacidad de carga de la misma, provocando con ello un debilitamiento en la sección neta de madera y cambios en el modo de fallo previsto con las ecuaciones analíticas frente al real, lo cual es contraproducente. Es aconsejable emplear un ajuste más fino en el cálculo de la capacidad resistente de la unión, considerando propiedades reales del conjunto, lo que se puede lograr vía ensayo y control de calidad de modo similar a como se hace en estructuras de hormigón.
5. El uso de métodos de cálculo de uniones clavija utilizando el modelo de unión sin fijaciones en los extremos en aquellos casos que disponen de estos elementos, pero hay disposiciones como las fijaciones en los extremos de la clavija que actualmente son muy comunes e implican ajustes, para ello, las normas estructurales amplían las ecuaciones de Johansen para estos casos, sumando porcentajes fijos, obtenidos a partir de estudios particulares asociados con la resistencia de arranque, al punzonamiento en cabeza y punta de clavo que aumentan la capacidad de carga en la unión; constituyendo el denominado efecto sogá. Así planteada, la contribución por efecto sogá es independientemente de su comportamiento como vector de fuerza y del estado de plastificación en la unión con clavija, siendo contraproducente cuando se quiere alcanzar un dimensionado preciso, especialmente si se quiere conocer el deslizamiento y la rigidez de un estado de trabajo determinado en la unión.
6. Se ha desarrollado un modelo de elementos finitos en tres dimensiones para ampliar el grado de comprensión sobre el comportamiento interno de la unión. Este modelo incluye una subrutina que ha sido programada de forma específica para simular el comportamiento mecánico de la madera. Frente a los tipos de comportamiento habitualmente incluidos en librerías de los programas de elementos finitos, el que se ha diseñado mejora la definición del comportamiento ortótropo de la madera, al contemplar la diferencia entre los comportamientos a tracción o a compresión, según las direcciones longitudinal o transversal a las fibras de la madera. Para ello, hace uso de constantes mecánicas del material, como los módulos de elasticidad, los coeficientes de Poisson y las resistencias características para las direcciones longitudinal, tangencial. Los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de elementos finitos han sido ajustados, por comparación y comparados con las curvas de carga frente al deslizamiento de los ensayos experimentales, determinando las pendientes adecuadas en la relación tensión-deformación que definen el endurecimiento en la zona de comportamiento plástico, lo que permite mejorar la precisión, especialmente en la madera. Se ha ratificado la aparición de los efectos de aplastamiento en regiones localizadas de la madera y de las rótulas plastificadas en la clavija, junto con las distribuciones de las tensiones y las deformaciones en distintos estados de carga y deslizamiento. Para el estado tensional correspondiente a la capacidad de carga máxima que aguantaría la unión según las ecuaciones de norma, no se ha presentado la formación de rótulas en la clavija. Éstas se han desarrollado con valores de carga y de deslizamiento más elevados. Se ha ratificado la aparición de los comportamientos propuestos en su día por Johansen, incluyendo la relación de las rótulas de plastificación en las secciones de la clavija con los momentos flectores máximos que, una vez formadas, se han mantenido a medida que aumentaba el deslizamiento en la unión. Se ha comprobado que los anchos de aplastamiento que se producen en las piezas de madera, en la zona de contacto con la clavija, están limitados por las rótulas de plastificación de la clavija. También se ha observado que el desarrollo de la rótula de la clavija alojada en la pieza central de madera es previo a la formación de las rótulas en las piezas laterales, aunque con muy poca diferencia. A medida que evoluciona el deslizamiento, la rótula de la clavija alojada en la pieza central también presenta valores tensionales ligeramente mayores en comparación con las rótulas alojadas en las piezas laterales de

madera. Estas diferencias entre el desarrollo de las rótulas y sus valores tensionales están relacionadas con las holguras entre clavija y agujero, los asentamientos iniciales que se dan en la unión y el grado de rigidez de la clavija.

7. Dentro de las ecuaciones asumidas por la normativa, hay variables que requieren una mayor definición:
 - En el diámetro de cálculo de la clavija empleado en la unión, según los casos, deben considerarse diferentes valores. El diseño analítico utiliza un solo valor del diámetro nominal, pero se debe distinguir entre el diámetro inicial del agujero, el diámetro mínimo que puede presentar la clavija, que es el que se relaciona con la resistencia a flexión de la misma, especialmente cuando es roscada, y el diámetro final una vez realizado el montaje (que tiene en cuenta holguras, huecos para la posible inyección de adhesivos o deformaciones asociadas a diámetros finales de la clavija mayores que el agujero en el cual se aloja).
 - La resistencia que presenta la clavija en su límite último y el tipo de acero o el material empleados en la misma. El material de la clavija se debe establecer de forma que garantice las condiciones de ductilidad en la unión y un desarrollo resistente y fiable a medida que evoluciona en carga. Sería aconsejable fijar las clases de aceros, de forma análoga a como se hace con las clases resistentes de la madera. Deben mantenerse criterios análogos a los establecidos para el cálculo de estructuras de acero, donde se fija también el límite elástico y se limita el empleo de aceros frágiles o que hayan perdido propiedades de resiliencia, por ejemplo por endurecimiento.
 - La resistencia al aplastamiento de la madera también requiere de una mayor definición en función del ángulo de orientación de la clavija, el diámetro de la misma, y la capacidad que presentan sus fibras ante efectos de plastificación. Aunque para la madera en su conjunto se pierde resistencia a medida que aumenta el ángulo formado entre la carga y la orientación de la fibra, este efecto no resulta tan claro cuando el aplastamiento no es uniforme en un plano, como ocurre con el provocado por la clavija. Las fibras de madera pueden deformarse y cambiar su posición respecto a la dirección de la carga, especialmente cuando hay plastificaciones avanzadas.
 - El efecto sogá es uno de los factores que más pueden contribuir a aumentar la capacidad resistiva en la unión, especialmente a medida que evoluciona el deslizamiento en la misma porque los esfuerzos axiales que se dan en la clavija modifican variables tan significativas como el ancho de aplastamiento en la madera. La normativa no considera todos los factores de diseño que pueden contribuir a este comportamiento y debe ser estudiado en función del deslizamiento que se presente en la unión.
8. Los ensayos de las uniones se deben realizar con piezas de tamaños y calidades comerciales. El ensayo de probetas pequeñas libres de defectos resulta útil desde el punto de vista científico, pero si se pretende obtener las propiedades mecánicas para su empleo estructural, no es el procedimiento adecuado. Hay que basar la determinación de las propiedades mecánicas en ensayos que presenten formas y condiciones lo más parecidas posibles a las que se puedan dar en el destino final de la estructura. La aplicación del sistema de evaluación de las resistencias de la madera a partir de probetas pequeñas y libres de defectos, lleva a unos resultados que no siempre se ajustan a la realidad de las piezas con dimensiones comerciales. Inicialmente se pudo plantear debido a que, en esa época, la madera comercial era de una calidad superior a la disponible en nuestros días. Sin embargo, en la madera con defectos, como nudos, fendas o desviaciones de la fibra, la mayoría de las veces el modo de rotura se inicia como una fisura provocada por tracción perpendicular a la fibra en los alrededores de uno de esos defectos que aumenta de tamaño de forma combinada con un fallo por tracción paralelo a la fibra. En definitiva, la tendencia actual supone ensayar piezas con tamaños, calidades comerciales y condiciones lo más parecidas posible a su comportamiento estructural. Estas indicaciones han sido también consideradas en el diseño y ensayo de las uniones con clavijas. Las actualizaciones de las normas relacionadas con ensayos de madera (UNE-EN

383, 2007) o (UNE-EN 26891, 1992) marcan un camino hacia la homogeneización de los ensayos y el acercamiento de éstos al control de la ejecución de obra civil, de forma similar a lo que han venido haciendo en otros materiales estructurales. Sin embargo las normas de ensayos deben establecer relaciones con más detalle porque, mientras que las normas de dimensionado (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) fijan valores en la capacidad de carga, las de ensayo (UNE-EN 26891, 1992) establecen límites de deslizamiento máximo. Por otro lado, los ensayos presentan situaciones características, como la plastificación de la madera y la formación de rótulas en la clavija, que suponen un cambio en la pendiente que define la carga en función del deslizamiento. Del análisis de los ensayos se desprende que estos tres criterios, capacidad de carga, deslizamiento máximo y cambio en la curva de pendiente, no coinciden. En todos los casos, la capacidad resistiva según las normas de dimensionado, se ha mantenido muy por debajo de esta zona de plastificación y el cambio de pendiente identificado en los ensayos. El criterio de deslizamiento máximo establecido en 15 mm no responde a ningún patrón en relación con el comportamiento real de la unión ensayada, lo cual es lógico, dado que no establece relación alguna con las variables de diseño de la unión con clavija. En conclusión, es razonable establecer un criterio que limite la capacidad de carga de la unión, con un diseño que garantice primero el modo de fallo con doble rótula y después que se definan variables adimensionales que puedan ser independientes del tamaño del nudo, por ejemplo el ángulo de giro en la rótula. Esto supone un conocimiento más preciso del comportamiento en el interior de la unión. En el presente trabajo ha sido resuelto junto con las ecuaciones que definen el estado de carga como una función del deslizamiento en la unión.

9. La rigidez de la unión ha sido relacionada con la pendiente descrita por el módulo de deslizamiento, según las normas de dimensionado (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), y se obtiene de las gráficas de los resultados de los ensayos. Se trata de una estimación, porque el ensayo responde a una curva que varía en pendiente según evoluciona el deslizamiento. La pendiente asociada al módulo de deslizamiento presenta grandes variaciones, incluso si se compara con el mismo módulo fijado a partir de los criterios que se establecen en los ensayos (UNE-EN 26891, 1992), oscilando en valores por encima y por debajo de este último. Estas diferencias son previsibles, porque en el primer caso se calcula la rigidez a partir de la densidad de la madera y un diámetro nominal de la clavija en la unión, mientras que en el caso de los ensayos afectan otras variables que pueden modificar significativamente el valor de la pendiente a medida que evoluciona el deslizamiento, como puede ser el efecto sogá. Además, en determinados modelos de unión con clavija, se presentan otros elementos superpuestos, como la inyección de adhesivos, los conectores dentados o los kits de expansión. Las holguras en el montaje de la unión y el pretensado introducido mediante las fijaciones en los extremos de la clavija cuando se utiliza con tuerca-arandela tampoco son tenidas en cuenta para el cálculo del módulo de deslizamiento. La necesidad de conocer la rigidez en la unión con clavija también implica desarrollar una función que relacione la carga con el deslizamiento que presenta la unión.
10. La determinación del incremento de la capacidad de carga de una unión con clavija al introducirle elementos de refuerzo no se puede hacer sumando los valores de capacidad de carga máxima de cada uno de ellos. Estos pueden presentar fallos en serie o provocar una redistribución de las tensiones al interactuar, dependiendo de la deformación del conjunto. Para determinar toda esta interacción de esfuerzos se han desarrollado diagramas de cuerpo libre de la unión, ecuaciones y flujogramas de cálculo, de forma que se pueda conocer la evolución de la capacidad de carga en la unión para cada deslizamiento dado. Mediante esta metodología es posible determinar aquellos elementos que mejoren en mayor medida la capacidad de carga como función del deslizamiento que se da en la clavija.
11. Atendiendo al comportamiento de la unión, a su evolución en carga frente al deslizamiento y a los elementos que no están contemplados en las normas de dimensionado, se ha identificado que:

- Son deseables clavijas con gran rugosidad. Las varillas roscadas mejoran la fricción y el agarre en las zonas de plastificación y han sido muy versátiles, tanto en las estructuras reales como en las probetas ensayadas. Además, facilitan otras mejoras complementarias: incrementan la fricción, la incrustación de las fibras de la madera, la colocación de tuerca-arandela y la fijación de adhesivos inyectados. Como desventaja, la presencia de los filetes de la rosca reducen el diámetro neto de la clavija y en consecuencia el momento plástico de la misma. Además pueden dar lugar a fallos por efecto entalla.
- El uso fijaciones en los extremos de la clavija, como por ejemplo las realizadas con tuerca-arandela, introduce una fuerza axil a lo largo de la misma, que está relacionada con un pretensado que debe ser calculado y establecido en el montaje. La fuerza axil debe ser tenida en cuenta para relacionarla posteriormente con el efecto sogas y las fuerzas normales que puede provocar en los planos de contacto de las intercaras de las piezas; de no hacerlo, el efecto sogas afectará a la redistribución de fuerzas y tensiones, al igual que a la capacidad resistente de la madera en las zonas sensibles a aplastamiento. El uso del refuerzo tuerca-arandela en los extremos de la clavija mejora el comportamiento de la unión haciéndolo más dúctil y progresivo. Respecto a la capacidad de carga cuando se usa este tipo de refuerzo, su cálculo debe ajustarse especialmente en el aplastamiento producido por la arandela en la madera (si consideramos que son los dos materiales en contacto), el pretensado inicial y la disposición a la plastificación que se presente en la unión.
- El adhesivo mejora la capacidad de carga, especialmente cuando los deslizamientos en la unión son pequeños, incluso por encima de los valores del sistema con tuerca-arandela y tiene mayor interés en uniones con diámetros medios. A medida que se incrementa el momento de inercia de la clavija, su influencia decrece por la rigidez a flexión de ésta, que tiende a despegar el adhesivo con la flexión. Las clavijas encoladas, en general, implican uniones más rígidas. Adhesivos de tipo epoxi han dado buenos resultados, si bien su sensibilidad a la humedad hace no recomendable su empleo en ambientes muy húmedos (a partir del 20 % de humedad con clase de servicio 3). Las clavijas de acero roscado facilitan la unión con el adhesivo. Por su parte, la variación en la dirección de la fibra de madera respecto a la dirección de la carga no influye de forma relevante en la resistencia, aunque si se identificaron fallos de adherencia entre las fibras de madera y la clavija a causa de este parámetro. Por otro lado, si la inyección de adhesivo no llega a las intercaras de la madera (lo que daría lugar a uniones muy rígidas con una rotura frágil), el adhesivo facilita el efecto sogas al transmitir la tensión desde las zonas más alejadas en los extremos de la clavija.
- Los conectores dentados mejoran la capacidad de carga y la rigidez de la unión especialmente con deslizamientos pequeños. Los ensayos experimentales realizados utilizando los mismos demostraron que fallaban antes que la clavija, por lo que no se pueden sumar sus capacidades de carga máximas, pero a diferencia de los adhesivos no presentan caídas significativas en la capacidad de carga de la unión cuando se integran con las clavijas. En general dan lugar a problemas de compatibilidad cuando aparecen fenómenos de hinchazón y merma de la madera. Por otro lado, el espesor de la chapa que forma la base del conector da lugar a holguras en las intercaras entre las piezas de madera, lo que reduce el contacto directo entre las mismas y, a largo plazo, puede dar lugar a patologías como la pudrición y desplazamientos indeseados en estas zonas.
- El uso de kits que provocan la expansión del perno introduce tensiones tangenciales y efectos de fricción en el agujero donde se aloja éste que mejoran la componente de efecto sogas y, con ello, la unión del conjunto, pero las tensiones adicionales en dirección perpendicular a la fibra que provocan deben estar contenidas dentro de los límites de resistencia de la madera para esta dirección y tipo de esfuerzo. Se ha planteado el uso de distintos tipos de kits de expansión. Algunos de ellos dan lugar a procesos de incrustación, con resultados poco fiables al debilitarse el momento plástico de la clavija y presentar mayores holguras, por la necesidad de intercalar camisas metálicas expandidas por conos que son menos rígidas y tacos con pestañas que se pueden acabar rompiendo en el proceso de

expansión. El sistema más fiable ha resultado ser la expansión homogénea asociada a una mejora en la fricción entre acero y madera. Así mismo, visto el espectro de kits para fijaciones y refuerzos existentes en otros materiales estructurales y el extenso uso que se hace de los mismos, es de prever la aparición de sistemas prefabricados para la madera que agilicen la construcción de la unión, a la vez que minimicen el deslizamiento.

12. La evolución del comportamiento de las uniones de madera con elementos de tipo clavija y el empleo de sistemas de refuerzo (como los sistemas roscados, la fijación de tuerca y arandela en extremos, la integración de adhesivos, el uso de conectores o sistemas expansivos) hace necesario definir de forma rigurosa la manera de combinar los factores que intervienen. Deben seguir utilizándose los trabajos desarrollados en su día por Johansen, que para uniones con clavija sencilla han demostrado ser solventes, pero se hace necesario desarrollar modelos más complejos, para contemplar factores como el deslizamiento de la unión y el empleo simultáneo de refuerzos. Para ello se proponen los siguientes puntos:

- Establecer modelos con un esquema de unión de clavija completo, incluyendo los distintos elementos de refuerzo indicados previamente. A partir de éstos, deben desarrollarse los diagramas de cuerpo libre de las distintas partes de la unión, reflejando los vectores de fuerzas equivalentes al material retirado, y considerar las distribuciones tensionales que se pueden dar en cada zona.
- Con la misma técnica que aplicó Johansen, determinar las secciones de la clavija donde se dan los mayores esfuerzos, lo que lleva a fijar también el equilibrio de momentos respecto a las estas secciones donde se producen las rótulas de plastificación. Pero en la determinación de estas secciones se deben añadir los esfuerzos axiales de la clavija y considerar situaciones con distinto grado de plastificación, de donde se deduce que la componente de efecto soga afecta al ancho interior de aplastamiento en la madera y es función del deslizamiento, a diferencia de cómo se describe en la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).
- Establecer una ecuación para determinar el momento máximo que se da en la clavija para los distintos grados de deslizamiento, incluidas aquellas situaciones iniciales donde aún no hay una plastificación completa, adoptando el índice de plasticidad en la clavija y la resistencia de límite elástico del acero, lo que presenta varias ventajas como, por ejemplo, poder establecer el momento como función del deslizamiento y eludir el trabajo con límite último del acero. Aunque el momento tiende asintóticamente al establecido en la norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010), se mantiene del lado de la seguridad. Posteriormente se establece un proceso iterativo y convergente que define las variables para distintos deslizamientos, incluyendo los anchos de aplastamiento en la madera, el ángulo de giro en la clavija, y la capacidad de carga.
- Establecer una relación entre la capacidad de carga en la unión y el deslizamiento, que, una vez comparada con los ensayos, muestre las mismas tendencias, manteniéndose siempre del lado de la seguridad.

13. La nueva técnica que establece la relación entre la capacidad de carga en la unión y el deslizamiento permite añadir nuevos factores para considerar la mejora que supone la contribución por efecto soga, como la relación de los esfuerzos axiales que se dan en la clavija en el punto de momento flector máximo. Mediante esta metodología se pueden sumar componentes de fuerzas debidas a:

- La fijación en los extremos de la clavija, que ha sido desarrollada como una función del pretensado que se debe aplicar en la unión con clavija antes de que ésta entre a trabajar como unión estructural, el área de contacto entre arandela y madera, la rigidez que presenta esta superficie plana y el movimiento que presentan los extremos de la clavija a medida que aumenta el ángulo de rótula.
- La inyección de adhesivo entre clavija y agujero, y cómo se comporta en función de la longitud de encolado expuesta a tensiones cortantes.

- El rozamiento entre clavija y agujero, provocado, por ejemplo, por el moleteado de las superficies de la clavija o por las incrustaciones que aparecen entre las irregularidades de la clavija y la madera, como se da en el caso de clavijas con superficies roscadas.
 - Los procesos de expansión en clavija que dan lugar a la aparición de presiones entre madera y clavija y por lo tanto efectos de fricción similares a los tratados en el punto anterior.
14. La técnica de descomposición de las fuerzas que intervienen en la unión y el conocimiento de cómo se comporta ésta para cada estado de deslizamiento permite identificar la contribución de cada elemento en el estado de cargas total en la unión. En esta metodología deben determinarse:
- La parte del esfuerzo axial en la clavija que contribuye de forma directa para aumentar el ancho de aplastamiento en la madera, y por lo tanto a mejorar la capacidad de carga en la unión.
 - El rozamiento en los planos de contacto en las intercaras de la madera que son función del axial total que trabaja en la clavija en esa sección.
 - La contribución por conectores dentados que, como en los casos anteriores, también se debe establecer para cada deslizamiento determinado.
15. Concluir que con este procedimiento que se ha validado para las distintas posiciones de deslizamiento en la unión, y que se ha aplicado con las más de cien probetas ensayadas, las variables que intervienen en la unión se han podido desacoplar, lo que permite conocer valores internos, a la unión como el ángulo de giro en la clavija, las modificaciones en los anchos de aplastamiento de la madera como consecuencia del efecto soga y el efecto de la integración de distintos elementos de refuerzo, calculando su contribución a la capacidad total de carga de forma simultánea para cada deslizamiento dado.

7.4 Patrocinios y colaboraciones

Este apartado tiene como objetivo mostrar algunos aspectos de respaldo de los que ha disfrutado el presente trabajo, haciendo una breve reseña de los patrocinios y reconocimientos con que se ha podido contar por parte de distintos agentes, a los que el doctorando muestra su agradecimiento.

La tesis corresponde a parte del trabajo financiado por los siguientes proyectos de investigación:

- Programa de apoyo a proyectos de investigación del plan regional de investigación de la Junta de Castilla y León:
 - Orden EDU/1160/2008 de 26 de junio, en el marco del proyecto SA066A08 “Mejora de uniones tipo clavija en estructuras de madera mediante el empleo de pernos encolados” realizado durante los años 2008 a 2010.
 - Orden EDU/457/2009 de 2 de marzo, por la que se financia la contratación de personal técnico de apoyo a la investigación, según BOCyL de 6 de marzo de 2009, en el que se contrató a un auxiliar de laboratorio (compartido con el proyecto SA130A08).
- Proyecto BIA2012-36766 “Empleo de pernos expansivos en uniones tipo clavija de estructuras de madera. Estudio tenso-deformacional y mejora de rendimiento” que se está desarrollando desde 2012, con fecha prevista de finalización en 2016, en el marco del VI Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica del Ministerio de Economía y Competitividad.

Entre las empresas que han colaborado en el desarrollo del trabajo cabe destacar:

- REARASA, empresa dedicada a la restauración de edificios y artesonados de madera y piedra. Ha contribuido en la fabricación de las probetas empleadas en los ensayos. Su experiencia en estructuras de madera ha facilitado el acceso a obras y edificios con estructuras de referencia, muy particularmente

construcciones de interés arquitectónico, como las Dársenas de Alar del Rey. Ha defendido el empleo de elementos tipo clavija y el uso de maderas clasificadas para su uso estructural, incluso antes de la implantación del Código Técnico de la Edificación; sus trabajos han sido reconocidos también por distintos autores (Fernández, 2007). Ha tenido muy presente corregir el error que supone el criterio de sustituir elementos estructurales de madera por otros de acero, a menudo utilizados en la restauración, lo que ha perjudicado las obras de más antigüedad (Nuere, 2007).

- Grupo Inzamac (Instituto Zamorano de Materiales y Construcción), compañía fundada en 1983, que desarrolla su actividad en el ámbito de la prestación de servicios de ingeniería y consultoría, adaptando sus procesos productivos a los avances tecnológicos y colaborando en la mejora de sus procesos. En el grupo se realizan actividades tan diversas como proyectos de ingeniería, asistencia técnica a obras y trabajos de laboratorio para el control de calidad en la construcción. Asumiendo la I+D+i como una de las actividades clave, no han dudado en poner a disposición de este trabajo máquinas de ensayos y técnicos de apoyo, facilitando la ejecución de la parte experimental.

7.5 Publicaciones y congresos

El desarrollo de la presente tesis doctoral ha tenido el respaldo financiero de un proyecto del plan regional y otro del plan nacional de investigación científica, como se indicó en el apartado anterior. Directamente derivado de ello y en paralelo con el trabajo de Tesis, hasta la fecha, ha sido publicado el siguiente artículo en revistas científicas:

- *Procedimientos de ensayo para conexiones tipo clavija en estructuras de madera* (Domínguez M., Fueyo J.G., Henares G.L. y Cabezas J.A., 2014). Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica.

Además, se han publicado los siguientes artículos en revistas científicas, relacionados con el estudio de elementos estructurales de madera:

- *Reduction of perpendicular-to-grain stresses in the apex in double shear* (Fueyo J.G., Cabezas J.A., Rubio M.P. y Domínguez M., 2008). Materials and Structures.
- *Design of connections with metal dowel-type fasteners in double shear* (Fueyo J.G., Domínguez M., Cabezas J.A. y Rubio M.P., 2009, B). Materials and Structures.
- *Reducción de tensiones en apoyos entallados de vigas de madera mediante empleo de pernos* (Fueyo J.G., Cabezas J.A., Rubio M.P. y Domínguez M., 2009, C). Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica.
- *Análisis tensional de un nudo de esquina rigidizado mediante barras encoladas de un pórtico triarticulado de madera* (Fueyo J.G., Cabezas J.A., Domínguez M. y Rubio M.P., 2010, A). Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica.
- *Rendimiento de uniones clavija de tipo perno encolado usando elementos finitos* (Fueyo J. G., Domínguez M. y Cabezas J.A., 2011, B). Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica.

También se han realizado trabajos de difusión en congresos especializados:

- *Estudio mediante simulación numérica de uniones a través de elementos tipo clavija* (Domínguez M., Fueyo J.G., Rubio M.P. y Cabezas J.A., 2008). XVII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.
- *Estudio empírico de mejora de uniones tipo clavija en estructuras de madera mediante el empleo de pernos encolados* (Domínguez M., Fueyo J.G., Henares G.L. y Cabezas J.A., 2010). XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.
- *Sistemática de prácticas en laboratorio con pórticos y distintos estados de carga, ratificación con técnicas numéricas y Mathcad®* (Domínguez M., Fueyo, J.G. y Cabezas J.A., 2013). Segundas Jornadas de Innovación Didáctica en la Universidad de Salamanca.

Se ha participado en los trabajos de difusión en congresos especializados:

- *Estudio mediante MEF del comportamiento mecánico de vigas de madera de vértice peraltado reforzadas con barras encoladas* (Rubio M.P., Fueyo J.G., Cabezas J.A. y Domínguez M., 2008). XVII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.
- *Análisis de tensiones en uniones de tres barras de cerchas ligeras de madera realizadas con placas-clavo* (Fueyo J.G., Domínguez M. y Cabezas J.A., 2009, A). Análisis de tensiones en uniones de tres barras de cerchas ligeras de madera.
- *Técnicas de aplicación del método de los elementos finitos en análisis de uniones metal-madera en estructuras de madera* (Fueyo J.G., Domínguez M. y Cabezas J.A., 2010, B). XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.
- *Influence of the slope in the apex zone stresses of Glulam pitched cambered beams* (Fueyo J.G., Rubio M.P., Cabezas J.A. y Domínguez M., 2011, A). 16th International Conference on Composite Structures.
- *Experimental tests to study the structural integrity of dowel type joints in timber structures* (Fueyo J.G., Domínguez M. y Cabezas J.A., 2012). 15th International Conference on Experimental Mechanics.
- *Influence over the stresses of the size and position of the punched metal plates structural timber joints* (Fueyo J.G., Domínguez M. y Cabezas J.A., 2013, A).
- *Stress redistributions provoked by the use of expansive systems in timber structures* (Fueyo J.G., Domínguez M. y Cabezas J.A., 2013 B). IRF'2013, Integrity, Reliability & Failure.
- *Empirical study of the mechanical behaviour of dowel-type joints with expansive kits in timber structures* (Fueyo J.G., Domínguez M. y Cabezas J.A., 2014). 16th International Conference on Experimental Mechanics.

Los contenidos de las publicaciones y los congresos asociados a la anterior relación se facilitan en el Anexo F.

7.6 Líneas de trabajo a futuro

El endurecimiento producido por el aplastamiento de las fibras de madera próximas al agujero de la clavija, debido a la aplicación de sistemas de expansión tubulares, aumenta la densidad de la madera (Oudjene & Khelifa, 2009, B), siendo un factor que podría aplicarse a mejorar de manera sensible el rendimiento de este tipo de uniones. El estudio de estos novedosos sistemas de refuerzo mediante elementos finitos obligaría a mejorar los modelos, en especial en lo referente al comportamiento mecánico de la madera, utilizando aproximaciones a éste más allá del típico al comportamiento ortotrópico incluido en la mayoría de los programas comerciales. Dichos modelos no recogen las asimetrías que se dan en el comportamiento de la madera: si la madera trabaja a compresión en la dirección de la fibra, presenta un comportamiento elasto-plástico; mientras que si lo hace a tracción, hay una tendencia a comportamiento elástico hasta que se produce el fallo por rotura frágil (como se vio en el Capítulo 2), apreciación observada por varios autores (Guan & Zhu, 2009), (Awaludin et al., 2007). Por su parte, en el comportamiento de la madera en dirección perpendicular a la fibra, aparecen fenómenos de aplastamiento en compresión, y de separación de fibras en tracción, lo que también provoca un comportamiento asimétrico en esta otra dirección. El desarrollo de estos modelos en el programa comercial con Abaqus®, mediante el empleo de subrutinas programadas en FORTRAN®, es uno de los campos de desarrollo que vemos más interesante en el futuro con vista a obtener simulaciones más ajustadas a los ensayos reales.

Incrementar el número de ensayos realizados hasta la fecha permitiría estudiar un espectro de variables más amplio, y aumentar el tamaño de las muestras permitiría obtener distribuciones estadísticas con mayor número de probetas y, por lo tanto, una mayor certeza en los resultados.

Sería interesante profundizar en las razones por las que las normativas (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010) y (DB SE M, 2009) tratan en los estados límite de servicio el deslizamiento de la unión y, sin embargo, no marcan restricciones

de rigidez para esta variable. De forma análoga, no parece acertado que las normativas de ensayos se separen del anterior criterio, fijando un deslizamiento constante de 15 mm (UNE-EN 26891, 1992), independientemente del tamaño del nudo.

Las ecuaciones analíticas buscan determinar únicamente la capacidad de carga de la unión, según se vio en el Apartado 3.9; sería aconsejable lograr una definición de diámetros de clavija de forma explícita y completar estas ecuaciones con otras que incluyan criterios de dimensionado a rigidez.

RELACIÓN DE ANEXOS**

ANEXO A: Hoja de trabajo para cálculo de uniones con clavija con Mathcad®

ANEXO B: Modelización con MEF

ANEXO C: Libros de cálculo analítico y parámetros para la ejecución y control en los ensayos

ANEXO D: Informes de ensayos experimentales

ANEXO E: Aplicación de gestión para control documental y ensayos

ANEXO F: Actividades de doctorado asociadas a publicaciones y congresos

ANEXO G: Libros de cálculo para la relación de carga-deformación y validación de resultados

**Los anexos aquí relacionados se facilitan en soporte digital, a través del CD adjunto a la memoria, debido al volumen de información o las características de los archivos destinados a ser ejecutados por aplicaciones específicas.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Elementos primarios en la madera.	11
Tabla 2-2. Relación entre coeficientes de Poisson.....	19
Tabla 2-3. Aproximación de las constantes elásticas para madera aserrada,.....	20
Tabla 2-4. Relación entre constantes elásticas.	20
Tabla 2-5. Relaciones aproximadas entre los módulos elásticos de madera de coníferas (Argüelles et al., 2003)...	20
Tabla 2-6. Valores aproximados de los coeficientes de Poisson (ν) en madera de coníferas (Argüelles et al., 2003).	20
Tabla 2-7. Correlación entre criterios para ejes, tensiones y deformaciones.....	20
Tabla 2-8. Correlación entre distintas especies [según (DB SE M, 2009) Tabla C.3]......	24
Tabla 2-9. Asignación de clase resistente para diferentes especies arbóreas y procedencias, según normas de clasificación [según (DB SE M, 2009) Tabla C.1]......	25
Tabla 2-10. Madera aserrada. Especies de coníferas y chopo. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente, [según (DB SE M, 2009) Tabla E.1]. Nota: Semejante a (UNE-EN 338, 2010) (con ligeras modificaciones frente a la primera cita y la presente tabla).....	26
Tabla 2-11. Especies frondosas. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente [según (DB SE M, 2009) Tabla E.2]. Nota: Semejante a (UNE-EN 338, 2010) (con ligeras modificaciones frente a la primera cita y la presente tabla).....	27
Tabla 2-12. Madera laminada encolada homogénea. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente [según (DB SE M, 2009) Tabla E.3] y (UNE-EN 1194, 1999).	28
Tabla 2-13. Madera laminada encolada combinada. Valores de las propiedades asociadas a cada clase resistente [según (DB SE M, 2009) Tabla E.4] y (UNE-EN 1194, 1999).	28
Tabla 2-14. Relación de normas.....	47
Tabla 2-15. Resistencia al aplastamiento de la madera para distintos tipos de clavijas (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).	61
Tabla 2-16. Coeficientes parciales de seguridad del material γ_m [según (DB SE M, 2009) Tabla 2.3]......	62
Tabla 2-17. Valores del factor de modificación k_{mod} [según (DB SE M, 2009) Tabla 2.4].	62
Tabla 2-18. Momento plástico para distintos tipos de uniones.....	64
Tabla 2-19. Uniones con pernos. Separaciones y distancias mínimas [según (DB SE M, 2009) Tabla 8.4].	68
Tabla 2-20. Separaciones en uniones con clavos [según norma (DB SE M, 2009) Tabla 8.2].	68
Tabla 2-21. Resistencia al fuego de uniones no protegidas con piezas laterales de madera [según (DB SI, 2010) Tabla E.5].	69
Tabla 2-22. Valores del factor de deformación (k_{def}) para madera [según (DB SE M, 2009) Tabla 7.1]	73
Tabla 2-23. Valores del módulo de deslizamiento (K_{ser}) para elementos de fijación de tipo clavija, en N/mm [según (DB SE M, 2009) Tabla 7.2]......	74
Tabla 3-1. Madera laminada encolada homogénea GL24h. Valores de las propiedades asociadas a esta clase resistente [según (DB SE M, 2009) Tabla E.3] y (UNE-EN 1194, 1999).....	91
Tabla 3-2. Madera laminada encolada homogénea GL24h. Módulos elásticos y coeficientes de Poisson.	91
Tabla 3-3. Correspondencias conocidas entre clases resistentes de madera laminada encolada y de madera aserrada [según (DB SE M, 2009) Tabla D.2]......	92
Tabla 3-4. Dimensiones comerciales disponibles según composición dúo o trío, madera maciza encolada.	94
Tabla 3-5. Madera aserrada. Valores de las propiedades asociadas a la clase resistente C24 [(DB SE M, 2009) Tabla E.1].	94
Tabla 3-6. Propiedades de la madera encolada calculadas a partir de las propiedades de láminas fabricadas con madera de coníferas de clase resistente C24 [(DB SE M, 2009) Tabla D.1].	95
Tabla 3-7. Madera aserrada. Valores de las propiedades asociadas a la clase resistente S10 (DIN 4074-1).....	95
Tabla 3-8. Hinchamiento y contracción para la madera C24 y equivalentes.	96

Tabla 3-9. Parámetros de la madera C24 y equivalentes.....	96
Tabla 3-10. Protección mínima frente a la corrosión (relativa a la norma ISO 2081), o tipo de acero necesario [según (DB SE M, 2009), Tabla 3.2].....	96
Tabla 3-11. Características mecánicas de los aceros de clavijas, tuercas y arandelas (DB SE A, 2009).	97
Tabla 3-12. Características mecánicas y físicas de varillas roscadas DIN 975.	97
Tabla 3-13. Paso y peso de varillas roscadas DIN 975.....	98
Tabla 3-14. Resultados de verificación de geometría de varillas roscadas, DIN 975.	98
Tabla 3-15. Características mecánicas mínimas de los aceros según (UNE-EN 10025-2, 2006) y su transcripción (DB SE A, 2009).....	99
Tabla 3-16. Características mecánicas mínimas de los aceros según (UNE-EN 10025-2, 2006) y su transcripción a la Instrucción de Acero Estructural EAE (Art. 27. Tipos de acero).	99
Tabla 3-17. Resiliencia (J), según el espesor nominal de producto t (mm) según (UNE-EN 10025-2, 2006) transcripción a Instrucción de Acero Estructural EAE (Art. 27. Tipos de acero).	99
Tabla 3-18 Aceros F111. Composición química según suministrador.....	100
Tabla 3-19. Aceros no aleados de construcción. Composición química según (UNE-EN 10025-2, 2006) transcripción a Instrucción de Acero Estructural EAE.....	100
Tabla 3-20. Aceros de construcción no aleados para temple y revenido UNE 36 011, según EN 10 083 DIN 17 200/210.	101
Tabla 3-21. Valores característicos de las clavijas.....	102
Tabla 3-22. Valores de dureza con ensayos de durómetro.....	104
Tabla 3-23. Tipos y propiedades de resistencia de los adhesivos de origen natural. Usos característicos (Wood Handbook, USDA. Forest Service, 1999).	107
Tabla 3-24. Adhesivos en madera para uso estructural y adecuación a las clases de servicio [(DB SE M, 2009) Tabla 4.1].	113
Tabla 3-25. Tipos de adhesivos para uso en distintas condiciones climáticas (UNE-EN 301, 2007).	113
Tabla 3-26. Distancias mínimas entre barras sometidas a carga axial.	118
Tabla 3-27. Distancias mínimas entre barras encoladas con carga de corte y dirección paralela a la fibra.	121
Tabla 3-28. Características generales de epoxi Hilti HIT-RE 500.	125
Tabla 3-29. Resistencia a la extracción de aceros pegados a madera con epoxi Hilti HIT-RE 500 (HILTI Co., 2001).	125
Tabla 3-30. Medidas de los conectores tipo C1.	128
Tabla 3-31. Propiedades del nylon 66.	135
Tabla 3-32. Valores característicos de las acciones consideradas sobre la estructura.	146
Tabla 3-33. Clases de duración de las acciones [(DB SE M, 2009) Tabla 2.2].	147
Tabla 3-34. Tiempo de duración en función del tipo de acción.	148
Tabla 3-35. Carga axil sobre uniones madera-madera (para plano de carga intermedio).....	150
Tabla 4-1. Datos de partida para el modelo de cálculo analítico de la unión.	153
Tabla 4-2. Relación de coordenadas en el nodo.	166
Tabla 4-3. Valores geométricos iniciales asignados a cada pieza o parte que compondrá la unión.....	174
Tabla 4-4. Relación de tipo y número de elementos y número de nodos para las distintas instancias.	189
Tabla 5-1. Relación de especie y resistencia, extracto de norma (UNE-EN 1912, 2012).	201
Tabla 5-2. Dimensiones de las probetas de madera estructural o de madera laminada encolada (UNE-EN 408, 2004).	202
Tabla 5-3. Ensayos de aplastamiento. Geometrías de probeta en función del diámetro del perno (UNE-EN 383, 2007).	211
Tabla 5-4. Cotas de las probetas (en mm).....	216
Tabla 5-5. Relación de probetas en ensayo.	221
Tabla 5-6. Valores calculados en el ensayo según la norma (UNE-EN 26891, 1992).	227

Tabla 5-7. Parámetros generales de la máquina MTS Insight 200.	230
Tabla 5-8. Precisión de la máquina MTS Insight 200 y características de sistema electromecánico de ensayo.	230
Tabla 5-9. Parámetros de ensayo descritos en el <i>software</i> Test Works 4.0.	231
Tabla 5-10. Herraje de acoplamiento, acero F-114. Composición química.	233
Tabla 5-11. Herraje de acoplamiento, acero F-114. Tratamientos térmicos.	233
Tabla 5-12. Herraje de acoplamiento, acero F-114. Equivalencias con normas.	233
Tabla 5-13. Herraje de acoplamiento, acero F-114. Propiedades mecánicas.	233
Tabla 5-14. Modos de fallo en las uniones entre acero y madera y placas de acero de gruesas.	234
Tabla 5-15. Separaciones en uniones con clavos para madera. Según [(DB SE M, 2009) Tabla 8.2].	234
Tabla 5-16. Parámetros generales de la máquina Codein 30 t.	236
Tabla 6-1. Datos de partida para modelo de cálculo analítico de la unión.	248
Tabla 6-2. Relación entre el modo de fallo analítico y el código de color.	250
Tabla 6-3. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de t_1 y d.	251
Tabla 6-4. Variaciones porcentuales de las variables geométricas de la clavija frente a la capacidad de carga referidas a los modelos base.	252
Tabla 6-5. Variaciones porcentuales de espesor t_1 frente a la capacidad de carga referidas a los modelos base. ...	253
Tabla 6-6. Modo de fallo analítico y capacidad de carga (en N) de la unión para variaciones de t_2 y d.	253
Tabla 6-7. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de α y d.	254
Tabla 6-8. Variaciones porcentuales de la capacidad de carga referidas a los modelos base frente a variaciones de α	256
Tabla 6-9. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de t_1 y t_2	256
Tabla 6-10. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de ρ_k y d.	258
Tabla 6-11. Mejora en la capacidad de carga relativa ante variaciones de densidad para distintos diámetros y en promedio.	260
Tabla 6-12. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de β y d.	260
Tabla 6-13. Variaciones en la relación de densidades frente a la capacidad de carga (referidas al modelo base). ..	262
Tabla 6-14. Modo de fallo analítico y capacidad de carga de la unión (en N) para variaciones de $f_{u,k}$ y d.	262
Tabla 6-15. Mejora en la capacidad de carga relativa ante variaciones de $f_{u,k}$ para distintos diámetros y en promedio.	264
Tabla 6-16. Rendimiento de la unión.	265
Tabla 6-17. Variaciones de carga y desviación típica por muestra.	296
Tabla 6-18. Datos de partida para modelo de cálculo analítico de la unión.	305
Tabla 6-19. Valores de carga y deslizamiento ante variaciones de espesor t_1 (1 % de desviación de la pendiente).	307
Tabla 6-20. Valores de carga y deslizamiento ante variaciones de diámetro (d).	309
Tabla 6-21. Comparación de pendientes de deslizamiento: K_{ser} , k_s y k'_s	328
Tabla 6-22. Resultados de iteración al cálculo del momento plástico por la ecuación de Blass.	343
Tabla 6-23. Evolución del estado de cargas para distintos deslizamientos.	344
Tabla 6-24. Coeficientes de fricción en acero [(Shighey et al., 2008) Tabla 8.5].	358
Tabla 6-25. Variables para cálculo del pretensado (Muestra M03).	359
Tabla 6-26. Resultados para pretensado.	359
Tabla 6-27. Fricción de madera con distintos materiales [(Gorst & Williamson, 2003) Tabla 11].	369

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Sistemas estructurales con madera	1
Figura 1-2. Nudos de unión con clavijas en estructuras de madera (Argüelles, 2010).	2
Figura 1-3. Disposiciones de uniones con clavija para su estudio.....	3
Figura 2-1. Ejes principales de crecimiento de la madera en un tronco (Argüelles, 2010).....	11
Figura 2-2. Corte anatómico en la madera y diferentes densidades de las fibras en función	12
Figura 2-3. Diferencias de alineación en las fibras para las dos direcciones transversales.	12
Figura 2-4. Resistencia relativa a la compresión en cada una de las tres direcciones de ortotropía.....	13
Figura 2-5. Posición relativa de las direcciones transversales de la madera con respecto a la sección.	13
Figura 2-6. Tipos de corte para el aprovechamiento en escuadrías de madera.	14
Figura 2-7. Hinchazón y merma relativa en la madera (en %).	14
Figura 2-8. Diagrama para la elección del producto más adecuado (Queipo et al., 2010).	15
Figura 2-9. Diagrama tensión-deformación para madera general y para el pino silvestre en particular, en dirección paralela a la fibra en madera libre de defectos.	16
Figura 2-10. Viga curva sometida a tensiones de tracción perpendicularmente a la fibra.....	16
Figura 2-11. Tensión-deformación bajo esfuerzo de compresión perpendicular	17
Figura 2-12. Tensiones de compresión	17
Figura 2-13. Modos de fallo por cortante (Argüelles et al., 2003).	17
Figura 2-14. Modos de fallo por cortante en viga sometida a flexión (Argüelles et al., 2003).	17
Figura 2-15. Ejes y dirección de la fibra en la pieza.	21
Figura 2-16. Tensiones de cortadura. A) Corte paralelo. B) Rodadura.	21
Figura 2-17. Nudo vivo y nudo muerto.	29
Figura 2-18. Fendas.	30
Figura 2-19. Desviación de la fibra	30
Figura 2-20. Bolsa de resina.	30
Figura 2-21. Acebolladuras.	30
Figura 2-22. Ancho de anillos de crecimiento.....	31
Figura 2-23. Defectos de la madera. Gemas.	31
Figura 2-24. Curvaturas de cara y canto.	31
Figura 2-25. Abarquillado.....	31
Figura 2-26. Alabeo.	32
Figura 2-27. Aspectos de distintos tipos de putrefacción.	32
Figura 2-28. Muérdago parasitario.	33
Figura 2-29. Daños en la madera por efecto de xilófagos.....	33
Figura 2-30. Influencia de la duración de la carga. Curva de Madison.	34
Figura 2-31. Esquema de distintos tipos de uniones.	36
Figura 2-32. Empalmes, ensambles y acoplamientos.	36
Figura 2-33. Algunas uniones tradicionales.	37
Figura 2-34. Uniones tradicionales, mecánicas y encoladas.	37
Figura 2-35. Tipos de clavos.	38
Figura 2-36. Tirafondos y distintos tipos de cabeza.....	38
Figura 2-37. Sistemas autoperforantes	38
Figura 2-38. Pernos.	39
Figura 2-39. Pasadores.....	39
Figura 2-40. Grapas.	39
Figura 2-41. Distribución tensional en uniones con clavija según la teoría del rendimiento (Johansen, 1949).	40

Figura 2-42. Detalle de distribución tensional en uniones con clavija (Johansen, 1949).....	41
Figura 2-43. Evolución de la producción científica sobre madera estructural en España desde 1990 (Herrero, 2007).	45
Figura 2-44. Simplificación de la curva carga-desplazamiento de aplastamiento.	49
Figura 2-45. Composiciones y montajes habituales en uniones tipo clavija en cortadura simple.....	50
Figura 2-46. Composiciones y montajes habituales en uniones tipo clavija en cortadura doble.	50
Figura 2-47. Modos de fallo en cortadura simple.	51
Figura 2-48. Modos de fallo en cortadura doble.....	59
Figura 2-49. Modos de fallo en cortadura simple con chapa madera.	60
Figura 2-50. Modos de fallo en cortadura doble con madera y chapa central.	60
Figura 2-51. Modos de fallo con madera y chapas delgadas laterales.	60
Figura 2-52. Modos de fallo con madera y chapas gruesas laterales.	60
Figura 2-53. Situación de las cargas aplicadas en ensayos de clavos.....	63
Figura 2-54. Ensayos de flexión sobre pernos.....	63
Figura 2-55. Efecto hienda.	66
Figura 2-56. Separaciones, distancias y ángulo α	68
Figura 2-57. Composiciones de protección frente a fuego en uniones con clavijas.	69
Figura 2-58. Simulación numérica de resistencia a fuego en unión con clavija (Erchinger, 2010).	70
Figura 2-59. Ensayo de resistencia al fuego en unión con clavija (Palma, 2013).	70
Figura 2-60. Evolución de la deformación frente al tiempo (Argüelles et al., 2003).....	72
Figura 2-61. Superposición de deformaciones frente al tiempo (Argüelles et al., 2003).....	73
Figura 2-62. Evolución del deslizamiento debido a la carga para distintos sistemas de unión (Argüelles et al., 2003).	75
Figura 3-1. Disposición en cortadura simple (izda.) y doble (dcha.).....	78
Figura 3-2. Unión con elementos tuerca-arandela y aplastamiento en el contacto madera-arandela (Jesse, 2006). 79	79
Figura 3-3. Incremento de fricción por moleteado de la clavija (Sjödin, et al., 2008).	80
Figura 3-4. Unión con adhesivo (Proyecto LICONS, 2003).	80
Figura 3-5. Ejemplo de placa-clavo.	81
Figura 3-6. Conector dentado (izda.) y composición en unión con clavija en cortadura doble (dcha.).....	81
Figura 3-7. Unión con perno y conectores de disco DVW.....	82
Figura 3-8. Efectos de densificación de la madera (Rodd & Leijten, 2003).....	82
Figura 3-9. Unión mediante tubo de acero hueco.	83
Figura 3-10. Principio de inyección de resina (Rodd & Leijten, 2003).	84
Figura 3-11. Ejemplo de etiqueta de conformidad del producto.....	86
Figura 3-12. Control de la documentación de origen (Labèrnia, 2010).	86
Figura 3-13. Control documental relacionado con el marcado CE en madera estructural para edificación (Confermadera, 2005).....	87
Figura 3-14. Reparación de defecto estructural por nudos en madera laminada estructural.....	88
Figura 3-15. Composición de la madera laminada homogénea encolada (Arriaga et al., 2010).	89
Figura 3-16. Certificados de conformidad: madera laminada homogénea encolada.....	90
Figura 3-17. Etiqueta de conformidad: madera laminada homogénea encolada.	90
Figura 3-18. Composición de la madera maciza encolada.	92
Figura 3-19. Certificados de conformidad: madera maciza encolada.....	93
Figura 3-20. Etiqueta de conformidad para madera maciza encolada.	93
Figura 3-21. Perfil y relaciones de geometría de varillas roscadas.	98
Figura 3-22. Verificación de perfiles con proyector para las varillas roscadas.	98
Figura 3-23. Probetas de ensayo a tracción de las clavijas (Acero F111).....	101

Figura 3-24. Ensayos de tracción simple en barras de diámetro $d = 10$ mm. Comparativa entre clavijas de varilla roscada 5.6, normalizada S275 y calibrada de tipo F111.	102
Figura 3-25. Caracterización de acero de clavijas con microdurómetro, según ensayo ISO 6506:2005.	103
Figura 3-26. Probetas de clavija expuestas a ensayos con durómetro.	103
Figura 3-27. Estructura cristalográfica. Probeta tratada con alcohol y Nital (ácido nítrico) al 5 %.....	105
Figura 3-28. Uniones en madera con distintos tipos de adhesivos (Otero, 2009).	114
Figura 3-29. Barras encoladas como armadura frente a la tracción perpendicular.	115
Figura 3-30. Barras de refuerzo en nudo rígido de esquina (Proyecto LICONS, 2003).	115
Figura 3-31. Barras de refuerzo en apoyos de vigas de madera.	116
Figura 3-32. Empotramiento y nudo rígido de esquina con barras encoladas inclinadas (Argüelles, 2010).	116
Figura 3-33. Distancias mínimas entre barras sometidas a carga axial, dispuestas paralela o perpendicularmente a la fibra.	118
Figura 3-34. Capacidad de carga del adhesivo en función de la longitud del encolado en la clavija (Otero, 2009).	119
Figura 3-35. Varilla roscada M12 con adhesivo y fallo por desgarro en la madera (HILTI Co., 2001).	120
Figura 3-36. Ejemplos de barras encoladas con carga lateral y disposición perpendicular a la fibra.	120
Figura 3-37. Consideraciones de diseño para la integración de adhesivo en la unión con clavija.	123
Figura 3-38. Modos de fallo de la unión con adhesivo. Cortante, hendidura y tracción (Otero, 2009).	124
Figura 3-39. Ensayos de extracción en clavijas roscadas pegadas a madera con epoxi Hilti HIT-RE 500 (HILTI Co., 2001).	125
Figura 3-40. Kit de aplicación y elementos metálicos compatibles con epoxi HILTI HIT RE 500 (ETA-04/0027, 2013).	126
Figura 3-41. Secuencia de preparación de epoxi bicomponente.	126
Figura 3-42. Secuencia de preparación del agujero para clavija.	127
Figura 3-43. Empleo de conectores de anillo en unión clavija (DB SE M, 2009).	127
Figura 3-44. Conector de placa dentada tipo C1 (UNE-EN 912, 2011).	128
Figura 3-45. Conector de placa dentada, casa Domax, modelo PZD1, 50x17 mm.	129
Figura 3-46. Pernos de expansión de camisa tipo cono para hormigón.	130
Figura 3-47. Perno de expansión para mobiliario auxiliar.	131
Figura 3-48. Secuencia de expansión por cono bajo camisa metálica.	131
Figura 3-49. Variantes de sistemas de expansión.	132
Figura 3-50. Camisa de expansión abierta HILTI HT APC Wurth WUS para carpintería.	132
Figura 3-51. Sistema de expansión por golpeo con cuña externa.	133
Figura 3-52. Sistema de expansión por golpeo con cuña interna Hilti APC HR.	133
Figura 3-53. Tacos con expansión por sistema de roscado reducido.	134
Figura 3-54. Integración de tacos con expansión por sistema de roscado en varilla roscada.	134
Figura 3-55. Montaje del elemento clavija en pieza de madera.	134
Figura 3-56. Sistema de expansión de poliamida para clavijas de tipo Fischer FUR y Spit Prolong.	135
Figura 3-57. Integración de clavija Fischer FUR en sistemas mixtos madera-fábrica.	135
Figura 3-58. Sistema de expansión por excavado Hilti HDAD.	136
Figura 3-59. Roblones y estructura metálica con clavijas roblonadas.	136
Figura 3-60. Sistemas de remachado.	137
Figura 3-61. Sistema de expansión para huecos y cargas ligeras y variantes de uso.	137
Figura 3-62. Útiles de anclaje para expansión en huecos con cargas ligeras.	137
Figura 3-63. Anclajes por expansión en cuña Hilti DBZ y FDN.	138
Figura 3-64. Sistema de expansión de clavija de tipo tubo hueco (Rodd & Leijten, 2003).	138
Figura 3-65. Expansión de tubo metálico por bola.	139
Figura 3-66. Relleno del tubo expansionado con la clavija maciza.	139

Figura 3-67. Prensa empleada en el proceso de expansión.....	140
Figura 3-68. Sistema de embutición.....	140
Figura 3-69. Vista exterior de las dársenas de Alar del Rey (Palencia).	141
Figura 3-70. Vista de las naves antes y después de los trabajos de rehabilitación de 2003. Composición de cerchas.	142
Figura 3-71. Diseño de cercha española.	142
Figura 3-72. Apoyos de pilares.....	143
Figura 3-73. Unión tradicional en Rayo de Júpiter.....	143
Figura 3-74. Daños en uniones de la estructura primaria afectadas por pudrición: A) Recorte de par con unión rayo de Júpiter, B) Viga de tirante.....	143
Figura 3-75. Encuentros de pendolón con tirantes.....	144
Figura 3-76. Detalles en uniones tipo clavija. Encuentro de tornapuntas, tirante y pendolón.	144
Figura 3-77. Composición de columnas con cerchas.	144
Figura 3-78. Uniones con distintas orientaciones de fibras entre madera.	145
Figura 3-79. Edificación tras la rehabilitación de 2008 y detalles de las correas de madera laminada.....	145
Figura 3-80. Dársenas de picos de Alar del Rey. Planta de una de las naves adosadas (Sanz, 2008).	147
Figura 3-81. Dársenas de picos de Alar del Rey. Secciones de planos de alzados (Sanz, 2008).....	147
Figura 3-82. Modelo en tres dimensiones de la estructura. Definición de escuadrías.....	148
Figura 3-83. Solicitaciones de algunos de los nudos.....	149
Figura 4-1. Dimensiones y geometría de las uniones.....	152
Figura 4-2. Hoja de trabajo de Mathcad®, con la implementación de las ecuaciones para el cálculo de uniones tipo clavija.	159
Figura 4-3. Capacidad de carga para la unión en los cuatro modos de fallo ante variación de diámetro de clavija.	160
Figura 4-4. Vinculación de las hojas de cálculo con otras tablas.	161
Figura 4-5. Sistema continuo de laja plana sometida a carga uniforme discretizada por elementos finitos.	162
Figura 4-6. Elemento triangular de Turner.....	165
Figura 4-7. Modelo discreto.....	165
Figura 4-8. Sistema modernizado con elementos triangulares.....	165
Figura 4-9. Extracto del flujograma de MEF con Matlab®, con elementos triangulares.....	169
Figura 4-10. Salida de resultados de Matlab®.....	171
Figura 4-11. Ventana principal de Abaqus/CAE.	173
Figura 4-12. Piezas definidas para la construcción de la unión con clavija.....	175
Figura 4-13. Definición de materiales.	176
Figura 4-14. Sistemas de referencia y direcciones para caracterizar la ortotropía en las piezas de madera.	177
Figura 4-15. Modelo de comportamiento de material para acero y madera simplificado a una dirección.	177
Figura 4-16. Conjunto de instancias ensambladas.....	178
Figura 4-17. Partes de las instancias ensambladas para la modelización.....	179
Figura 4-18. Planos para la partición de la unión orientados a simplificar el tratamiento del modelo MEF.....	179
Figura 4-19. Sets para hacer referencia a instancias.....	180
Figura 4-20. Sets para objetos de referencia.	180
Figura 4-21. Sets para extracción de información de elementos finitos.....	180
Figura 4-22. Configuración de un paso.	182
Figura 4-23. Condiciones de deslizamiento añadidas en el PASO 1.....	182
Figura 4-24. Contacto entre las superficies maestra y esclava (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013).	183
Figura 4-25. Interacción entre superficies madera-clavija.....	184
Figura 4-26. Interacción entre superficies.	184
Figura 4-27. Interacción y restricciones entre superficies: madera-clavija.....	184

Figura 4-28. Zonas de aplicación de las condiciones de contorno.....	185
Figura 4-29. Problema simplificado aplicando la doble simetría.....	186
Figura 4-30. Proceso de siembra de nodos, mallado y detalles.....	187
Figura 4-31. Elementos finitos según el orden de su función de forma (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013) ..	188
Figura 4-32. Elementos finitos según el tipo de integración (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013).....	188
Figura 4-33. Comportamiento en flexión de elementos lineales y cuadráticos (Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013).....	189
Figura 4-34. Opciones de visualización.....	190
Figura 4-35. Sentencias de código en Python®.....	191
Figura 4-36. Carga y descarga en una dirección (i) para la superficie de plastificación.....	192
Figura 4-37. Carga y descarga en una sección perpendicular a la dirección de σ_3	193
Figura 4-38. Endurecimiento isotrópico a) y cinemático b).....	194
Figura 4-39. Representación del proceso de carga con el algoritmo de retorno.....	196
Figura 4-40. Diagrama de flujo para la subrutina para modelizar el comportamietno mecánico de la madera.	197
Figura 5-1. Disposición de elementos: A) madera aserrada, B) laminada encolada y C) fundamento del ensayo... 203	
Figura 5-2. Curva de carga-deformación en compresión.....	204
Figura 5-3. Composición de ensayo a esfuerzo cortante en dirección paralela a la fibra.....	205
Figura 5-4. Relación entre resistencia y duración de la carga. Curva de Madison frente a la adoptada en el (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010).....	207
Figura 5-5. Ensayo sobre máquina en flexión.....	208
Figura 5-6. Análisis de 5º percentil sobre densidad de probetas.....	209
Figura 5-7. Determinación del coeficiente k_s (UNE-EN 384, 2004).....	209
Figura 5-8. Dispositivo de ensayo para el cálculo de resistencia a aplastamiento por clavija en la madera.	210
Figura 5-9. Ensayo en tracción sobre clavija moleteada (Sjödin et al., 2008).....	210
Figura 5-10. Ensayos de aplastamiento: A) paralelo a la fibra, por compresión; B) paralelo a la fibra, por tracción; C) perpendicular a la fibra, por compresión, según (UNE-EN 383, 2007).....	211
Figura 5-11. Disposiciones para ensayo de aplastamiento por clavija en madera.	212
Figura 5-12. Ensayo de tracción sobre unión con clavija en cortadura simple (Rosowskya & Bulleitb, 2002).....	212
Figura 5-13. Ensayo en tracción para fallo por doble cortante (Guan & Rodd, 2001).....	213
Figura 5-14. Probetas de ensayo en compresión ante fallo por cortadura doble.	213
Figura 5-15. Distribución de las tensiones de compresión en la madera central, en la sección justo debajo del perno, y en la madera lateral en la sección justo encima del perno (Fueyo et al., 2009, B).....	215
Figura 5-16. Dimensiones y geometría del tipo de unión seleccionado para el estudio.	216
Figura 5-17. Extractos de planos descompuestos con dimensiones (en mm) de las piezas de madera ensayadas. 216	
Figura 5-18. Probetas con pieza central orientada a 45º y 90º.....	217
Figura 5-19. Sección transversal de probetas ensayadas en cortadura doble.....	217
Figura 5-20. Fabricación de probetas para ensayo y muestra de las distintas series.	218
Figura 5-21. Evolución de los modos de fallo ($F_{v,Rk}$), como función de las variables geométricas.....	219
Figura 5-22. Notación descriptora compacta de probetas y muestras.....	220
Figura 5-23. Cámaras de acondicionamiento de humedad.	224
Figura 5-24. Control de humedad y verificación con xilohigrómetro Seltar HGD-1.....	224
Figura 5-25. Verificación de idoneidad del adhesivo y proceso de montaje.	225
Figura 5-26. Verificación de pretensado en probetas con tuerca-arandela.	225
Figura 5-27. Control de peso de probetas tras ensayo.	225
Figura 5-28. Procedimiento de carga (UNE-EN 26891, 1992).....	226
Figura 5-29. Máquina de ensayos MTS Insight 200.	229
Figura 5-30. Máquina de ensayos MTS Insight 200 durante la ejecución de un ensayo.	231

Figura 5-31. Planos de diseño de los herrajes.....	232
Figura 5-32. Extracto de planos de diseño y montaje de herrajes con probetas.....	232
Figura 5-33. Distancias entre los agujeros de varillas en los herrajes de acoplamiento y matriz resultante.	235
Figura 5-34. Máquina de ensayos Codein 30 para tracción y compresión.	235
Figura 5-35. Máquina de ensayos Codein. Detalles de célula de carga, balastro de apoyo, certificación y calibración.	236
Figura 5-36. Programa de gestión de parámetros de ensayo para la máquina Codein 30 t.	237
Figura 5-37. Curva teórica de carga-deslizamiento (UNE-EN 26891, 1992).....	237
Figura 5-38. Desarrollo del ensayo carga-deslizamiento en una unión tipo clavija con distintas fases de carga.	237
Figura 5-39. Detalle de un ciclo de descarga y carga.	239
Figura 5-40. Planos de fallo en la madera (Dorn et al., 2013).....	240
Figura 5-41. Programa de gestión para tratamiento de informes de ensayos.	242
Figura 5-42. Formulario de datos para muestras y detalle de ensayos.	244
Figura 5-43. Informe de salida de resultados de una probeta.	246
Figura 6-1. Capacidad de carga de la unión para variaciones de t_1 y d. Gráficos en 3D y de contorno.	251
Figura 6-2. Capacidad de carga de la unión para variaciones de d, fijando t_1 en 40 mm.	252
Figura 6-3. Capacidad de carga de la unión para variaciones de t_2 y d. Gráficos en 3D y de contorno.	253
Figura 6-4. Capacidad de carga de la unión para t_2 constante e igual a 160 mm cuando varía d.....	254
Figura 6-5. Capacidad de carga de la unión para variaciones de α y d. Gráficos en 3D y de contorno.	255
Figura 6-6. Capacidad de carga de la unión para variaciones de d con $\alpha = 90^\circ$	255
Figura 6-7. Capacidad de carga de la unión para variaciones de t_1 y t_2 . Gráficos en 3D y de contorno.....	257
Figura 6-8. Capacidad de carga de la unión para variaciones de t_1	257
Figura 6-9. Capacidad de carga de la unión para variaciones de ρ_k y d. Gráficos en 3D y de contorno.....	259
Figura 6-10. Capacidad de carga de la unión para variaciones de d, con D35 de $\rho_k=540 \text{ kg/m}^3$	259
Figura 6-11. Capacidad de carga de la unión para variaciones de β y d. Gráficos en 3D y de contorno.....	261
Figura 6-12. Capacidad de carga de la unión para variaciones de d, con $\beta=1,3$ constante.	261
Figura 6-13. Capacidad de carga de la unión para variaciones de f_u y d. Gráficos en 3D y de contorno.	263
Figura 6-14. Capacidad de carga de la unión para variaciones de d, con $f_{u,k}=800 \text{ kg/m}^3$	263
Figura 6-15. Capacidad de carga a la extracción según norma (Eurocódigo 5. UNE EN 1995, 2010)	267
Figura 6-16. Superposición de la capacidad de carga a la extracción sobre el modelo de unión tipo clavija.....	268
Figura 6-17. Capacidad de carga axil para completos de clavija.	269
Figura 6-18. Evolución en las deformaciones de la unión con escalas en la opción de <i>Auto-compute</i>	270
Figura 6-19. Deformación de la clavija en el modelo de elementos finitos inicial (MEF 1) y en la muestra de ensayo [M25].....	271
Figura 6-20. Evolución de la carga frente a deslizamiento y ajustes frente al comportamiento de plastificación para diferentes pendientes de la curva de modelización del comportamiento plástico.	271
Figura 6-21. Evolución de carga frente a deslizamiento del modelo de elementos finitos ajustado a los resultados de los ensayos.	273
Figura 6-22. Sección transversal del estado final de la unión en un estado de plastificación avanzada ($u = 60 \text{ mm}$).	274
Figura 6-23. Valores de desplazamiento combinado en la unión (U).	275
Figura 6-24. Detalle de movimientos de la unión en la dirección del eje "X".	275
Figura 6-25. Movimientos de la unión en la dirección del eje Y.	276
Figura 6-26. Tensión normal en la dirección del eje "X" [$S_{11} \text{ (N/mm}^2\text{)}$].....	277
Figura 6-27. Tensión normal en la dirección del eje "X" [$S_{11} \text{ (N/mm}^2\text{)}$] para la pieza central.	278
Figura 6-28. Tensiones normales en dirección de la fibra [$S_{11} \text{ (N/mm}^2\text{)}$] para un deslizamiento $u=60 \text{ mm}$	278
Figura 6-29. Tensiones normales perpendiculares a las fibras de madera [$S_{22} \text{ (N/mm}^2\text{)}$].....	279

Figura 6-30. Tensiones normales en dirección perpendicular a las fibras de madera [S22 (N/mm ²)] para la pieza central.	279
Figura 6-31. Tensiones normales en dirección radial [S33 (N/mm ²)] para la pieza central.	280
Figura 6-32. Tensiones cortantes para la pieza de madera central: S12, S13 y S23, en N/mm ²	281
Figura 6-33. Deformaciones plásticas longitudinales en la dirección de eje "X" para la madera (SDV7).	282
Figura 6-34. Deformaciones plásticas longitudinales en la dirección "Y" para la madera (SDV8).	283
Figura 6-35. Deformaciones plásticas longitudinales en la dirección "Z" para la madera (SDV9).	283
Figura 6-36. Deformaciones plásticas angulares en la madera (SDV10, SDV11 y SDV12).	284
Figura 6-37. Tensiones normales para la clavija en la dirección del eje "Y" con deslizamiento $u = 15$ mm, en N/mm ²	285
Figura 6-38. Tensiones normales en la dirección de eje "Y", [S22 (N/mm ²)].....	286
Figura 6-39. Tensiones normales en dirección del eje "X", [S11 (N/mm ²)].	287
Figura 6-40. Tensiones normales en la dirección de eje "Y", [S33 (N/mm ²)].....	287
Figura 6-41. Tensiones cortantes en la clavija [S12 (N/mm ²)].	288
Figura 6-42. Situación de las rótulas plásticas en la clavija en relación con la zona de cambio de signos en la tensión constante.	289
Figura 6-43. Tensión cortante en la clavija [S13 (N/mm ²)].	289
Figura 6-44. Tensiones de comparación de Von Mises para el acero de la clavija en N/mm ²	290
Figura 6-45. Deformaciones plásticas en la clavija, PE11, P22 y PE33.	291
Figura 6-46. Deformaciones plásticas transversales en la clavija, PE12, PE13 y PE23.	292
Figura 6-47. Particularidades del comportamiento de la unión ante la introducción de mejoras.	293
Figura 6-48. Ejemplo de ensayos agrupados en dos muestras.	294
Figura 6-49. Ejemplo de exclusión por irregularidad de la probeta P016 de la muestra [M01].	295
Figura 6-50. Ensayos de muestras [M06], [M24] y [M03].	297
Figura 6-51. Ensayos de las muestras [M31] y [M33].	298
Figura 6-52. Ensayos de las muestras [M54].	298
Figura 6-53. Carga en la unión frente a deslizamiento [u (mm)] para la probeta P083 [M23].	299
Figura 6-54. Carga en la unión frente a tiempo [t (s)] para probeta P083 [M38].	300
Figura 6-55. Detalle de velocidad de deslizamiento [v (mm/s)] frente al deslizamiento [u, (mm)]	300
Figura 6-56. Ángulos de la clavija y longitudes de aplastamiento en la probeta P83 [M23].	301
Figura 6-57. Evolución de la deformación en clavija P082 [M37].	301
Figura 6-58. Comparación de curvas de ensayo con clavijas lisas y roscadas de tipo M8 y M10.	302
Figura 6-59. Comparación de curvas de ensayo para los primeros 15 mm de deslizamiento.	304
Figura 6-60. Gráfica de carga frente a deslizamiento.	306
Figura 6-61. Ensayos con variaciones de espesor de la madera lateral (t_1).	306
Figura 6-62. Ensayos con variaciones de espesor de la madera lateral (t_1).	308
Figura 6-63. Sección transversal de probetas, con distintos espesores de madera lateral (t_1).	308
Figura 6-64. Ensayos con variaciones de diámetro de la clavija.	309
Figura 6-65. Capacidad de carga frente a variación de diámetro (d).	310
Figura 6-66. Ensayos con variaciones en la orientación de fibra (α).	311
Figura 6-67. Ensayos con variación del ángulo de la fibra (α).	312
Figura 6-68. Esfuerzos dominantes relacionados con la posición de las fibras de madera expuestas a plastificación ($\alpha = 90^\circ$).	313
Figura 6-69. Ensayos de tracción simple en barras de diámetro normalizado 10mm. Comparativa de varilla roscada comercial, normalizada S275 y calibrada de tipo F111.	314
Figura 6-70. Resistencia en la unión para distintos aceros de clavija roscada.	315
Figura 6-71. Resistencia en la unión para distintos aceros de clavija lisa.	315

Figura 6-72. Curvas carga deslizamiento para distintos tratamientos superficiales de la clavija.	316
Figura 6-73. Estado de deformación en clavijas roscadas sin refuerzos.	317
Figura 6-74. Estado de deformación en la clavijas de superficie lisa y moleteada sin refuerzos complementarios.	317
Figura 6-75. Estado de deformación en las clavijas roscadas y con refuerzo de adhesivo y tuerca-arandela respectivamente.	317
Figura 6-76. Capacidad de carga de la unión para probetas de madera laminada GL24h.	319
Figura 6-77. Capacidad de carga de la unión, probetas de madera aserrada QL24h.	320
Figura 6-78. Trabajo de la unión [W (J)] para probetas de madera laminada GL24h.	322
Figura 6-79. Trabajo de la unión [W (J)] para probetas de madera aserrada QL24h.	323
Figura 6-80. Comparación entre la curva carga-deslizamiento experimental y los deslizamientos instantáneo y final calculados según la normativa.	325
Figura 6-81. Cálculo de k_s a partir de la curva de ensayo.	326
Figura 6-82. Carga frente a deslizamiento en comparación en K_{ser} y k_s	327
Figura 6-83. Esquema de la unión incluyendo elementos de refuerzo.	330
Figura 6-84. Diagramas de cargas en la madera lateral y en la porción de clavija.	331
Figura 6-85. Distribución tensional en los modos de fallo 1 y 2, según la teoría del rendimiento (Johansen, 1949).	332
Figura 6-86. Diagramas de cuerpo libre de porciones de la unión.	333
Figura 6-87. Distribución tensional y de esfuerzos en el modo de fallo 4, según la teoría del rendimiento (Johansen, 1949).	334
Figura 6-88. Diagrama de cuerpo libre considerando la situación de doble rótula.	334
Figura 6-89. Evolución del ancho de aplastamiento y del ángulo de giro para distintos deslizamientos.	335
Figura 6-90. Diagrama de cuerpo libre considerando la situación de rótula en la pieza central.	336
Figura 6-91. Detalle de probeta P092 con el modo de fallo tres y rótula en la pieza central.	337
Figura 6-92. Evolución del índice de plasticidad.	342
Figura 6-93. Momento plástico frente a variaciones de diámetro.	342
Figura 6-94. Momento plástico frente a variaciones de ángulo en rótula de clavija.	343
Figura 6-95. Comparación de resultados analíticos y experimentales para las muestra [M25] y [M26].	345
Figura 6-96. Detalle del comportamiento de la unión en los primeros tramos de deslizamiento.	345
Figura 6-97. Detalle de evolución de deformación con correcciones de holgura.	347
Figura 6-98. Corrección en la resistencia del momento plástico de la clavija.	348
Figura 6-99. Detalle de la evolución de deformación con correcciones de holgura y momento plástico.	348
Figura 6-100. Diagrama de flujo para el cálculo de la relación de carga frente a deslizamiento.	349
Figura 6-101. Distribución de componentes por esfuerzo axil.	351
Figura 6-102. Diagramas de cargas en la unión con fuerzas axiles en la clavija.	352
Figura 6-103. Carga axil frente a la evolución de ángulo de rótula.	352
Figura 6-104. Flujograma principal para la determinación de cargas axiles en la clavija en función del deslizamiento.	353
Figura 6-105. Comportamiento de pretensado en clavija y empaquetadura.	356
Figura 6-106. Detalle de estado final en extremos de clavija fijados con tuerca-arandera.	357
Figura 6-107. Geometría de la arandela.	359
Figura 6-108. Fuerza axil con fijación en extremo de clavija y pretensado con tuerca y arandela.	360
Figura 6-109. Ensayo de resistencia al par torsor.	361
Figura 6-110. Evolución de la plastificación en la madera por el momento torsor en la empaquetadura con la clavija.	361
Figura 6-111. Evolución de la plastificación en la madera debida a la carga de apriete en la empaquetadura con la clavija.	362

Figura 6-112. Desplazamiento de las fijaciones en extremos de clavija.	363
Figura 6-113. Relación entre deslizamiento de la unión y de la empaquetadura.....	364
Figura 6-114. Comparación de resultados analíticos y experimentales para la muestra [M03] con fijación de tuerca y arandela.	365
Figura 6-115. Capacidad de carga frente a deslizamiento en probetas con adhesivo [M24].	366
Figura 6-116. Comparación de resultados analíticos y experimentales para la muestra [M07] con adhesivo.....	367
Figura 6-117. Evolución de la incrustación de fibras en las irregularidades de la clavija.....	370
Figura 6-118. Fases de la incrustación de fibras de madera frente al roscado continuo de la clavija.	371
Figura 6-119. Simplificaciones al comportamiento de incrustación.	371
Figura 6-120. Sistema de cálculo de capacidad de carga del elemento complementario.	375
Figura 6-121. Revisión de coeficiente de fricción.	376
Figura 6-122. Contribución por fricción en intercaras de madera.	376
Figura 6-123. Evolución de ensayos con conectores.	377
Figura 6-124. Comparación de resultados analíticos y experimentales para muestras de probetas sin y con conectores.....	379
Figura 6-125. Comparación de resultados analíticos y experimentales.....	380
Figura 6-126. Flujograma de integración de los distintos métodos de investigación.....	380
Figura 6-127. Validación de resultados. Comparación del modelo analítico frente a los resultados de los ensayos (1).	383
Figura 6-128. Validación de resultados. Comparación del modelo analítico frente a los resultados de los ensayos (2).	383
Figura 6-129. Validación de resultados. Comparación del modelo analítico frente a los resultados de los ensayos (3).	383
Figura 6-130. Validación de resultados. Comparación del modelo analítico frente a los resultados de los ensayos (4).	384

UNIDADES

Se utiliza el Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI), aplicándose para los cálculos las unidades, múltiplos y submúltiplos siguientes:

- fuerzas y cargas: kN, kN/m, kN/m²
- masa: kg
- longitud: m, mm
- tensiones: N/mm²
- momentos: kN·m
- rigidez: kN/mm²

SÍMBOLOS EN MAYÚSCULAS LATINOS

A	área; acción accidental
E	efecto de las acciones; módulo de elasticidad
$E_{0,k}$	módulo de elasticidad característico paralelo a la fibra de la madera aserrada ($=E_{0,05}$)
$E_{0,g,k}$	módulo de elasticidad característico paralelo a la fibra de la madera laminada encolada ($=E_{0,05,g}$)
$E_{0,medio}$	módulo de elasticidad característico medio paralelo a la fibra de la madera aserrada
$E_{0,g,medio}$	módulo de elasticidad característico medio paralelo a la fibra de la madera laminada encolada
$E_{90,medio}$	módulo de elasticidad característico medio perpendicular a la fibra de la madera aserrada
$E_{90,g,medio}$	módulo de elasticidad característico medio perpendicular a la fibra de la madera laminada encolada
F_k	valor característico de una acción
$F_{ax,Rk}$	capacidad de carga a la extracción del elemento de fijación.
F_{axil}	capacidad de carga axil.
$F_{v,Rk}$	capacidad de carga por plano de cortante y por elemento de fijación
$F_{v,Rk,Factor}$	carga por plano de cortante y por elemento de fijación para un deslizamiento dado y derivado de la contribución del factor aplicado en superposición
$F_{90,Rd}$	valor de cálculo frente a la hienda
$F_{90,Rk}$	valor característico frente a la hienda
G	acción permanente; módulo de elasticidad transversal
G_{medio}	módulo de elasticidad transversal característico medio de la madera aserrada
$G_{g,medio}$	módulo de elasticidad transversal característico medio de la madera laminada encolada
I	momento de inercia
K_{ser}	módulo instantáneo de deslizamiento para estados límite de servicio. (Uniones con elementos mecánicos de fijación)
K_h	coeficiente modificador del tamaño o factor de altura
K_L	factor de longitud
K_{sys}	coeficiente modificador de la carga compartida
K_{vol}	factor de volumen
L	longitud
M	momento flector
$M_{ap,d}$	momento flector de cálculo en la sección respecto a un punto
M_d	momento flector de cálculo
$M_{y,d}$	momento plástico de cálculo de un elemento mecánico de fijación
$M_{y,Rk}$	momento plástico característico de un elemento mecánico de fijación
P	carga puntual (aislada)
P_i	precarga de apriete en unión pretensada
R	resistencia a fuego
R_d	valor de cálculo de la resistencia, $R(X_d, a_d, \dots)$; respuesta estructural
X	valor de una propiedad del material
X_d	valor de cálculo de una propiedad del material
X_k	valor característico de una propiedad de un material

SÍMBOLOS EN MINÚSCULAS LATINOS

a	dato geométrico; distancia; separación
a_d	valor de cálculo de un dato geométrico
a_{fi}	distancias de protección frente al fuego en la testa y los bordes de la madera
a_1	separación entre elementos mecánicos de fijación, en dirección paralela a la fibra de la madera, anchura de aplastamiento exterior en la interacción entre madera y clavija
a_2	separación entre elementos mecánicos de fijación, en dirección perpendicular a la fibra de la madera
$a_{3,c}$	separación entre el elemento mecánico de fijación y la testa no cargada
$a_{3,t}$	separación entre el elemento mecánico de fijación y la testa cargada
$a_{4,c}$	separación entre el elemento mecánico de fijación y el borde no cargado
$a_{4,t}$	separación entre el elemento mecánico de fijación y el borde cargado
b	dato geométrico; anchura
b_1	anchura de aplastamiento interior en piezas laterales de madera
b_2	anchura de aplastamiento en pieza central de madera
d	diámetro de un elemento mecánico de fijación; distancia; diagonal (en el ensayo de dureza Vickers)
d_h	diámetro de la cabeza del clavo
e	excentricidad; espesor
f	resistencia de un material (propiedad resistente)
$f_{ax,k}$	valor característico de la resistencia al arranque en la pieza de punta.
$f_{c,0,d}$	resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra de la madera aserrada
$f_{c,0,g,d}$	resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra de la madera laminada encolada
$f_{c,0,k}$	resistencia característica a compresión paralela a la fibra de la madera aserrada
$f_{c,0,g,k}$	resistencia característica a compresión paralela a la fibra de la madera laminada encolada
$f_{c,90,d}$	resistencia de cálculo a compresión perpendicular a la fibra de la madera aserrada
$f_{c,90,g,d}$	resistencia de cálculo a compresión perpendicular a la fibra de la madera laminada encolada
$f_{c,90,k}$	resistencia característica a compresión perpendicular a la fibra de la madera aserrada
$f_{c,90,g,k}$	resistencia característica a compresión perpendicular a la fibra de la madera laminada encolada
$f_{h,d}$	resistencia de cálculo al aplastamiento en uniones con elementos mecánicos de fijación
$f_{h,1(2),d}$	resistencia de cálculo al aplastamiento para la longitud de entrega t_1 (t_2) en uniones con elementos mecánicos de fijación
$f_{h,k}$	resistencia característica al aplastamiento en uniones con elementos mecánicos de fijación
$f_{h1(2),k}$	resistencia característica al aplastamiento para la pieza de madera, t_1 (t_2), en uniones con elementos mecánicos de fijación
$f_{head,k}$	resistencia al punzonamiento de la cabeza del clavo
f_i	resistencias características de la madera para cada esfuerzo determinado
$f_{m,d}$	resistencia de cálculo a flexión de la madera aserrada
$f_{m,g,d}$	resistencia de cálculo a flexión de la madera laminada encolada
$f_{m,k}$	resistencia característica a flexión de la madera aserrada
$f_{m,g,k}$	resistencia característica a flexión de la madera laminada encolada
$f_{m,\alpha,d}$	resistencia de cálculo a flexión en el borde en el que la fibra forma un ángulo α con la superficie (en viga de madera laminada encolada de sección variable)
$f_{t,0,d}$	resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra de la madera aserrada
$f_{t,0,g,d}$	resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra de la madera laminada encolada
$f_{t,90,d}$	resistencia de cálculo a tracción perpendicular a la fibra de la madera aserrada
$f_{t,90,g,d}$	resistencia de cálculo a tracción perpendicular a la fibra de la madera laminada encolada
$f_{t,0,k}$	resistencia característica a tracción paralela a la fibra de la madera aserrada

$f_{t,0,g,k}$	resistencia característica a tracción paralela a la fibra de la madera laminada encolada
$f_{t,90,k}$	resistencia característica a tracción perpendicular a la fibra de la madera aserrada
$f_{t,90,g,k}$	resistencia característica a tracción perpendicular a la fibra de la madera laminada encolada
$f_{u,k}$	resistencia característica a tracción del acero de un elemento mecánico de fijación
$f_{v,d}$	resistencia de cálculo a cortante de la madera aserrada
$f_{v,g,d}$	resistencia de cálculo a cortante de la madera laminada encolada
$f_{v,p,d}$	resistencia de cálculo a cortante en el grueso del tablero estructural
$f_{v,r,d}$	resistencia de cálculo a cortante en el plano (a rodadura) del tablero estructural
$f_{v,k}$	resistencia característica a cortante de la madera aserrada
$f_{v,g,k}$	resistencia característica a cortante de la madera laminada encolada
$f_{v,p,k}$	resistencia característica a cortante en el grueso del tablero estructural
$f_{v,r,k}$	resistencia característica a cortante en el plano (a rodadura) del tablero estructural
f_{wl}	parámetro de resistencia para adhesivos
h	altura; canto; espesor
h_e	distancia desde el borde cargado de la pieza central hasta el eje del elemento mecánico de fijación más alejado
i	radio de giro
$i_{y(z)}$	radio de giro respecto al eje y (z) (de la sección)
k	coeficiente, factor, coeficiente de rigidez
k_c	factor de inestabilidad
k_{def}	factor por deformación diferida (factor reológico)
k_{flux}	coeficientes de flujo de calor a través del elemento
k_{mod}	factor de modificación (por duración de la carga y clase de servicio)
k_{vol}	factor por relación de volúmenes tensionados (vigas de madera laminada encolada con zona de vértice)
l	longitud; distancia; luz
l_g	longitud encolada
n	número total de elementos mecánicos de fijación trabajando al unísono (uniones a cortadura o al arranque)
n_{ef}	número eficaz del total de los n elementos mecánicos de fijación alineados con la dirección de la carga (Uniones a cortadura)
t_{esp}	longitud de entrega, en cada pieza de la unión, del elemento mecánico de fijación
t	espesor de la chapa de acero (uniones acero-madera), espesor de tablero de partículas y de virutas orientadas
t_{req}	tiempo requerido de resistencia al fuego para la unión no protegida
t_{pen}	longitud de penetración en la pieza de punta o la longitud de la parte corrugada en la pieza de punta
$t_{fi,d}$	tiempo requerido de resistencia al fuego
$t_1(t_2)$	longitud de entrega del elemento mecánico de fijación en la pieza de la unión que contiene t_1 (t_2)
u_{de}	deformación elástica diferida, recuperable al finalizar el proceso de descarga
u_{fin}	deslizamiento final del elemento mecánico de fijación en la unión
u_{ins}	deslizamiento instantáneo del elemento mecánico de fijación en la unión
$u_{0(1)}$	deformación elástica instantánea (total en el tiempo)
u_v	deformación viscosa no recuperable en el tiempo o remanente
w	factor de modificación
w_T	módulo resistente
w_{pl}	ancho de la placa dentada en dirección paralela a la fibra

SÍMBOLOS EN MAYÚSCULAS GRIEGOS

Δ	incremento; diferencia
Δa	incremento o margen de seguridad para un dato geométrico (desviación, tolerancia)
Σ	suma; sumatorio
ΣF	sumatorio de acciones
θ	ángulo de giro en clavija
ξ	índice de plasticidad de la clavija

SÍMBOLOS EN MINUSCULAS GRIEGOS

α	ángulo formado por la dirección de la carga y la dirección de la fibra de la madera (compresión inclinada)
α	ángulo entre la línea de acción de la fuerza F y la dirección de la fibra de madera de la pieza (Unión de fuerza de dos piezas de madera)
α_i	ángulo para el elemento i
β	ángulo; relación; coeficiente adimensional; coeficiente adimensional para la relación entre las resistencias de aplastamiento del elemento mecánico de fijación (= $f_{h,2,d}/f_{h,1,d}$ relación de resistencias al aplastamiento en las longitudes de entrega t_2 y t_1 , respectivamente)
β_n	velocidad de carbonización eficaz
γ	coeficiente parcial de seguridad
γ_M	coeficiente parcial de seguridad para una propiedad del material X_k
μ	coeficiente de rozamiento
η	rendimiento de la unión
ρ	densidad
ρ_k	densidad característica de la madera aserrada
$\rho_{g,k}$	densidad característica de la madera laminada encolada
ρ_{medio}	densidad media de la madera aserrada
$\rho_{g,medio}$	densidad media de la madera laminada encolada
$\rho_{p,k}$	densidad característica del tablero estructural
σ	tensión
$\sigma_{c,0,d}$	tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra de la madera
$\sigma_{c,90,d}$	tensión de cálculo a compresión perpendicular a la fibra de la madera
$\sigma_{c,\alpha,d}$	tensión de cálculo a compresión inclinada (ángulo α) respecto a la fibra de la madera
$\sigma_{f,c,d}$	valor medio de la tensión de cálculo a compresión en el ala comprimida (en vigas mixtas de alma o alas delgadas encoladas)
σ_{coH}	tensión de comparación con el criterio de Hill
σ_m	tensión de flexión
$\sigma_{m,0,d}$	tensión de cálculo a flexión en la fibra extrema del borde en el que la fibra es paralela respecto a la superficie de la viga, normalmente su cara inferior (vigas de madera laminada encolada)
$\sigma_{m,\alpha,d}$	tensión de cálculo a flexión en la fibra extrema del borde en el que la fibra está inclinada respecto a la superficie de la viga, normalmente su cara superior (vigas de madera laminada encolada)
σ_{ref}	tensión de plastificación de referencia
$\sigma_{t,0,d}$	tensión de cálculo a tracción paralela a la fibra de la madera
$\sigma_{t,90,d}$	tensión de cálculo a tracción perpendicular a la fibra de la madera
τ	tensión tangente; tensión cortante

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afolayan J.O. (1999). Economic efficiency of glued joints In timber truss systems. *Building And Enviroment*, 101-107.
- Álvarez L.B. (2005). Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera. *I jornadas de investigación en construcción*, (pág. 12).
- André A. (2007). *Strengthening of timber structures with flax fibres*. Tesis doctoral, Luleå University of Technology, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Luleå, Sweden.
- Araujo O.M. (2005). Resistencia a la flexión de vigas laminadas con tres especies de madera tropical mexicana. *Ingeniería*, 5-12.
- Argüelles R. (1993). *Fundamentos de elasticidad y su programación por elementos finitos*. Madrid: Librería técnica Bellisco.
- Argüelles R. (2010). Uniones: Un reto para construir con madera. *Real Academia de la Ingeniería*, 1-91.
- Argüelles R., Arriaga F. & Martínez J. (2003). *Estructuras de madera. Diseño y cálculo*. Madrid: Gráficas Palermo S.L.
- Ariza I. (2002). El nuevo enfoque en los ensayos mecánicos de la madera aserrada para uso estructural en la normativa europea. *Madera y Bosques*, 3-16.
- Arriaga F., Íñiguez G., Esteban, M. & Bobadilla I. (2007). Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades. *Informes de la Construcción*, 29-41.
- Arriaga F., Esteban M. & Íñiguez G. (2010). *Guía de construir con madera, Productos. Documento de aplicación del CTE. Cap 1*. Madrid: Confemadera.
- Aune P. & Patton-Mallory M. (1986). Lateral Load-Bearing Capacity of Nailed Joints Based on the Yield Theory. *Forest Service*.
- Awaludin A., Hirai T., Toshiro T., Sasaki Y. & Oikawa A. (2007). Effects of pretension in bolts on hysteretic responses of moment-carrying timber joints. *J Wood Sci*, 114-120.
- Awaludin A., Hirai, T., Hayashikawa T. & Sasaki Y. (2008). Load-carrying capacity of steel-to-timber joints with a pretensioned bolt. *J Wood Sci*, 362- 368.
- Bainbridge R., Mettem C., Harvey K. & Ansell, M. (2002). Bonded in rod connections for timber structures - development of design methods and test observations. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 47-59.
- Batchelar M. & Mcintosh K. (1988). Structural joints in glulam; Proceedings of the 5th World conference. *NZ Timber Design Journal*, 289–296.
- Bejtka I. y Blaß H.J. (2002). Joints with inclined screws. *Biosystems Engineering*.
- Biger J.B., Bocquet J. F. & Racher P. (1999). Testing and designing the joints for the pavilion of Utopia.
- Blanchet P. (2004). *Caractérisation du comportement des lames de plancher d'ingénierie*. Tesis doctoral, Université Laval, Faculté de Foresterie et de Géomatique, Quebec, Canadá.

- Blass H.J., Bienhaus A. & Kramer V. (2000). Effective bending capacity of dowel-type fasteners. *Proceedings of the 33rd CIB-W18*, (págs. 139-150). Delft.
- Blaß H. J. & Bejtka I. (2001). Screws with continuous threads in timber connections. *Universität Karlsruhe (TH), Germany*.
- Bobadilla I., Esteban M., Íñiguez G., Arriaga F., Ballarín D. & Palacios J. (2007). Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad. *Informes de la Construcción*, 107-116.
- Bocquet J.F., Pizzi A. & Resch L. (2007). Full-scale industrial wood floor assembly and structures by welded-through dowels. *Springer - Verlag*.
- Borri A., Corradi M. & Grazini A. (2004). A method for flexural reinforcement of old wood beams with CRPF materials. *Composites Part B Engineering*.
- Boyd S.W. (2004). Bonded butt joints in pultruded GRP panels-an experimental study. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 263-275.
- Branco J.M., Cruz, P.J.S. & Piazza M. (2009). Experimental analysis of laterally loaded nailed timber-to-concrete connections. *Construction And Building Materials*, 400-410.
- Broughton J.G. & Hutchinson, A. (2001) A. Adhesive systems for structural connections in timber. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 177-186.
- Broughton J. G. & Hutchinson A. R. (2001) B. Effect of timber moisture content on bonded in rods. *Construction And Building Materials*, 17-25.
- Cabrero J.M., Gebremedhin K. G. & Elorza J. (2009). Criterios de rotura en miembros de madera. *V Congreso Nacional y II congreso Ibérico Agroingeniería 2009 (Lugo 28-30 septiembre)*.
- Calil C. & Molina J.C. (2010). Numerical modeling strategy for analyzing the behavior of shear connectors in wood-concrete composite system. *Word Conference on Timber engineering*. Riva del Garda, Italy.
- Cárdenas M.S., Schanack F. & Ramos R. (2010). Diseño, construcción y ensayo de una estructura de sección mixta madera laminada-hormigón para su uso en puentes. *Revista de la Construcción*, 63 - 75.
- Casado M.P., Pinazo O., Martínez C., Vegas F., Pando V., Acuña L. & Relea E. (2005). Determinación de la capacidad resistente mediante metodos no destructivos. Aplicación en viguetas de forjado de un edificio singular. *Sociedad española de ciencias forestales. IV congreso forestal español*, (pág. 10). Madrid.
- Celigüeta J.T. (2011). *Método de los elementos finitos para analisis estructural*. San Sebastián: Tecnum, Escuela superior de Ingenieros.
- Chen C.J., Leeb T.L. & Jeng D.S. (2003). Finite element modeling for the mechanical behaviour of dowel timber joints. *Computer And Structures*, 2731-2738.
- Claisse P.A. & Davis T.J. (1998). High performance jointing systems for timber. *Construction And Building Materials*, 415-425.
- Conde M., Fernández-Golfín J.I. & Hermoso J.I. (2007). Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual. *Informes de la Construcción*, 49-59.

- Confermadera. (2015). *Guía de implantación de marcado CE en productos de madera*. Madrid: Confederación española de empresarios de la madera.
- Dassault Systèmes Simulia Corp. (2013). ABAQUS v 6.13 User's Manuals. Providence, United States.
- Davalos J.F. & Kim Y. (1995). A layerwise beam element for analysis of frames with laminated sections and flexible joints. *Finite Elements In Analysis And Design*, 181-194.
- Davis T.J. & Claisse P.A. (2000). Bolted joints in glulam and structural timber composites. *Construction And Building Materials*, 407-417.
- Davis T.J. & Claisse P.A. (2001). Resin-injected dowel joints in glulam and structural timber composites. *Construction And Building Materials*, 157-167.
- DB SE. (2009). Seguridad estructural. Resistencia y estabilidad. Aptitud de servicio. (Ed. Ministerio de Fomento) *Boletín Oficial del Estado Español. Código Técnico en la Edificación*.
- DB SE A. (2009). Documento básico. Seguridad estructural. Acero. (Ed. Ministerio de Fomento) *Boletín Oficial del Estado Español. Código Técnico en la Edificación*, 168.
- DB SE AE. (2009). Documento básico. Seguridad estructural. Acciones en edificación. (Ed. Ministerio de Fomento) *Boletín Oficial del Estado Español. Código Técnico en la Edificación*, 46.
- DB SE M. (2009). Documento básico. Seguridad estructural. Madera. (Ed. Ministerio de Fomento) *Boletín Oficial del Estado Español. Código Técnico en la Edificación*, 132.
- DB SI. (2010). Documentos básicos. Seguridad en caso de incendio. (Ed. Ministerio de Fomento) *Boletín Oficial del Estado Español, Código Técnico en la Edificación*, 110.
- Dias A.M.P.G. & Van de Kuilen J.W. (2007). A non-linear 3D FEM model to simulate timber-concrete joints. *Advances in Engineering Software*, 522-530.
- DIN 601. (1987). Tornillos de cabeza hexagonal. Rosca métrica M5 a M52. *Deutsches Institut für Normung. DIN* (Instituto Alemán de Normalización). Berlin.
- DIN 4074-1 (2008). Strength grading of wood - Part 1: Coniferous sawn timber. *Deutsches Institut für Normung. DIN* (Instituto Alemán de Normalización). Berlin.
- DIN 68140-1. (1999). Wood finger-jointing. Part 1: Finger jointing of softwood for load-bearing structures. *Deutsches Institut für Normung. DIN* (Instituto Alemán de Normalización). Berlin.
- Directiva 89/106 CEE. (1998). *Productos de construcción*. Bruselas, Bélgica: Comité Europeo de Normalización. CEN.
- DISLAS UTH Co. (2014). Fijaciones SDF Universal de tornillería y anclajes. Vigo, Pontevedra, España.
- Domínguez M., Fueyo J.G., Rubio M. & Cabezas J.A. (2008). Estudio mediante simulación numérica de uniones a través de elementos tipo clavija. *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Rev. Asoc. Española de Ingeniería Mecánica*, (págs. 749-754). Gijón, España.
- Domínguez M., Fueyo J.G., Henares G.L. & Cabezas J.A. (2010). Estudio empírico de mejora de uniones tipo clavija en estructuras de madera mediante el empleo de pernos encolados. *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, (pág. 230). Ciudad Real.

- Domínguez M., Fueyo J. G. & Cabezas J.A. (2013). Sistemática de prácticas en laboratorio con pórticos y distintos estados de carga, ratificación con técnicas numéricas y Matcad®. *Segundas Jornadas de Innovación Didáctica en la Universidad de Salamanca*, (pág. 6). Salamanca.
- Domínguez M., Fueyo J.G., Henares G.L. & Cabezas J.A. (2014). Procedimientos de ensayo para conexiones tipo clavija en estructuras de madera. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*.
- Dong Phuong L. (2006). *Développement de modèles analytiques pour la prédiction du comportement élastique des assemblages mécaniques à broches dans la construction en bois*. Tesis doctoral, Université de Liège. Faculté des Sciences Appliquées Génie Civil et Géologie, Département de Mécanique des matériaux et Structures, Liège, Belgium.
- Dorn M., Borst K. de & Eberhardsteiner J. (2013). Experiments on dowel-type timber connections. *Engineering Structures*, 67-80.
- Echavarría C.A. (2007). Bolted timber joints with self-tapping screws. *Rev. EIA, Escuela de Ing. De Antioquia, Medellín (Colombia)*, 37-47.
- Echavarría C.A., Correa C.A. & Echevarri C. (2009). Conexiones pernadas de madera reforzadas con placas dentadas de acero. *Dyna* 164, 98-108.
- EOTA. (2000). *ETAG 04 External thermal insulation composite systems with rendering. European Organisation for Technical Approvals*. Brussels
- EOTA. (2001). *ETAG 07 Timber frame building kits. European Organisation for Technical Approvals*. Brussels
- Erchinger C., Frangi, A. & Mischler A. (2010). Thermal investigations on multiple shear steel-to-timber connections. *Structures in Fire: Proceedings of the Sixth International Conference*, (pág. 8). Michigan.
- Estévez J., Vázquez J. & Otero M. (2007). Experimental behaviour of threaded steel rods glued into high-density hardwood. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 27, 136-144.
- Eurocode 5 pr EN 1995-1-1. (1995). Design of timber structures. General Rules General rules and rules for buildings. *European Committee for Standardization, CEN (TC 250/SC5 N158)* , 121.
- Eurocódigo 0. UNE EN 1990. (2003). Bases de cálculo de estructuras. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 140 Eurocódigos Estructurales*.
- Eurocódigo 1. UNE EN 1991. (2003). *Acciones en estructuras*. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.
- Eurocódigo 3. UNE EN 1993. (2013). *Proyecto de estructuras de acero*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.
- Eurocódigo 5. UNE EN 1995. (2010). Proyecto de estructuras de madera. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 140 Eurocódigos Estructurales*.
- Basterra A., Ramón G., Barranco I., López G., Acuña L., Relea E., Casado M. & Rodríguez M. A. (2004). Evaluación preliminar de la estructura de madera de quince (12+3) monumentos declarados B.I.C. En Castilla-León. *Cimad'04. A Madeira na Construção, 1.º Congresso Ibérico*, (pág. 10). Guimãres.
- Faber M. & Köhler J. (2004). Probabilistic modeling of graded timber material properties. *Structural Safety*, 295-309.

- Falk R., DeVisser D., Plume G.R. & Fridley K.J. (2003). Effect of drilled doles on the bending strength of large dimension douglas fir lumber. *Forest Products Journal*, 55-60.
- Fernández J.L. & Fernández M.C. (2007). La estructura de la cubierta de la pieza de recepción del Centro Especial de Empleo Aspanias. Morales del Vino, Zamora, 1993. *Informes de la Construcción*, 67-72.
- Fernández-Golfín J. I., Díez R. & Hermoso E. (2003). Normas aplicables a las estructuras de madera maciza. *Bol. de infor. Téc. Nº 221. Centro De Investigación Forestal (CIFOR-INIA)*, 40-43.
- Fischer Co. (08 de 2014). Sistemas de fijación. <http://www.fischer.es/tabid-333/Productos.aspx>. Obtenido de <http://www.fischer.es/tabid-333/Productos.aspx>
- Foschi R.O. (2000). Reliability applications in wood design. *Progress In Structural Engineering And Materials*, 238-246.
- Fueyo J.G., Cabezas J.A., Rubio M.P. & Domínguez M. (2008). Reduction of perpendicular-to-grain stresses in the apex in double shear. *Materials and Structures*.
- Fueyo J.G., Domínguez M. & Cabezas J.A. (2009) A. Análisis de tensiones en uniones de tres barras de cerchas ligeras de madera realizadas con placas-clavo. *Análisis de tensiones en uniones de tres barras de cerchas ligeras de madera*, 45-56.
- Fueyo J.G., Domínguez M., Cabezas J.A. & Rubio M.P. (2009) B. Design of connections with metal dowel-type fasteners in double shear. *Materials and Structures*, 42, 385-397.
- Fueyo J.G., Cabezas J.A., Rubio, M.P. & Domínguez M. (2009) C. Reducción de tensiones en apoyos entallados de vigas de madera mediante empleo de pernos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 03-13.
- Fueyo J.G., Cabezas J.A., Domínguez M. & Rubio M.P. (2010) A. Análisis tensional de un nudo de esquina rigidizado mediante barras encoladas de un pórtico triarticulado de madera. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 79-90.
- Fueyo J.G., Domínguez M. & Cabezas J.A. (2010) B. Técnicas de aplicación del método de los elementos finitos en análisis de uniones metal-madera en estructuras de madera. *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*. Ciudad Real, España.
- Fueyo J.G., Rubio M.P., Cabezas J.A., Domínguez M. (2011) A. Influence of the slope in the apex zone stresses of glulam pitched cambered beams. *16th International Conference on Composite Structures*. Oporto.
- Fueyo J.G., Domínguez M. & Cabezas J.A. (2011) B. Rendimiento de uniones clavija de tipo perno encolado usando elementos finitos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 117-128.
- Fueyo J.G., Domínguez M. & Cabezas J.A. (2012). Experimental tests to study the structural integrity of dowel type joints in timber structures. *15th International Conference on Experimental Mechanics*, (págs. 295-305). Oporto.
- Fueyo J.G., Domínguez M. & Cabezas J.A. (2013) A. Influence over the stresses of the size and position of the punched metal plates structural timber joints. *IRF'2013, Integrity, Reliability & Failiture*. Funchal.
- Fueyo J.G., Domínguez M. & Cabezas J.A. (2013) B. Stress redistributions provoked by the use of expansive systems in timber structures. *IRF'2013, 4th International Conference on Integrity, Reliability & Failiture*, (págs. IRF'2013, 4th International Conference on Integrity, Reliability & Failiture). Funchal.

- Fueyo J.G., Domínguez M. & Cabezas J.A. (2014). Empirical study of the mechanical behaviour of dowel-type joints with expansive kits in timber structures. *16th International Conference on Experimental Mechanics*, (pág. 226). Cambridge.
- Fujimoto Y., Sekino N., Korai, H., Nogami H. & Ohashi K. (2008). Nail joint performance. *10th WCTE Japon Proceedings*. Miyazaki, Japón.
- Gaunt D. (1999). Joints in glulam using groups of epoxy-grouted steel bars. *IPENZ Transactions*, 34-38.
- Gliniorza K. & Mosalam, K.M. (2002). Modeling of layered timber beams and ribbed shell frameworks. *Composites Part B Engineering*, 367-381.
- González, F. (1984). Uniones de madera por encolado. *Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA)*, 6.
- Gorst N. & Williamson S. (2003). *Friction in temporary works*. Birmingham: Ed. University of Birmingham.
- Green D.W. & Hernandez R. (1998). *Codes and standards for structural wood products and their use in the United States*. Madison, Wisconsin: Green and Hernandez.
- Guan Z. & Zhu E.C. (2009). Finite element modelling of anisotropic elasto-plastic timber composite beams with openings. *Engineering Structures*, 394-403.
- Guan Z. & Rodd P.D. (2001). Hollow steel dowels A new application in semi-rigid timber connections. *Engineering Structures*, 110-119.
- Hentinen M., Hildebrand M. & Visuri M. (1997). Adhesively bonded joints. *Technical Research Centre of Finland*.
- Hermoso E., Carballo J. & Fernández-Golfín J. (2007). Caracterización estructural de la madera de pinus radiata d. Don del Pais Vasco (España) acorde a las modificaciones normativas. *Maderas. Ciencia y tecnología* 9 (3), 223-232.
- Herrero M.E., Argüelles R., Arriaga F., Íñiguez G. & Bobadilla I. (2007). Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España. *Informes de la Construcción*, 15-27.
- Hilson B. (1995). Joints with dowel-type fasteners. Theory. Timber Engineering. *Timber Engineering, STEP 1. Centrum*.
- Hilti Co. (2014). Catálogo fijaciones HILTI. *Catálogo fijaciones HILTI*. Tarragona, España.
- Hilti Co. (2001). *Fastening Systems, Use of Hilti HIT-RE 500 Injection Adhesive in "Wood" Base Material*.
- Hilti Co. (2013). *Direct fastening technology manual*. Hilti.
- Hilti Co. (2013). ETA-04/0027 for HIT-RE 500 Injection System. *Deutsches Institut für Bautechnik*, Deutsches Institut für Bautechnik.
- Holmberg S. & Persson K. (1999). Non linear mechanical behaviour and analysis of wood and fiber materials. *Computer And Structures*, 459-480.
- Íñiguez G. (2007). *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Construcción y Vías Rurales, Madrid. España.

- ISO 8970. (2009) Timber structures. Testing of joints made with mechanical fasteners. Requirements for wood density. *Draft International Standard. International Organization For Standardization.*
- ISO 10984. (2008). Timber structures. Dowel-type fasteners. Part 2: Determination of embedding strength and foundation values. *Draft International Standard. International Organization For Standardization.*
- Iyer K. (2001). Solutions for contact in pinned connections. *International Journal of Solids & Structures*, 9133-9148.
- Jesse C. (2006). *Investigation into the effects of variable row spacing in bolted timber connections subjected to reverse cyclic loading.* Tesis doctoral, Washington State University, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington. United States.
- Johansen K.W. (1949). Theory of timber connections. Forest Products Journal. *International Association of Bridge and Structural Engineering* 9., 249-262.
- Johansson S. (1991). Glued-in bolts. STEP 1. *Timber Engineering. Centrum Hout. Holanda.*
- Jong F. & Clancy P. (2004). Compression properties of wood as functions of moisture stress and temperature. *Fire And Materials*, 209-225.
- Jönsson J. (2005). Load carrying capacity of curved glulam beams reinforced with self-tapping screws. *Springer - Verlag*, 342-347.
- Juvande L.F.P. & Barbosa, R.M.T. (2012). Bond Analysis of Timber Structures Strengthened with FRP Systems. *Strain.*
- Kasal B.A. & Anthony R. W. (2004). Advances in in situ evaluation of timber structures. *Timber Construction.*
- Kasal B., Heiduschke A., Kadla J. & Haller P. (2004), Laminated timber frames with composite fibre reinforced connectious. *Progress In Structural Engineering And Materials*, 84-93.
- Kevin C. (2002). Stress functions for a heterogeneous section of a tree. *International Journal of Solids & Structures*, 4615-4625.
- Kharouf N., McClure G. & Smith I. (2003). Elasto-plastic modeling of wood bolted connections. *Computer And Structures*, 747-754.
- Labèrnia C. (2010). *Documentos de aplicación del CTE. Ejecución control y Mantenimiento. Construir con madera. Cap 5.* Madrid: Coferma.
- Laghdir A., Fortin Y., Mariella C. & Hernández R. (2008). Development of a technique to determine the 3d elasticity tensor of wood as applied to drying. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 35-44.
- Lam F. (2001). Modern structural wood products. *Progress In Structural Engineering And Materials*, 238-245.
- Laplanche K., Dhima D. & Racher P. (2006). Thermo-mechanical analysis of the timber connection under fire using 3D.
- Larsen H.J. & Jensen J.L. (2000). Influence of semirigidity of joints on the behaviour of timber structures. *Progress In Structural Engineering And Materials*, 267-277.
- Le Magorou L. & Bos F. (2003). Identification de lois de comportement elastique et viscoelastique par mesure de champs. *Mechanique & Industrie*, 673-677.

- Leicester R.H. (2001). Engineered durability for timber construction. *Progress In Structural Engineering And Materials*, 216-227.
- Leijten A. & Schoenmakers D. (2008). Bearing strength perpendicular to grain. *10Th WCTE Japan Proceedings*, (pág. 8). Miyazaki, Japón.
- Luizaga A.M. (2005). *Hormigón armado reforzado con bandas epoxy*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Caminos Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Madrid. España.
- Lusambo E.W. & Wills B.M.D. (2002). The strength of wire connected round timber joints. *Biosystems Engineering*, 339-350.
- Mackerle J. (2003). Finite element analysis of fastening and joining a bibliography. *International Journal of Pressure Vessels And Piping*, 253-271.
- Mackerle J. (2004). Creep and creep fracture/damage finite element modelling of engineering materials and structures: an addendum. *International Journal of Pressure Vessels And Piping*, 381-392.
- Madsen B. (1992). Structural behaviour of timber. Timber Engineering LTD. Canadá.
- Moses D.M. & Prion H.G.L. (2003). Stress and failure analysis of wood composites a new model. *Composites Part B Engineering*.
- MTS. (2009). Manuales MTS. Compression method.
- Natterer J.K. (2002). New technologies for engineered timber structures. *Progress In Structural Engineering And Materials*, 245-263.
- Nuere E. (2007). Madera, en restauración y rehabilitación. *Informes de la Construcción*, 123-130.
- Ogawa H. (2000). Architectural application of carbon fibers Development of new carbon fiber reinforced glulam. *Carbon*, 211-226.
- Oksanen T. & Kangas J. (1999). Strength and fire resistance of connections based on glued-in rods. *Technical Research Centre of Finland*.
- Otero M.D. (2009). *Barras roscadas de acero encoladas en madera de frondosa*. Tesis doctoral, Universidad de A Coruña. , Departamento de Tecnología de la construcción, A Coruña. España.
- Otero M.D., Estévez J. & Martín E. (2008). Glued joints in hardwood timber. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 28, 457-463.
- Otero M.D., Estévez J. & Martín E. (2009). Influence of the geometric and material characteristics on the strength of glued joints. *Materials and Design* 30, 1325-1332.
- Otero M.D., Estévez J. & Martín E. (2010). Análisis experimental de uniones con barras de acero encoladas en maderas de castaño y elondo. *Materiales de Construcción*, 111-125.
- Oudjene M. & Khelifa M. (2009) A. Elasto-plastic constitutive law for wood behaviour under compressive loadings. *Construction and Building Materials* 23, 3359–3366.

- Oudjene M. & Khelifa M. (2009) B. Finite element modelling of wooden structures at large deformations and brittle failure prediction. *Materials and Design* 30, 4081–4087.
- Palma P., Frangi A., Hugi E., Cachim P. & Cruz E. (2013). Fire resistance tests on steel to-timber dowelled. *2nd CILASCI Ibero-latin-american congresso on fire safety engineering*, (pág. 11). Coimbra.
- Pang S. (2002). Investigation of effects of wood variability and rheological properties on lumber drying: application of mathematical models. *Chemical Engineering Journal*, 103-110.
- Proyecto LICONS. (2003). *Evaluation of draft design rules. Task 5.3. Evaluation of draft design rules. Task 5.3. Development of structural Eurocode-type principles*. Low intrusion systems for timber structures. CRAF 1999-71216. Swansea, United Kingdom.
- Queipo J., González B., Llinares M., Villagrà C. & Gallego V. (2010). *Guía de construir con madera. Ejecución control y mantenimiento. Documento de aplicación del CTE*. Construir con madera. Cap 0. Madrid: Coferma.
- Radford D.W. & Van Goethem D. (2002). Composite repair of timber structures. *Construction And Building Materials*, 417-425.
- Rammer D.R. & Line P. (1996). Shear strength of wood beams. *Proceedings*, 168-117.
- Rammer D.R. & McLean D.I. (2006). Development of Failure Mechanisms for Fasteners in the United States. *WCTE 2006-9th World Conference on timber engineering*. Portland, USA.
- Reglamento (UE) Nº 305/2011. (2013). *Condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción*. Bruselas, Bélgica: Diario Oficial de la Comunidades Europeas, DOCE. Comité Europeo de Normalización. CEN.
- Resch L., Despres A., Pizzi A., Bocquet, J.F. & Leban J.M. D. (2006). Welding-through doweling of wood panels. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64, 423-425.
- Riberholt H. (1988). Glued bolts in glulam-Proposal for CIB Code. *Proc. Of the CIB-W18 Meeting. Paarkville, Vancouver Island, Canada*.
- Richter K., Pizzi A. & Despres A.P. (2006). Thermal stability of structural one-component polyurethane adhesives for wood. Structure property relationship. *Journal of Applied Polymer Science*, 5698-5707.
- Ritter M.A. (1990). *Timber Bridges: Loads and forces on timber bridges*. United States Department of Agriculture Forest Service.
- Ritter M.A. & Wacker J.P. (1995). Field performance of stress-laminated timber bridge on low-volume roads. *Proceeding of international Conference on Low-Volume Roads*, (págs. 347-356). Minneapolis.
- Robert F. & Kathryn. A. (2000). Densificación de material lignocelulósico. *Patente europea nº 2141719 / 92301495.5*.
- Rodd P.D. & Leijten A.J. (2003). High performance dowel type joints. *Progress In Structural Engineering And Materials*, 77-89.
- Rosowskya D.V. & Bulleitb W.M. (2002). Load duration effects in wood members and connections: order statistics and critical loads. *Structural Safety*, 347-362.

- Rubio M.P., Fueyo J.G., Cabezas J.A. & Domínguez M. (2008). Estudio mediante MEF del comportamiento mecánico de vigas de madera de vértice peraltado reforzadas con barras encoladas. *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Rev. Asoc. Española de Ingeniería Mecánica*, (págs. 741-747). Gijón, España.
- Sanz J.A. (2008). *Proyecto de rehabilitación de almacenes de picos de las dársenas de Alar del Rey*. Valladolid.
- Schoenmakers J. & Jorissen A.J.M. (2011). Engineering Structures. *Failure mechanisms of dowel-type fastener connections perpendicular to grain*, 3054-3063.
- Schreyer A. (1998). *Determination of the capacities of a new composite timber-steel connection system, the TiSCO*. Wiesbaden, Germany.
- Serrano E. (2001) A. Glued-in rods for timber structures. A 3D model and finite element parameter studies. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 21, 115-127.
- Serrano E. (2001) B. Glued-in rods for timber structures. An experimental study of softening behaviour. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 228-234.
- Shigley J.E., Mischke C., Budynas R. & Nisbett J. (2008). *Diseño de ingeniería Mecánica de Shigley*. Ed. McGraw Hill. México D.F.
- Sjödin J. (2008). *Strength and moisture aspects of steel-timber dowel points in glulam structures*. Tesis Doctoral, Växjö University, Växjö. Sweden.
- Sjödin J., Mischke C., Budynas R. & Nisbett J. (2008). A numerical study of methods to predict the capacity of multiple steel-timber dowel joints. *Springer - Verlag*, 8.
- Sjödin J., Serrano E. & Enquist B., (2008). An experimental and numerical study of the effect of friction in single dowel joints. *Springer, Verlag*, 363-372.
- Smith I., Snow M. & Asiz A. (2008). Failure characteristics connections. *10Th WCTE Japon Proceedings*. Miyazaki, Japón.
- Sotomayor J.R (2003). Caracterización mecánica de madera reconstituida. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 20-43.
- Spit Co., (2012). Catálogo fijaciones SPIT. Barcelona, España.
- Stehn L. & Börjes K. (2004). The influence of nail ductility on the load capacity of a glulam truss structure. *Engineering Structures*, 809-816.
- Study Group Workshop, Mérida, Yucatán, México. (2000). Proceedings of the forest products study group workshop. *Proceedings of the Forest Products*.
- Tannert T. (2008). *Structural performance of rounded dovetail connections*. Tesis doctoral, University of British Columbia. Faculty of Graduate Studies, Vancouver. Canada.
- UNE 56400. (1988). Protección de madera. Terminología. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho*, 16.
- UNE 56416. (1988). Protección de madera. Métodos de tratamiento. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho*, 16.

- UNE-56529. (1997). Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del contenido de humedad por desecación hasta el estado anhidro. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 2.*
- UNE-56544. (2011). Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 2.*
- UNE-EN 301. (2007). Adhesivos fenólicos y aminoplásticos para estructuras de madera bajo carga. Clasificación y requisitos de comportamiento. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 143 Adhesivos, 12.*
- UNE-EN 302. (2005). Adhesivos para madera de uso estructural. Métodos de ensayo. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 143 Adhesivos, 16.*
- UNE-EN 335. (2013). Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Clases de uso: definiciones, aplicación a la madera maciza y a los productos derivados de la madera. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 14.*
- UNE-EN 336. (2003). Madera estructural. Dimensiones y tolerancias. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 8.*
- UNE-EN 338. (2010). Madera estructural. Clases resistentes. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 12.*
- UNE-EN 350. (1995). Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 1: Guía para los principios de ensayo y clasificación de la durabilidad natural de la madera. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 46.*
- UNE-EN 351-1. (2008). Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Madera maciza tratada con productos protectores. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 20.*
- UNE-EN 383. (2007). Estructuras de madera: Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia al aplastamiento y del módulo de aplastamiento para los elementos de fijación tipo clavija. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, 16.*
- UNE-EN 384. (2004). Madera con uso estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 12.*
- UNE-EN 386. (2002). Empalmes por unión dentada en madera estructural. Especificaciones y requisitos mínimos de fabricación. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 20.*
- UNE-EN 390. (1995). Madera laminada encolada. Dimensiones y tolerancias. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 10.*
- UNE-EN 408. (2004). Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 12.*

- UNE-EN 409. (1998). Estructuras de madera. Métodos de ensayo. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité Europeo de Normalización. CEN, 12.*
- UNE-EN 460. (1995). Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 12.*
- UNE-EN 594. (1996). Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Método de ensayo para la determinación de la resistencia y rigidez al descuadre de los paneles de muro entramado. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 20.*
- UNE-EN-595. (1996). Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Ensayo para la determinación de la resistencia y rigidez de las cerchas. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.*
- UNE-EN 789. (2006). Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Determinación de las propiedades mecánicas de los tableros derivados de la madera. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 36.*
- UNE-EN 912. (2011). Conectores para madera. Especificaciones de los conectores para madera. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 34.*
- UNE-EN 1193. (2010). Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de propiedades físicas y mecánicas adicionales. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 19.*
- UNE-EN 1194. (1999). Estructuras de madera. Madera laminada encolada. Clases resistentes y determinación de los valores característicos. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 14.*
- UNE-EN 1363. (2000). Ensayos de resistencia al fuego. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 23 Seguridad Contra Incendios, 48.*
- UNE-EN 1380. (2000). Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Uniones estructurales clavadas. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 14.*
- UNE-EN 1381. (2000). Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Uniones estructurales grapadas. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, 14.*
- UNE-EN 1382. (2000). Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Resistencia al arranque de los elementos de fijación en la madera. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho.*
- UNE-EN 1383. (2000). Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Resistencia a la incrustación en la madera de la cabeza de los elementos de fijación. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 12.*
- UNE-EN 1912. (2012). Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, 22.*
- UNE-EN 7520. (1994). Atmósferas normales para acondicionamiento o ensayo. Especificaciones. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 7 Ensayos de materiales, 2.*

- UNE-EN 10025-2. (2006). Producto laminados en caliente de aceros para estructuras. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 36 Siderurgia, 38.*
- UNE-EN 12369. (2011). Tableros derivados de la madera. Valores característicos para el cálculo estructural. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 143 Adhesivos, 14.*
- UNE-EN 12436. (2002). Adhesivos para madera de uso estructural. Adhesivos de caseína. . *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 16.*
- UNE-EN 13183. (2004). Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 10.*
- UNE-EN 13271. (2002). Conectores. Valores característicos de resistencia y del módulo de deslizamiento de uniones con conectores. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, 18.*
- UNE-EN 13986. (2006). Tableros derivados de la madera para utilización en la construcción. Características, evaluación de la conformidad y marcado. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR, 62.*
- UNE-EN 14081-1. (2006). Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por su resistencia. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 28.*
- UNE-EN 14250. (2009). Estructuras de madera. Requisitos de producto para cerchas prefabricadas ensambladas con conectores de placa clavo. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 42.*
- UNE-EN 14545. (2009). Estructuras de madera. Conectores. Requisitos.. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 5.*
- UNE-EN 14592. (2012). Estructuras de madera. Elementos de fijación tipo clavija. Requisitos. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 20.*
- UNE-EN 26891. (1992). Estructuras de madera. Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. Determinación de las características de resistencia y deslizamiento. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 56 Madera y Corcho, 6.*
- UNE-EN 28970. (1992). Estructuras de madera. Ensayo de uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. Requisitos para la densidad de la madera. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.*
- UNE-EN ISO 6892-1. (2010). Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente. *Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Comité técnico AEN/CTN 7 Ensayos de materiales, 78.*
- United States Department of Agriculture. (1983). Plane stress analysis of wood members using isoparametric finite elements. *Forest Service, 19.*
- United States Department of Agriculture. (1990). Stress-laminated wood bridge decks. *Forest Service.*
- Vega L., Llinares M., Villagrà C., Gallego V. & González B. (2010). Comportamiento frente al fuego. Documento de aplicación del CTE. En *Guía de construir con madera. Construir con madera. Cap 3.* Madrid: Coferma.

- Wikipedia CTE. (09 de 2014). *Código Técnico de la Edificación*. Obtenido de Enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Código_Técnico_de_la_Edificación
- Wikipedia MEF. (06 de 2015). *Método de los elementos finitos*. Obtenido de Enciclopedia libre: http://es.wikipedia.org/wiki/Metodo_de_los_elementos_finitos
- Williams J.M., Frifley K. J., Cofer W.F. & Falk R.H. (2000). Failure modeling of sawn lumber with a fastener hole. *Finite Elements In Analysis And Design*, 83-98.
- Wipf T. & Ritter M.A. (1999). Dynamic evaluation and testing of timber highway bridges. *Timber Engineering Conference Wood DL*, (págs. 333-340). Rotorua.
- Wood Handbook, USDA. Forest Service. (1999). *Wood as an engineering material*. Madison, Wisconsin: Wood Handbook, USDA. Forest Service,.
- Würth GmbH & Co. (2014). Manual Würth de técnicas de anclajes. *Manual Würth de técnicas de anclajes*. Künzelsau.
- Xu B., Taazount M., Bouchaïr A. & Racher P. (2009). Numerical 3D finite element modelling and experimental tests. *Construction And Building Materials*, 3043-3052.
- Yeboah D., Gilbert S. & Gilfillan R. (2009). The behaviour of moment-resisting timber joints. *Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies*.
- Zhou T. & Guan Z. (2011). A new approach to obtain flat nail embedding strength. *Construction And Building Materials*, 598-607.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.1.1	La madera estructural	1
1.1.2	Los elementos de unión en estructuras de madera.....	2
1.1.3	Marco de trabajo y orígenes del problema.....	2
1.2	INTERÉS Y ORIGINALIDAD	4
1.3	OBJETIVOS GLOBALES.....	5
1.4	OBJETIVOS PARCIALES	5
1.5	ESTRATEGIA PARA EL DESARROLLO	6
1.6	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	7
2	ESTADO DE LA TÉCNICA SOBRE LA MADERA ESTRUCTURAL Y LOS ELEMENTOS DE UNIÓN	9
2.1	INTRODUCCIÓN.....	9
2.2	LA MADERA COMO MATERIAL ESTRUCTURAL	9
2.2.1	Anisotropía.....	10
2.2.2	Propiedades físicas.....	14
2.2.3	Propiedades mecánicas.....	14
2.2.3.1	Tracción-compresión paralela a la fibra	15
2.2.3.2	Flexión	16
2.2.3.3	Tracción-compresión perpendicular a la fibra	16
2.2.3.4	Cortante.....	17
2.2.3.5	Módulo de elasticidad	18
2.2.3.6	Criterios de rotura. Comportamiento ante sollicitaciones combinadas.....	18
2.2.3.6.1	Criterios de fallo lineales.....	21
2.2.3.6.2	Criterios de fallo cuadráticos	21
2.3	CLASES RESISTENTES Y VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA MADERA ESTRUCTURAL.....	24
2.4	VARIABLES QUE AFECTAN A LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.....	29
2.4.1	Calidad de la madera.....	29
2.4.2	Singularidades ligadas a la anatomía de la madera	29
2.4.2.1	Singularidades ligadas al aserrado de las piezas.....	31
2.4.2.2	Deformaciones de las piezas	31
2.4.3	Alteraciones de tipo biológico.....	32
2.4.4	Alteraciones de tipo físico y químico	33
2.4.5	Contenido de humedad.....	34
2.4.6	Durabilidad de la madera y duración de la carga.....	34
2.4.7	Fatiga.....	34
2.4.8	Distribución de carga.....	35
2.4.9	Tamaño de la pieza	35
2.4.10	Temperatura	35
2.4.11	Resistencia al fuego.....	35
2.5	ELEMENTOS DE UNIÓN	35
2.5.1	Por la forma del encuentro	36
2.5.2	Por el medio de unión empleado.....	36
2.5.2.1	Uniones tradicionales	36
2.5.2.2	Uniones mecánicas.....	37

2.5.2.3	Uniones encoladas.....	37
2.6	UNIONES MECÁNICAS CON ELEMENTOS TIPO CLAVIJA.....	37
2.6.1	Descripción de los elementos de unión	37
2.6.2	Antecedentes y estado de la investigación	40
2.6.2.1	Antecedentes en la investigación de uniones tipo clavija	40
2.6.2.2	Actividad investigadora sobre la madera estructural en España.....	43
2.7	UNIONES TIPO CLAVIJA PARA SISTEMAS MADERA-MADERA Y MADERA-ACERO EN CORTADURA SIMPLE Y DOBLE.....	48
2.7.1	Estados límite últimos (ELU).....	48
2.7.2	Estados límite de servicio (ELS)	48
2.7.3	Capacidad de carga en el elemento tipo clavija	49
2.7.3.1	Uniones madera-madera en cortadura simple.....	50
2.7.3.2	Uniones madera-madera en cortadura doble	58
2.7.3.3	Uniones madera-acero	59
2.7.4	Resistencia al aplastamiento en la madera por el elemento de unión	61
2.7.5	Resistencia a la flexión en la clavija. Momento plástico	63
2.7.6	Efecto soga	64
2.7.6.1	Carga de arranque en el medio de fijación.....	64
2.7.6.2	Pretensado en la clavija	65
2.7.7	Efecto hienda	66
2.7.8	Número eficaz de elementos de fijación.....	67
2.7.9	Separaciones y distancias entre clavijas y conjuntos de ellas.....	67
2.7.10	Resistencia al fuego de uniones mecánicas	68
2.7.11	Deformación de la unión.....	71
2.7.12	Coeficientes modificadores.....	75
2.7.13	Medios de fijación actuando en conjunto.....	75
3	MODELOS DE REFERENCIA.....	77
3.1	INTRODUCCIÓN.....	77
3.2	ELEMENTOS QUE MEJORAN EL DISEÑO EN UNIONES CON CLAVIJA	77
3.2.1	Premisas para un buen rendimiento de la unión	77
3.2.1.1	Disposición geométrica	78
3.2.1.2	Número de elementos de unión.....	78
3.2.1.3	Límites elástico y plástico de la clavija.....	79
3.2.1.4	Efecto soga	79
3.2.1.5	Sección transversal de la clavija	79
3.2.1.6	Fricción en la clavija.....	80
3.2.1.7	Planos de contacto entre madera y madera. Fricción y placas-clavo	80
3.2.2	Densificación de la madera	82
3.2.2.1	Ductilidad de la unión.....	83
3.2.2.2	Rigidez de la unión.....	83
3.2.3	Componentes de mejora aplicables a la clavija	84
3.3	IDONEIDAD DE LA MADERA ESTRUCTURAL. EL MERCADO CE	85
3.4	CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA OBJETO DE ESTUDIO	87
3.4.1	Madera laminada encolada.....	89
3.4.2	Madera maciza encolada	92
3.5	CARACTERIZACIÓN DE LAS CLAVIJAS OBJETO DE ESTUDIO	96
3.5.1	Clavija de acero roscada.....	96
3.5.2	Clavija de acero para la construcción.....	98
3.5.3	Clavija de acero al carbono no aleado y templado	99

3.5.4	Ensayos para la caracterización de las clavijas	101
3.5.4.1	Ensayos de tracción simple.....	101
3.5.4.2	Ensayos de dureza Vikers	102
3.5.4.3	Análisis metalográfico	104
3.6	REFUERZO CON ADHESIVOS	105
3.6.1	Características del adhesivo	105
3.6.2	Factores que afectan a la unión	106
3.6.3	Tipos de adhesivos	107
3.6.3.1	Adhesivos de contacto.....	110
3.6.3.2	Cianocrilato	110
3.6.3.3	Epoxi	111
3.6.3.4	Fenoles	111
3.6.3.5	Poliuretano	112
3.6.3.6	Polivinilo o cola vinílica.....	112
3.6.3.7	Resina de urea	112
3.6.4	Selección de adhesivos para uso estructural en clavijas.....	112
3.6.5	Integración de adhesivos en barras para el refuerzo de la madera estructural	115
3.6.5.1	Comportamiento mecánico.....	117
3.6.5.1.1	Capacidad de carga en barras sometidas a esfuerzos axiales.....	117
3.6.5.1.2	Capacidad de carga en barras sometidas a esfuerzos cortantes.....	120
3.6.5.1.3	Contenido de humedad y consecuencias derivadas	121
3.6.5.1.4	Temperatura.....	122
3.6.5.2	Fatiga	122
3.6.5.3	Corrosión	122
3.6.6	Características de los elementos de unión para facilitar la adherencia.....	122
3.6.7	Procesos de encolado.....	123
3.6.8	Unión con adhesivo.....	124
3.7	REFUERZO CON CONECTORES.....	127
3.8	REFUERZO CON SISTEMAS DE EXPANSIÓN	130
3.8.1	Expansión de camisa metálica.....	131
3.8.1.1	Sistema de expansión con avance por rosca con tuerca tronco-cónica	131
3.8.1.2	Sistema de expansión por cuña de golpeo o encastre.....	133
3.8.1.3	Sistema de roscado expansivo.....	133
3.8.2	Expansión por camisa plástica.....	134
3.8.3	Otros sistemas de expansión	136
3.8.3.1	Socavado	136
3.8.3.2	Remachado y roblonado.....	136
3.8.3.3	Expansión para huecos	137
3.8.3.4	Expansión por cuña de impacto	137
3.8.4	Tubo con expansión controlada.....	138
3.9	APLICACIÓN PRÁCTICA DE UNIONES EN ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN. EL CONJUNTO HISTÓRICO DE LAS DÁRSENAS DEL CANAL DE CASTILLA, EN ALAR DEL REY	140
3.9.1	Contexto y descripción de la estructura.....	141
3.9.2	Cálculo de la estructura.....	146
4	MODELOS NUMÉRICOS	151
4.1	INTRODUCCIÓN.....	151
4.2	DIMENSIONAMIENTO CON ECUACIONES ANALÍTICAS Y DE NORMATIVA	151
4.2.1	Planteamiento del problema	151
4.2.2	Implementación secuencial de las ecuaciones de dimensionado analítico	152

4.2.2.1	Datos de modelo de cálculo	152
4.2.2.2	Resistencias de cálculo	153
4.2.2.2.1	En las piezas de madera laterales	153
4.2.2.2.2	En la pieza de madera central	154
4.2.2.2.3	En la clavija	154
4.2.2.3	Cálculo de la capacidad de carga	154
4.2.2.4	Elementos de refuerzo	155
4.2.2.5	Deslizamiento de la unión	157
4.2.3	Herramienta de apoyo al cálculo numérico. Modelo de hoja de trabajo Mathcad®	158
4.2.4	Extensión del desarrollo analítico a hojas y libros de cálculo	160
4.3	APROXIMACIÓN A LOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	161
4.3.1	Estructura del método de elementos finitos	163
4.3.2	Aproximación al Método de los Elementos Finitos. Análisis del algoritmo de cálculo	164
4.4	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS EN TRES DIMENSIONES	172
4.4.1	Estructura del trabajo con Abaqus®	172
4.4.2	Construcción del modelo de unión con clavija en cortadura doble	174
4.4.2.1	Creación de piezas: módulo <i>Part</i>	174
4.4.2.2	Definición de los materiales y asignación a las piezas del modelo: módulo <i>Property</i>	175
4.4.2.3	Ensamblaje del conjunto de la unión: módulo <i>Assembly</i>	177
4.4.2.4	Etapas de análisis: módulo <i>Step</i>	181
4.4.2.5	Interacciones entre superficies: módulo <i>Interaction</i>	183
4.4.2.6	Condiciones de contorno y aplicación de carga sobre la unión: módulo <i>Load</i>	185
4.4.2.7	Generación de la malla de elementos finitos: módulo <i>Mesh</i>	186
4.4.2.8	Definición del trabajo y ejecución del cálculo: módulo <i>Job</i>	189
4.4.2.9	Visualización gráfica de resultados: módulo <i>Visualization</i>	190
4.4.2.10	Estructura de scripts y lenguaje <i>Python</i> ®	190
4.4.3	Subrutina para describir el comportamiento mecánico de la madera	191
5	METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS REALIZADOS	199
5.1	INTRODUCCIÓN	199
5.2	MÉTODOS DE ENSAYOS EN MADERA PARA USO ESTRUCTURAL	199
5.2.1	Métodos de ensayo para la determinación de las propiedades mecánicas	201
5.2.2	Ensayos de compresión y tracción paralela a la fibra	202
5.2.3	Ensayo de las propiedades en dirección perpendicular a la fibra	202
5.2.4	Ensayo de cortante en dirección paralela a la fibra	204
5.2.5	Determinación de las propiedades mecánicas a partir de las propiedades más representativas	205
5.2.6	Determinación de características mecánicas a partir de probetas libres de defectos	206
5.2.7	Tratamiento estadístico de los ensayos	208
5.3	ENSAYOS DE ELEMENTOS DE FIJACIÓN TIPO CLAVIJA	210
5.3.1	Modelos de referencia y fundamentos	210
5.3.1.1	Composición del ensayo para el cálculo de resistencia a aplastamiento por la clavija en la madera	210
5.3.1.2	Composición del ensayo para caracterizar la resistencia de la unión	212
5.3.1.3	Acondicionado de las probetas	214
5.3.1.4	Formas y dimensiones de las probetas	214
5.3.1.5	Control y verificación en las probetas	223
5.3.1.5.1	Control de humedad en la madera	223
5.3.1.5.2	Control de ejecución	224
5.3.1.5.3	Control de peso, humedad de la madera y variables ambientales	225
5.3.2	Procedimiento de carga	226
5.3.2.1	Estimación de la carga máxima y aplicación de la misma	226

5.3.2.2	Medición del deslizamiento y carga	227
5.3.2.3	Cálculos.....	227
5.3.3	Dispositivo de ensayos	228
5.3.3.1	Requerimientos en las máquinas de ensayos.....	228
5.3.3.2	Caracterización técnica de las máquinas empleadas para ensayos.....	228
5.3.3.2.1	Máquina empleada en ensayos controlados mediante velocidad de desplazamiento constante.....	229
5.3.3.2.2	Máquina empleada en ensayos de carga constante	235
5.3.4	Salidas de resultados.....	237
5.3.4.1	Descripción de la gráfica carga-deslizamiento.....	237
5.3.4.2	Informe del ensayo.....	240
5.3.4.2.1	Normalización de resultados	240
5.3.4.2.2	Sistema de gestión de informes.....	242
6	RESULTADOS	247
6.1	INTRODUCCIÓN.....	247
6.2	INFLUENCIA DE VARIABLES QUE AFECTAN A LA UNIÓN	247
6.2.1	Variables geométricas	250
6.2.1.1	Capacidad de carga de la unión en función de d y t_1	250
6.2.1.2	Capacidad de carga de la unión en función de d y t_2	253
6.2.1.3	Capacidad de carga de la unión en función del diámetro (d) y el ángulo de fibra (α)	254
6.2.1.4	Capacidad de carga de la unión en función de los espesores de las piezas de madera (t_1 y t_2)	256
6.2.1.5	Consideraciones respecto al diámetro de la clavija.....	257
6.2.2	Variables de propiedades resistentes del material	258
6.2.2.1	Capacidad de carga de la unión en función de la densidad de la madera (ρ_k).....	258
6.2.2.2	Capacidad de carga de la unión en función de la relación de materiales de madera (β)	260
6.2.2.3	Capacidad de carga de la unión en función de tensión última del acero ($f_{u,k}$).....	262
6.2.3	Influencia de las distintas variables desde un punto de vista analítico	264
6.2.4	Comentarios al modelo de Johansen	265
6.2.5	Evolución del efecto sogá.....	266
6.3	RESULTADOS DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS EN TRES DIMENSIONES.....	269
6.3.1	Evolución del modelo numérico de unión y ajustes.....	269
6.3.2	Comportamiento de las piezas de madera en el modelo de elementos finitos.....	276
6.3.2.1	Tensiones en las piezas de madera	276
6.3.2.2	Deformaciones en las piezas de madera	281
6.3.3	Comportamiento de la clavija en el modelo de elementos finitos	285
6.3.3.1	Tensiones en la clavija	285
6.3.3.2	Deformaciones en la clavija.....	290
6.3.4	Mejoras en el modelo de elementos finitos	292
6.4	RESULTADOS DE ENSAYOS	294
6.4.1	Resultados de muestras	294
6.4.2	Particularidades en los ensayos	298
6.4.3	Modificaciones sobre uniones en clavijas de madera laminada	302
6.4.4	Modificaciones sobre uniones en clavijas de madera maciza QL24h	304
6.4.4.1	Elementos complementarios.....	305
6.4.4.2	Variaciones de espesor de madera en piezas laterales (t_1)	306
6.4.4.3	Variaciones de diámetro (d)	308
6.4.4.4	Variaciones de ángulo de fibra	310
6.4.5	Evolución de la clavija durante el ensayo.....	314
6.4.5.1	Consideraciones al material de la clavija. La tensión $f_{u,k}$	314
6.4.5.2	Evolución de la deformación de la clavija.....	316

6.4.6	Espectro de resultados de los ensayos.....	318
6.4.6.1	Carga admisible de la unión.....	318
6.4.6.2	Trabajo realizado por la unión.....	321
6.4.6.3	Deslizamiento y módulo instantáneo de deslizamiento.....	324
6.5	ECUACIONES DE CARGA FRENTE A DEFORMACIÓN PARA CLAVIJA Y ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS	330
6.5.1	Evolución del momento plástico en la rótula de clavija con el estado de carga.....	340
6.5.2	Influencia del efecto sogá	350
6.5.2.1	Combinación de factores que contribuyen al efecto sogá	350
6.5.2.2	Factor sogá por fijaciones de extremo de clavija con tuerca y arandela	354
6.5.2.2.1	Pretensado en la clavija con fijación en extremos de tipo tuerca-arandela	354
6.5.2.2.2	Evolución de la fijación de clavija en las superficies de contacto entre madera y arandela	360
6.5.2.3	Factor sogá debido a fuerzas en la superficie de la clavija	365
6.5.2.3.1	Contribución de adhesivo en clavija	365
6.5.2.3.2	Contribución por rozamiento entre clavija y agujero	368
6.5.2.3.3	Contribución por incrustaciones en clavija	369
6.5.2.3.4	Contribución por expansión.....	372
6.5.3	Influencia de elementos en la dirección de la carga	373
6.5.3.1	Factor de resistencia en intercaras de madera.....	373
6.5.3.1.1	Contribución por rozamiento en las intercaras de madera	375
6.5.3.1.2	Contribución por conectores y placas dentadas.....	377
6.6	VALIDACIÓN DE RESULTADOS	379
7	CONCLUSIONES	385
7.1	INTRODUCCIÓN	385
7.2	CONSECUENCIA DE OBJETIVOS	385
7.3	CONCLUSIONES	389
7.4	PATROCINIOS Y COLABORACIONES	395
7.5	PUBLICACIONES Y CONGRESOS	396
7.6	LÍNEAS DE TRABAJO A FUTURO	397
	RELACIÓN DE ANEXOS.....	399
	ÍNDICE DE TABLAS.....	400
	ÍNDICE DE FIGURAS.....	403
	LISTA DE SÍMBOLOS	413
	LISTA DE REFERENCIAS.....	419