

Análisis Tensional de un Nudo de Esquina Rigidizado mediante barras Encoladas de un Pórtico Triarticulado de Madera

José G. Fueyo, José A. Cabezas, Manuel Domínguez, Manuel P. Rubio

Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Salamanca, Avda. de Requejo Nº33, Zamora 49022-España (e-mail: fueyo@usal.es)

Recibido Dic. 29, 2009; Aceptado Feb. 18, 2010; Versión Final recibida Sep. 27, 2010

Resumen

Este trabajo presenta el diseño para la rigidización, mediante barras de acero encoladas, de un nudo de esquina de un caso real de pórtico triarticulado de madera. Para realizar el estudio, se desarrollaron varios modelos paramétricos de elementos finitos de la zona que permitieran englobar todas las posibilidades. Del análisis de los resultados, se concluye la necesidad de la colocación de las barras, más concretamente de las exteriores, cuando se quiere que el nudo sea capaz de transmitir grandes solicitaciones sin superar los límites admisibles de la madera. Las barras transversales son necesarias para absorber los altos valores de tensiones tangenciales en la frontera pilar-dintel y de las tensiones perpendiculares a la fibra. Las barras interiores no parecen tener un papel tan importante, ya que la mayor parte del esfuerzo de compresión se transmite por contacto entre las superficies de la madera.

Palabras clave: uniones, madera, barras encoladas, elementos finitos

Analysis of the Stresses in a Beam-to-Column Connection Strengthened with glued-in rods of a three hinge Timber Frame

Abstract

This paper presents the design to get a beam-to-column connection stiffer using steel glued-in rods. Some parametric finite element models, which could comprise all the possibilities, were developed to carry out the work. From the analysis of the results, it can be observed the need for the glued-in rods, specially the exterior ones, when it is necessary that the joint resists great loads and moments without overcome the yielding strength limits of the timber. The transverse glued-in rods are necessary to resist the tangential and the perpendicular to the grain stresses in the border between the beam and the column. The interior glued-in rods seem to have a non important role, because the greater part of the compression forces in this area are transmitted by contact between the column and beam surfaces.

Keywords: joints, timber, glued-in rods, finite elements

INTRODUCCIÓN

Los métodos mecánicos usados para unir elementos estructurales de madera han ido evolucionando, desde los primitivos clavos y pernos, hasta sistemas más avanzados, como los conectores de anillo o placa. Los diversos avances realizados en esta materia tenían como finalidad proporcionar uniones capaces de resistir mayores esfuerzos con la mínima cantidad de materiales, y también conseguir nudos más rígidos, ya que habitualmente las uniones de madera se consideraban de tipo articulado, debido a su baja capacidad para transmitir momentos. El empleo de nudos rígidos o semirígidos implica normalmente estructuras más eficientes y económicas (Larsen y Jensen, 2000). En la actualidad, uno de los métodos más utilizados para obtener enlaces rígidos es el empleo de barras encoladas, especialmente en el caso de empotramientos de pilares o nudos de esquina en pórticos (Bainbridge et al., 2002; Harvey et al., 1998).

La rigidización de un nudo trae consigo una serie de beneficios, pero también tiene sus contrapartidas, como por ejemplo la dificultad de ejecución, el encarecimiento de la estructura y, en especial, el incremento de las distintas tensiones en la madera. Debe aquí recordarse que la madera se caracteriza por tener un comportamiento anisótropo, presentando diferentes resistencias en cada una de las direcciones con respecto a la de la fibra (USDA, 1998). En concreto, debe tenerse en cuenta la baja resistencia de la madera frente a esfuerzos perpendiculares a la dirección de la fibra, en especial para el caso de tracción.

El objetivo del presente trabajo ha sido analizar con detalle la influencia de distintas variables de diseño de nudos rigidizados. Más concretamente, se ha estudiado un nudo de esquina pilar-dintel rigidizado mediante barras de acero encoladas de una estructura real de madera de tipo pórtico triarticulado (figura 1). El diseño concreto del sistema de unión y refuerzo corresponde al propuesto por Aicher (1997), y está representado detalladamente en la figura 2. Consta de barras encoladas exteriores, interiores y transversales, de una placa de compresión y un elemento metálico de transmisión en la esquina exterior. Actualmente este tipo de uniones se utiliza cuando es necesario que los nudos de la estructura sean rígidos y capaces de absorber los momentos externos manteniendo las dimensiones globales del nudo dentro de unos valores aceptables. Antiguamente esto era más complicado, pero la experimentación realizada por varios autores durante los últimos años, empleando diversas combinaciones de elementos tales como barras, conectores varios, placas metálicas, tableros de madera o tableros de madera microlaminada contrachapados, ha permitido que hoy en día existan variedad de diseños posibles próximos al propuesto en el estudio de este artículo (Bainbridge y Mettem, 1998; Batchelar y McIntosh, 1988; Broughton y Hutchinson, 2001), quedando a la experiencia del diseñador la elección del más apropiado.

METODOLOGÍA

Para analizar cómo influyen en el valor de las tensiones las variables más significativas de la unión, es necesario contar con unos valores de referencia. Por ello, el primer paso ha consistido en obtener los resultados para el nudo rigidizado con unos valores concretos de dichas variables, teniendo así lo que se ha denominado modelo inicial. A partir del mismo, se modificarán las variables de interés, para determinar su influencia. En los siguientes subapartados se detallan los valores adoptados en el modelo inicial.

Materiales

El comportamiento mecánico de la madera viene determinado por su estructura microscópica, en la que destaca la presencia de fibras colocadas paralelamente a la dirección longitudinal del tronco, que hace que el material presente buena resistencia en la dirección de las fibras pero bastante menor en las perpendiculares. Además, entre estas últimas, por ser distinta la densidad en diferentes direcciones en un plano transversal del tronco, las características mecánicas también varían, provocando que se trate en realidad de un material anisotrópico (Thelandersson y Larsen, 2003; Bodig and Jayne, 1993). No obstante, a la hora de realizar los cálculos, se permite la simplificación de considerar que el material es ortotrópico, es decir, que presenta tres direcciones principales de elasticidad: axial (L), radial (R) y tangencial (T). Además, se supone que siempre que estemos por

debajo de ciertos niveles de tensiones, la madera tiene un comportamiento elástico lineal, descrito por la ley de Hooke mediante nueve constantes, cuyos valores dependen del tipo concreto de madera. La estructura considerada en este estudio se ha supuesto realizada con madera laminada encolada de clase resistente GL28h, de acuerdo a la normativa europea (EN 338), de manera que dichas constantes adoptan los siguientes valores: módulos elásticos longitudinales $E_L = 12600 \text{ N/mm}^2$, $E_R = 420 \text{ N/mm}^2$, $E_T = 420 \text{ N/mm}^2$, módulos elásticos transversales $G_{LR} = 780 \text{ N/mm}^2$, $G_{LT} = 780 \text{ N/mm}^2$, $G_{RT} = 83,6 \text{ N/mm}^2$, y coeficientes de Poisson $\nu_{LR} = 0,41$, $\nu_{LT} = 0,41$ y $\nu_{RT} = 0,51$.

La normativa mencionada establece también las resistencias características en las distintas direcciones, que se indican en la primera fila de la tabla 1. De acuerdo con el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1), las resistencias de cálculo se determinan mediante la ecuación 1.

$$f_d = k_{\text{mod}} \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (1)$$

donde el factor k_{mod} depende de la clase de servicio (que tiene en cuenta las condiciones ambientales) y la duración de la carga. Considerando que las cargas tienen duración permanente y clase de servicio 1, el Eurocódigo 5 proporciona $k_{\text{mod}} = 0,60$. La misma norma indica que el factor parcial de seguridad para madera laminada encolada debe ser $\gamma_m = 1,25$. Con estos valores, se obtienen las resistencias de cálculo indicadas en la segunda fila de la tabla 1.

Por su parte, el acero empleado en las barras encoladas se considera que tiene un comportamiento elástico isótropo lineal, caracterizado por el módulo elástico $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ y coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. En cuanto a su resistencia, el límite elástico depende de la calidad de acero utilizada. En el estudio se ha supuesto que las barras roscadas son de clase 6.8 según el Eurocódigo 3 (EN 1993-1-8), de manera que sus resistencias características y de cálculo son respectivamente $f_y = 480 \text{ N/mm}^2$ y $f_{yd} = 457 \text{ N/mm}^2$, como también se recoge en la tabla 1.

Geometría y cargas

El nudo de esquina estudiado pertenece a un pórtico triarticulado, con las dimensiones geométricas indicadas en la figura 1. En cuanto a las cargas que actúan sobre la estructura, se han considerado las debidas al peso propio, sobrecarga de uso, viento y nieve, que han sido calculadas siguiendo las indicaciones del Eurocódigo 1 (EN 1991). Una vez determinadas las cargas simples, éstas se combinan siguiendo las indicaciones de la citada normativa, y se procede a determinar los máximos momentos, axiles y cortantes en los distintos elementos. En este caso, el cálculo se ha realizado con el programa comercial de cálculo matricial Metal3D de Cypecad, obteniéndose que los máximos valores que alcanzan las sollicitaciones de cálculo en el nudo, para la peor de las combinaciones posibles, son: momento flector $M_d = 630 \text{ kN.m}$, axil de compresión $N_d = 155 \text{ kN}$ y cortante $T_d = 144 \text{ kN}$.

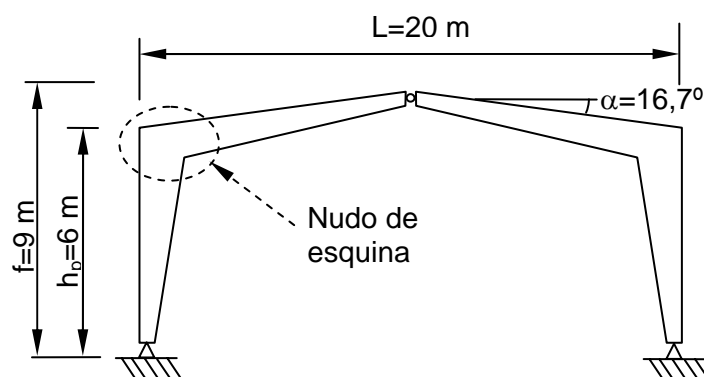


Fig. 1: Dimensiones del pórtico triarticulado real estudiado.

La unión entre las dos piezas de madera que concurren en el nudo de esquina se realiza mediante un enlace de tipo híbrido, que incluye, en cada una de las piezas, dos parejas de barras encoladas exteriores, una pareja de barras transversales y otra de barras interiores. Consta además de una placa metálica situada entre las dos piezas de madera en la parte interior del nudo (que facilita la transmisión de los esfuerzos de compresión debidos a la combinación del flector más el axil) y de otro elemento metálico de transmisión en la esquina exterior. La posición y dimensiones de los distintos componentes pueden observarse en la figura 2.

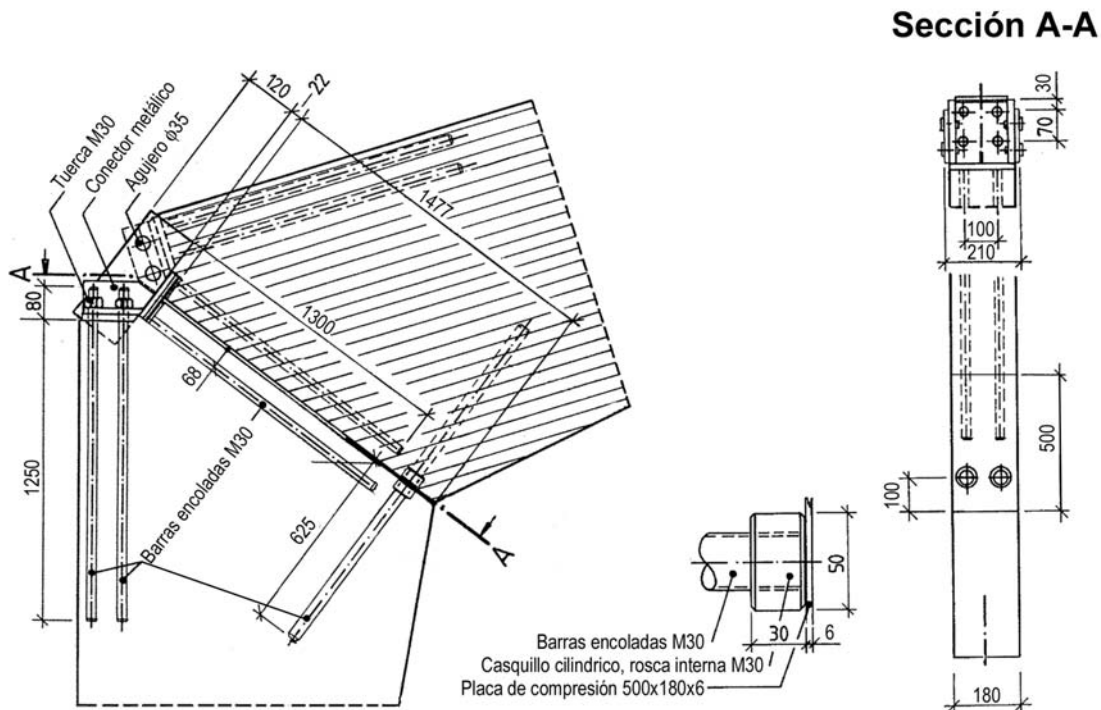


Fig. 2: Diseño del nudo estudiado: geometría (longitudes en mm) y barras (Aicher, 1997).

Modelo de elementos finitos

Como el objetivo es analizar únicamente la parte de la estructura correspondiente al nudo, se modelizó sólo este tramo, separándolo del resto de la estructura mediante dos secciones de corte. A estas secciones de corte llegarán los momentos, axiles y cortantes que les transmite el resto de la estructura. Dado que las dimensiones del modelo de nudo son pequeñas frente a las de la estructura total, estas solicitaciones no diferirán mucho de los valores en el nudo, indicados en el apartado anterior. Por la misma razón, para estudiar el modelo, puede suponerse que éste se encuentra empotrado en una de las secciones de corte, considerando que las solicitaciones están aplicadas en la otra sección. Así pues, en el modelo considerado del nudo, que se muestra en la figura 3, se han impedido todos los desplazamientos en la sección de corte del pilar, mientras que las solicitaciones se introducen como cargas distribuidas en la sección de corte del dintel.

La figura 3 muestra también el modelo ya mallado. Para las piezas de madera se tomaron elementos "C3D8R" de la biblioteca de elementos del programa (ABAQUS, 2006) que son de tipo sólido tridimensional con 8 nodos por elemento y control de integración reducida, definiendo un comportamiento mecánico del tipo elástico lineal y ortótropo, con las constantes mecánicas indicadas antes, en el apartado de materiales. Estos tipos de elementos con integración reducida, pueden dar lugar a fenómenos denominados "shear locking". Para evitarlo los elementos disponen de mecanismos basados en una variable auxiliar encargada de oponer cierta energía artificial ante este tipo de deformaciones indeseadas. No obstante, si la energía "artificial" almacenada es demasiado

alta, el procedimiento puede dejar de funcionar correctamente y el cálculo dejar de ser realista. Este problema se resuelve refinando la malla y modificando ligeramente la entidad geométrica que lo origina. En nuestro modelo, para el tipo de elemento y tamaño de malla elegido, tras la realización de numerosos estudios, no se observaron problemas de este tipo. Por su parte, para las barras se utilizaron elementos *beam* de código "B31" que son elementos unidimensionales en el espacio con funciones de forma lineales que consideran las deformaciones transversales debidas a cortante. Finalmente, la pieza metálica encargada de unir todas las barras de la parte exterior del nudo y la que trabaja a compresión en el interior se mallaron con elementos "S4R" que son de tipo cascara, cuadrados, de cuatro nodos, con integración reducida con formulación adecuada para grandes deformaciones. Todas estas partes pueden verse en la figura 3 izquierda.

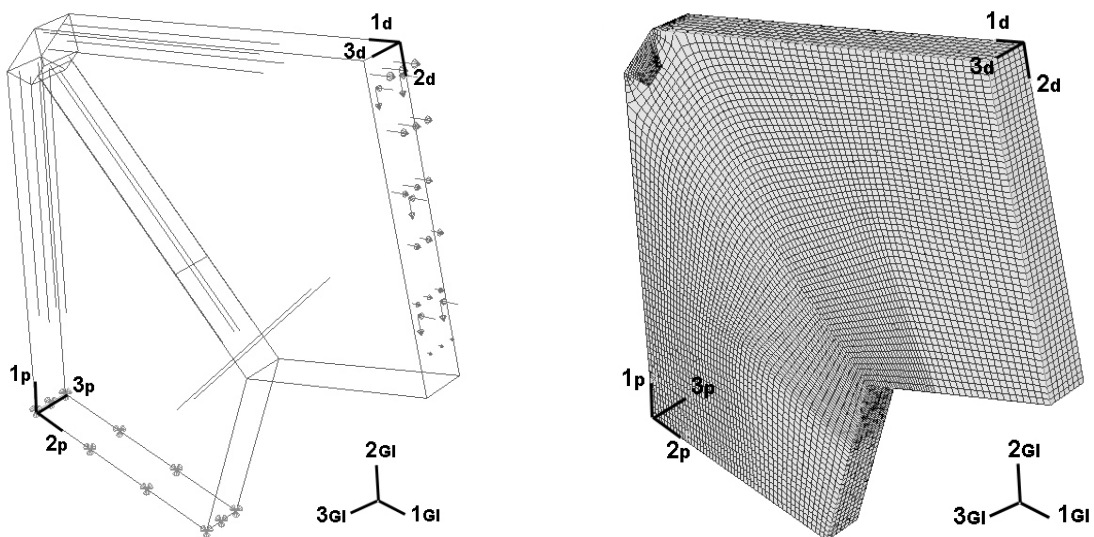


Fig. 3: Modelo de elementos finitos con sus partes, cargas, condiciones de contorno y malla.

Respecto al tamaño de la malla, hay que tener en cuenta que, cuanto más fina sea, dará lugar a mejores resultados, pero implicará un mayor tiempo de cálculo. Este punto supone una limitación, dado el gran número de veces que hay que repetir los cálculos de los modelos para analizar las modificaciones realizadas sobre las variables en estudio. Por ello, el primer paso fue realizar un estudio de convergencia, llegándose a determinar que una malla con elementos de 25 mm de lado permitía obtener unos resultados suficientemente buenos. El mallado de las placas y barras fue un poco más fino, puesto que en este caso no implican gran número de elementos y por tanto apenas penalizan la velocidad de cálculo. Las barras quedaron unidas a la madera mediante la orden "Embedded region". Cuando se utiliza esta orden los grados de libertad de los nodos de los elementos embebidos quedan acoplados a los grados de libertad de los nodos próximos de los elementos de la región que actúa como anfitrión o "host". Por su parte la unión de las placas con los extremos de las barras se hizo con el comando "Tie" que hace que los nodos de la region elegida como "slave", se fundan con los nodos próximos de la región definida como master, dentro de un rango de distancia que se indica a través de los menus de dialogo del programa. Como se observa son dos técnicas que persiguen el mismo objetivo: acoplar los desplazamientos de regiones pertenecientes a diferentes partes del sistema mediante procedimientos diferentes.

Al mallar las piezas de madera, un punto importante a tener en cuenta es la correcta definición de los sistemas coordenados que definen las direcciones principales del comportamiento mecánico ortótropo. Por ello, además de un sistema global, se definieron, en cada una de las piezas de madera, sendos sistemas locales, con el eje 1 según la dirección longitudinal de las piezas, que coincide con la de las fibras. En la figura 3 pueden observarse estos sistemas coordenados tanto para el dintel como para el pilar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de los estudios realizados en este trabajo de investigación. En primer lugar, se describen los correspondientes al modelo inicial, que sirven de

referencia para analizar, en los siguientes subapartados, cómo afecta la modificación de las variables más significativas (número de barras y sus dimensiones) a las tensiones en las piezas de madera.

Modelo inicial con todas las barras.

Habitualmente, las tensiones que más interesa conocer son las normales en la dirección de la fibra σ_{11} , puesto que son las encargadas de transmitir las sollicitaciones principales que llegan al nudo (Del Senno et al., 2004). No obstante, en el caso de la madera, también son muy importantes las perpendiculares a la fibra σ_{22} , especialmente peligrosas por la baja resistencia del material en esta dirección, y las tangenciales τ_{12} . La figura 4 muestra sus valores en el dintel, habiéndose obtenido resultados similares en el pilar. Estas tensiones están referidas a los respectivos sistemas locales de las piezas de madera, también mostrados en la figura. En el caso de las tensiones tangenciales, la orientación de las mismas es tal que el signo es positivo si el giro que provocan es levogiro alrededor del eje 3 y negativo si es dextrogiro. Así mismo, en la primera figura se han representado las tensiones de Von Mises en el nudo completo, incluyendo las partes metálicas.

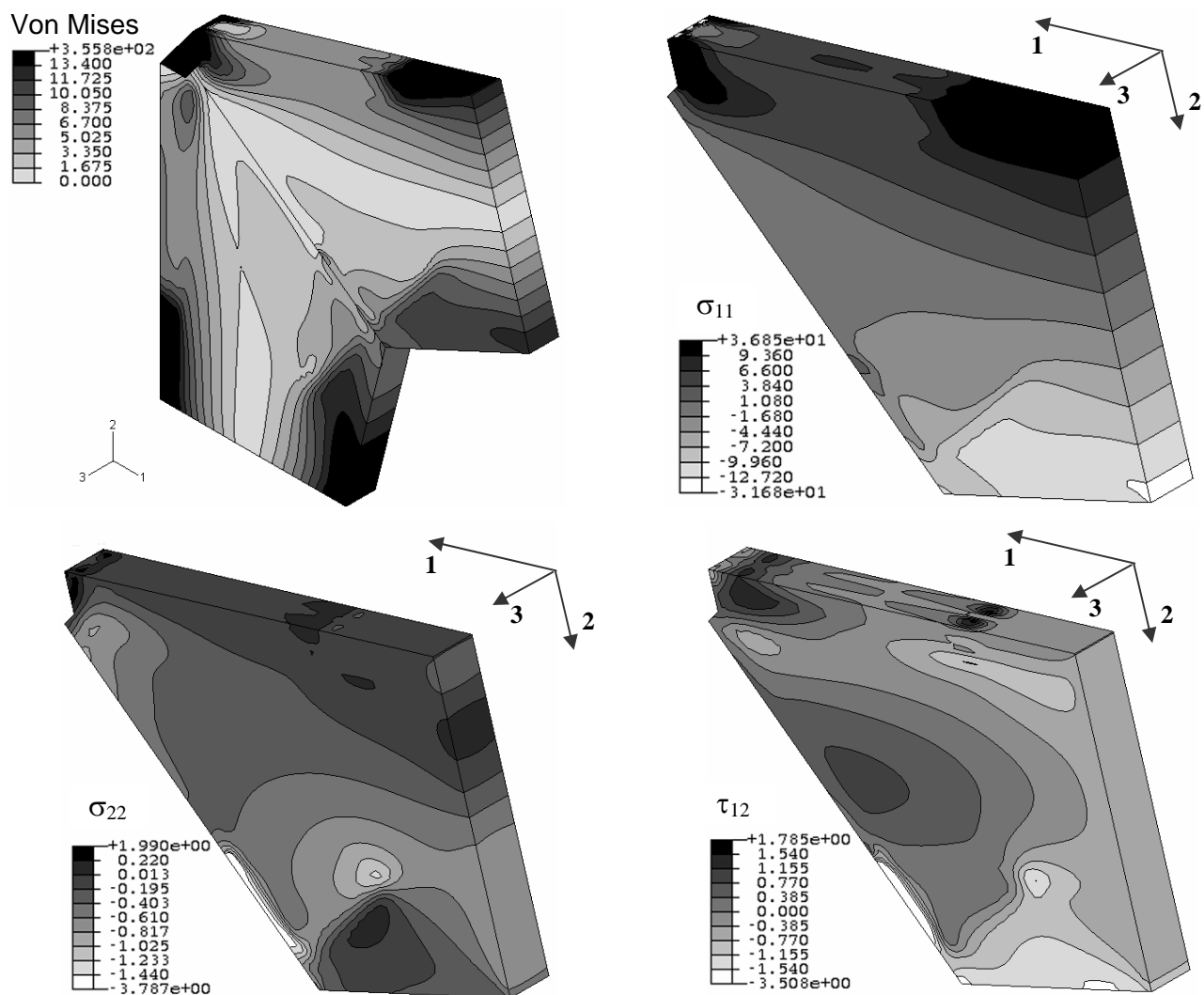


Fig. 4: Tensiones en el nudo completo y en el dintel para el caso inicial (N/mm^2).

En las representaciones de la figura 4, los límites de las escalas de tensiones corresponden con las resistencias de cálculo para cada tipo de esfuerzo, indicadas en la tabla 1. Si se superan estos límites en alguna posición de las piezas, el programa de postprocesado aumenta automáticamente la escala hasta los valores máximos alcanzados, representándose la zona en blanco para valores negativos y en negro para valores positivos. Vemos en las escalas que se han superado las resistencias de cálculo, pero las zonas donde esto ocurre son muy pequeñas. Analizando los resultados con más detalle, se observa que los valores máximos se producen en pequeñas zonas

muy localizadas en la unión de las barras y las placas metálicas. Consideramos que esta alta concentración de tensiones es debida a que las barras se han modelado como elementos unidimensionales. Por eso, en los ensayos de convergencia que se han realizado con mallas cada vez más finas, las tensiones máximas no tendían a un límite definido. Para evitar este problema, como lo que interesa estudiar es el efecto de las barras encoladas sobre las tensiones en la madera, se han definido unos volúmenes en torno a las barras, denominados zona de tracción (z.t.), zona de compresión (z.c.) y zona de cortantes y tensiones perpendiculares a la fibra (z.p.) en la figura 5, tomando como dato relevante las tensiones medias en cada una de estas zonas. Se ha constatado que el tamaño de malla apenas afecta a dichos valores medios. En la tabla 1 se indican los valores de las tensiones en este modelo inicial, que allí se ha denominado caso 1. Se han incluido los tensiones máximas (que corresponden con los extremos de las escalas de la figura 4) y los valores medios de las tensiones en las zonas (z.t.), (z.c.) y (z.p.), indicándose a qué zona corresponde. Puede observarse que, para todas las tensiones, dichos valores medios son menores que las correspondientes resistencias de cálculo. Lo mismo ocurre en las barras encoladas, tanto para las tensiones medias y como máximas. En cualquier caso, como estas altas tensiones ocurrirían en zonas muy limitadas, en ellas se producirían pequeñas plastificaciones y aplastamientos, que supondrían una redistribución de las tensiones, sin que el comportamiento para la práctica totalidad del volumen de madera, que se encuentra por debajo de los límites admisibles, se viera apenas afectado (Serrano, 2001).

Influencia de la presencia de las barras.

En la segunda parte del estudio, se han desarrollado otros modelos suprimiendo sucesivamente diferentes parejas de barras, con objeto de analizar cómo la eliminación de parte de las barras sobrecarga o no a las que restan y a la madera. Más concretamente, se han considerado los siguientes casos:

- Caso 1: Modelo inicial con todas las barras.
- Caso 2: Modelo inicial suprimiendo las barras transversales.
- Caso 3: Modelo inicial sin barras transversales ni interiores.
- Caso 4: Modelo inicial sólo con las barras exteriores superiores.
- Caso 5: Modelo inicial sólo con las barras exteriores inferiores.
- Caso 6: Modelo inicial sin ninguna barras.

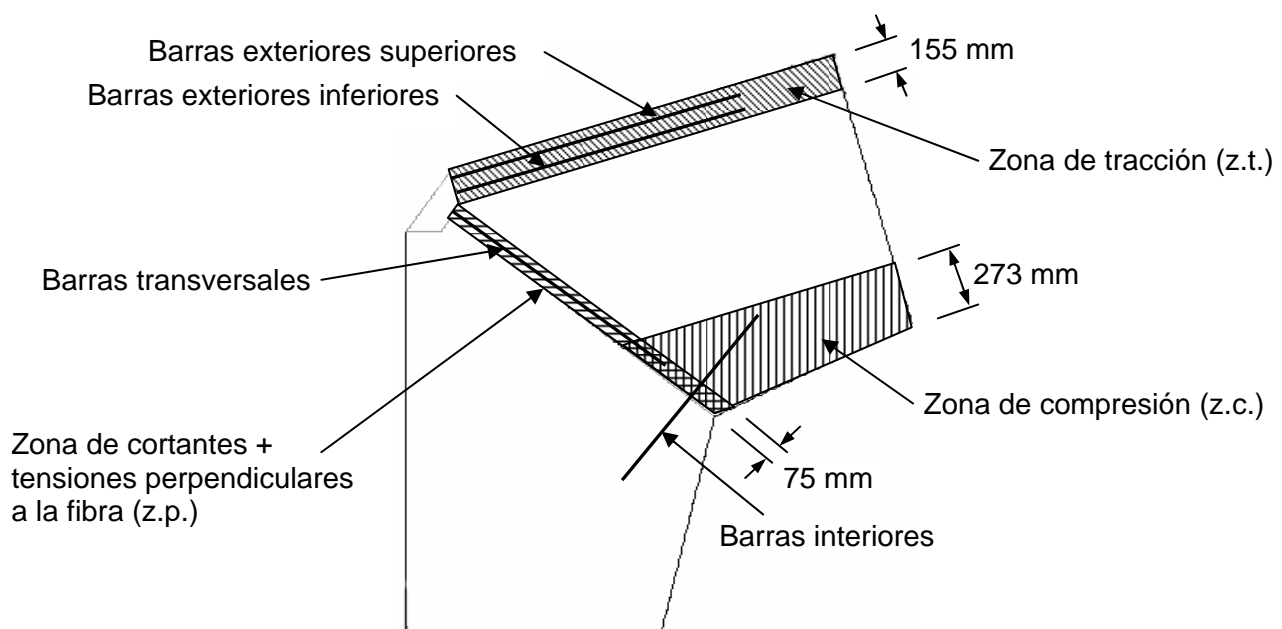


Fig. 5: Volúmenes elegidos en la madera para el cálculo de las tensiones medias.

En los casos 3, 4 y 5, que no incluyen barras interiores, se considera que el dintel y pilar se encuentran unidos en esta zona, a través de algún tipo de cola, a ambas caras de la placa a compresión. Para el caso 6, sin ninguna barra, se hizo necesario un nuevo modelo del nudo, donde se eliminaban todas las partes metálicas, barras y placas, y se consideraba todo el nudo compuesto únicamente por madera, quedando las superficies de contacto de dintel y pilar firmemente unidas mediante cola.

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos para las tensiones en los distintos casos. Como se ha justificado anteriormente, los valores relevantes son las tensiones medias. En relación a la madera, la tabla 1 indica la mayor de las tensiones medias en las zonas alrededor de las barras.

Tabla 1: Resistencias y tensiones máximas y medias en la madera y en las barras (N/mm²).

		Tensiones en el dintel					Tensiones en las barras			
		Tracción paralela (z.t.)	Compres. paralela (z.c.)	Tracción perpend. (z.p.)	Compres. perpend. (z.p.)	Cortante (z.p.)	Exteriores superiores	Exteriores inferiores	Interiores	Transvers.
Resistencia característica		19,50	-26,50	0,45	-3,00	3,20	480,00	480,00	480,00	480,00
Resistencia de cálculo		9,36	-12,72	0,22	-1,44	1,54	457,14	457,14	457,14	457,14
Caso 1	Tensión máxima	36,85	-31,68	1,99	-3,79	-3,51	102,40	170,50	-215,30	-205,70
	Tensión media	8,76	-7,89	-----	-0,93	-0,65	80,49	103,40	-71,80	-166,46
Caso 2	Tensión máxima	29,89	-21,40	0,62	-7,71	-4,11	139,19	245,17	-328,19	-----
	Tensión media	9,08	-6,29	-----	-1,82	0,52	107,12	98,63	-110,40	-----
Caso 3	Tensión máxima	30,79	-40,30	-----	-8,29	-8,67	149,07	247,68	-----	-----
	Tensión media	9,35	-8,12	-----	-2,86	-0,66	115,25	101,77	-----	-----
Caso 4	Tensión máxima	43,35	-43,20	0,15	-11,10	-9,27	233,56	-----	-----	-----
	Tensión media	10,58	-8,06	-----	-2,71	-0,71	169,60	-----	-----	-----
Caso 5	Tensión máxima	24,97	-41,70	-----	-9,79	-8,97	-----	228,30	-----	-----
	Tensión media	11,80	-8,08	-----	-2,96	-0,63	-----	141,14	-----	-----
Caso 6	Tensión máxima	16,68	-41,90	2,20	-19,00	-15,78	-----	-----	-----	-----
	Tensión media	11,93	-9,32	-----	-4,14	-0,54	-----	-----	-----	-----

Empecemos viendo cómo trabajan las barras. En las barras exteriores se observa que en el modelo inicial con todas las barras (Caso 1) las que más trabajan son las inferiores, del orden de un 28% más que sus compañeras, pero, al empezar a eliminar barras, primero las transversales (Caso 2) y luego las interiores (Caso 3), esta tendencia se invierte, pasando a ser las superiores las más cargadas, con un 8% y un 13% más de carga respectivamente. Además, mientras que las barras inferiores apenas ven modificado su nivel de tensiones medias, las superiores se sobrecargan un 33% (Caso 2) y un 43% (Caso 3). Por su parte, en el caso de las barras interiores, el efecto más significativo es que al eliminar las barras transversales (Caso 2) aparece un incremento del 53% en sus tensiones medias de compresión.

Respecto del efecto sobre la madera de la presencia o ausencia de las diferentes barras, comenzamos analizando la tracción en la dirección de la fibra. En la tabla 1, al eliminar progresivamente las barras, se observan sucesivos incrementos en las tensiones medias dentro de la zona de estudio (z.t.), hasta alcanzar un incremento total del 36% en el Caso 6. Inversamente, tomando como referencia el nudo sin ninguna barra (Caso 6) con objeto de cuantificar el efecto de la incorporación de las mismas, este porcentaje corresponde a una reducción de tensiones del 27% al incluir todas (Caso 1). Además, la resistencia de cálculo se supera en los casos 4, 5 y 6, no siendo por tanto adecuado el diseño del nudo.

En cuanto a la compresión en la dirección de la fibra, la tendencia en las tensiones medias en la zona de estudio (z.c.) es algo distinta al caso de tracción. Cada eliminación de barras apenas supone una variación apreciable en las tensiones, salvo el caso de eliminar las barras transversales que implica incluso una disminución de las mismas. Entre el Caso 1, con todas las barras, y el Caso 6, sin

ninguna, el incremento de tensiones medias se sitúa en el 18%, no superándose en ningún caso la resistencia de cálculo.

En relación a las tensiones de tracción en la dirección perpendicular a la fibra se observó que al menos en tensiones medias y en el volumen de estudio (z.p.) no se daban este tipo de tensiones. Sí que aparecen en cambio en otras zonas puntuales, pero como en los casos indicados antes, son zonas muy pequeñas cuya influencia en el comportamiento global del nudo puede despreciarse, y en cualquier caso están fuera de la zona de influencia de las barras transversales.

Respecto a la compresión en la dirección perpendicular a la fibra se observa que la eliminación de las barras transversales, Caso 2, implica un incremento de un 95% de las tensiones medias en la zona de estudio (z.p.). Dicho porcentaje aumenta hasta un 307% con respecto al Caso 1 si además de las barras transversales se eliminan las inferiores (Caso 3). Finalmente, el incremento llega hasta el 445% en el Caso 6 (sin ninguna barra). En todos casos salvo el modelo inicial, el nivel de tensiones medio supera a la resistencia de cálculo. Por tanto, para que el diseño del nudo sea admisible, no es posible suprimir ninguna barra.

Debe indicarse que la combinación de acciones empleada, que es la más desfavorable para la estructura puesto que es la que da lugar a mayores momentos, es tal que provoca tensiones normales perpendiculares a la fibra σ_{22} de compresión. No obstante pueden existir combinaciones de cargas que inviertan el signo de este tipo de tensiones pasando a ser éstas de tracción. La resistencia a tracción perpendicular a la fibra es entre seis y siete veces menor que a compresión en las clases de madera laminada encolada. En consecuencia la existencia de estos esfuerzos de tracción es extremadamente peligrosa pues alcanzarían fácilmente los límites admisibles provocando la aparición de las fendas, situación que debe evitarse. Para estos casos resulta absolutamente necesaria la colocación de las barras transversales.

Finalmente, analizando en la tabla 1 los valores medios en (z.p.) de las tensiones tangenciales sólo se observan pequeñas diferencias entre los distintos casos, pero esto es debido a que las regiones de tensiones tangenciales positivas se contrarrestan con las negativas. Estudiando con detalle las representaciones gráficas de las tensiones, se observa que las diferencias en tensiones absolutas sí que son apreciables, y que las tensiones máximas se distribuyen en amplias zonas (ya no son puntos aislados de tamaño despreciable). Por ello, resulta más significativo trabajar con los valores máximos de las tensiones. Así vemos que, del Caso 1 (todas las barras) al Caso 6 (ninguna), el incremento de las tensiones tangenciales máximas es del 296%, superándose en todos los casos la resistencia de cálculo del material para este tipo de esfuerzo. Sobre este punto se profundizará en el apartado siguiente.

Influencia de la longitud de las barras.

Puesto que los dos tipos de barras cuya presencia afecta más significativamente a las tensiones son las exteriores y las transversales, se ha realizado un estudio del efecto de la longitud de las mismas, intentando determinar hasta qué valores tiene interés incrementar su medida.

En el caso de las barras exteriores, se ha variado su longitud desde 250 mm hasta 1750 mm. Los resultados obtenidos para las tensiones medias en las barras exteriores y σ_{11} en el dintel (z.t.) están representados en la imagen izquierda de figura 6 en relación a sus respectivos límites resistentes. Se han incluido también las tensiones en la madera del dintel del caso de longitud cero, es decir, si no hay barras exteriores.

La representación derecha de la figura 6 muestra los resultados de un estudio similar, variando la longitud de las barras transversales entre 300 mm y 1300 mm. No se ha podido aumentar más su longitud, para no interferir con las barras interiores. En este caso, mientras las tensiones en las barras y las normales perpendiculares a la fibra σ_{22} en el dintel (z.p.) siguen siendo medias, para las tangenciales τ_{12} se han tomado los valores máximos, que son los representativos como se justificó en el subapartado anterior. Se han representado también los valores correspondientes al modelo con

todas las barras menos las transversales (Caso 2, longitud de barra cero en la figura), y cuando el nudo no se ha reforzado con ninguna barra (Caso 6).

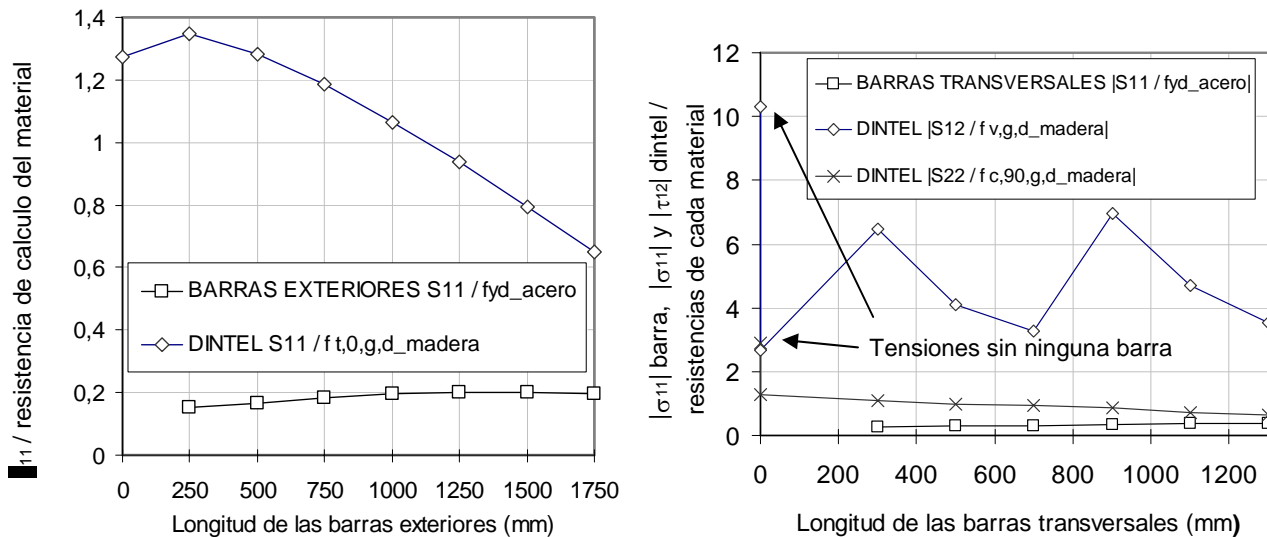


Fig. 6: Variación de las tensiones en función de la longitud de las barras exteriores y transversales.

Al aumentar la longitud de las barras exteriores, se observa como las tensiones medias en ellas van creciendo hasta alcanzar un máximo de casi 92 N/mm^2 , para 1250 mm de longitud, que es bastante inferior a la resistencia de cálculo del material. Por su parte, en la madera, que es donde realmente interesa conocer el valor de las tensiones, comparadas con las correspondientes al caso sin barras, hay un leve incremento de las mismas para longitudes de barras cortas (concretamente, de un $5,6\%$ para 250 mm), y después decrecimiento constante hasta llegar a una reducción cercana al 50% para barras de 1750 mm . La tensión se encuentra por debajo de la resistencia de cálculo ($9,36 \text{ N/mm}^2$), resultando el diseño admisible, si la longitud es mayor de 1250 mm , correspondiente a un 84% del ancho del nudo.

En cuanto a la influencia sobre las tensiones de la longitud de las barras transversales, vemos que la tensión se va incrementando en éstas hasta alcanzar casi los 175 N/mm^2 de tensión media para barras de longitud 1100 mm , disminuyendo ligeramente para 1300 mm . Por su parte, en la madera, el comportamiento es diferente en las tensiones normales perpendiculares a la fibra y en tangenciales. Para las primeras, cuando no existen barras transversales (Caso 2), la tensión normal media en (z.p.) es de $1,82 \text{ N/mm}^2$; y, a medida que la longitud de estas aumenta, la tensión disminuye progresivamente, desde $1,56 \text{ N/mm}^2$ para 300 mm hasta $0,93 \text{ N/mm}^2$ para la longitud final de 1300 mm . Si la longitud es mayor de 500 mm , correspondiente a un 34% del ancho del nudo, la tensión normal es menor que la resistencia de cálculo ($1,44 \text{ N/mm}^2$), siendo el diseño adecuado.

Las tensiones tangenciales presentan dos diferencias. En primer lugar, como ya se justificó en el modelo inicial, se debe trabajar con tensiones máximas, ya que las medias no son significativas. En cuanto al comportamiento, se observa que, justo debajo de donde acaba la barra aparece una zona localizada de altas tensiones tangenciales. Esta situación puede verse claramente en la figura 7.c, y se mantiene al aumentar la longitud de las barras transversales. De ahí la variación bastante errática que muestra la figura 6. En todos los casos estas tensiones máximas superan la resistencia de cálculo del material ($1,54 \text{ N/mm}^2$); aunque, para la mayor longitud considerada (1300 mm), la zona donde se sobrepasa este límite es puntual (figura 7.d), pudiendo admitirse. Por esta razón, las barras transversales deben tener siempre una longitud suficiente como para cubrir el ancho del nudo.

La zona de máximas tensiones cortantes cambia según las distintas configuraciones de las barras. Para observarlo, en la figura 7 se muestran dichas tensiones en las siguientes situaciones: sin ninguna barra (Caso 6), todas menos las transversales (Caso 2), transversales de longitud media y transversales de gran longitud (Caso 1). Cuando no se utilizan barras (figura 7.a), la tensión tangencial máxima tiene un valor muy alto (casi -16 N/mm^2), muy por encima de la resistencia de

cálculo ($1,54 \text{ N/mm}^2$), y se localiza en la unión entre las dos piezas de madera en la parte interior del nudo. Cuando se colocan todas las barras menos las transversales (figura 7.b), la tensión tangencial máxima se reduce hasta un valor de $4,11 \text{ N/mm}^2$ en el volumen de estudio (z.p.), pero aparece una nueva posición de altas tensiones tangenciales, que superan el valor de 10 N/mm^2 , en la zona de arranque de las barras externas. Las otras dos configuraciones de la figura 7 ya han sido comentadas.

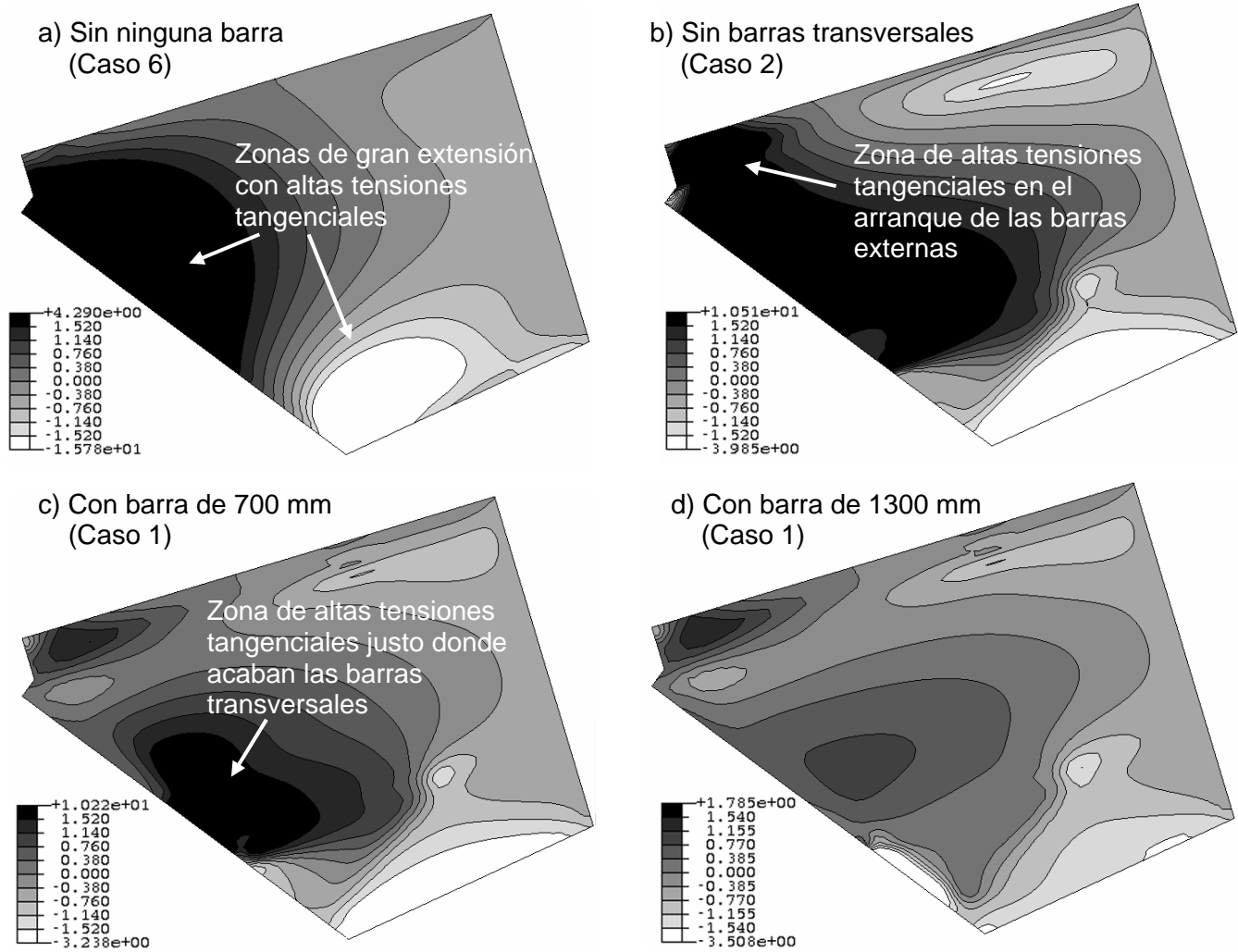


Fig. 7: Tensiones tangenciales en función de las barras transversales.

CONCLUSIONES

Respecto a la necesidad de utilizar barras externas se ha comprobado que sólo en los tres primeros casos analizados, en los que existen tanto las barras externas superiores como las inferiores, las tensiones medias en la zona de las barras no superan la correspondiente resistencia de cálculo. Por tanto, para que el diseño del nudo sea adecuado, ha sido preciso disponer todas las barras externas. Respecto a su longitud, las tensiones disminuyen por debajo de la resistencia de cálculo con barras de longitud mayor que el 84% del ancho del nudo.

En cuanto a las barras internas, su efecto es más limitado, ya que la mayor parte del esfuerzo de compresión paralelo a la fibra se transmite a través del contacto de las maderas con la placa de compresión. En todos los casos estudiados, incluso sin barras, las tensiones de compresión paralela a la fibra no superan la correspondiente resistencia de cálculo.

En cuanto a las barras transversales se ha comprobado que, si se eliminan, las tensiones de compresión perpendiculares a la fibra superan la resistencia de cálculo. Respecto a su longitud, para no superar dicha resistencia, deben superar al menos el 34% del ancho del nudo. Además,

especialmente peligroso es el caso si las tensiones perpendiculares a la fibra que aparecen son de tracción, ya que la resistencia de la madera es aún menor en este caso, siendo este tipo de esfuerzo uno de los más peligrosos en estructuras de madera.

En relación a las tensiones tangenciales, la ausencia de barras, en especial de las transversales, provoca un considerable aumento de sus valores, ya de por sí altos. De hecho el diseño sólo resulta admisible si estas barras cubren todo el ancho del nudo.

REFERENCIAS

ABAQUS *User's Manual, versión 6.6.*, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket, USA (2006).

Aicher, S., V. Bornschlegl y J. Herr, *Entwicklung leistungsfähiger, geklebter Verbindungen für Rahmenecken und Stützenanschlüsse unter Verwendung hochfester Anschlußelemente / FMFA Baden-Württemberg*. Stuttgart, Forschungsbericht (1997)

Bainbridge, R., C. Mettem, K. Harvey y M. Ansell, *Bonded-in rod connections for timber structures—development of design methods and test observations*. International Journal of Adhesion & Adhesives 22: 47–59 (2002)

Bainbridge, R. J. y C. Mettem, *A review of moment-resistant structural timber connections*, Structures and Buildings Eng., Vol. 128, 4: 323-331 (1998)

Batchelar, M.L. y K.A. McIntosh, *Structural joints in glulam*, Proceedings of the 5th World conference in Timber Engineering, Montreux, 17–20 August: 1: 289–296 (1988)

Bodig J. y Jayne B.A. *Mechanics of wood and wood composites*, Krieger Publishing Company; 1993.

Broughton, J.G. y A.R. Hutchinson, *Adhesive systems for structural connections in timber*, International Journal of Adhesion & Adhesives 21: 177-186 (2001)

Del Senno, M., M. Piazza y R. Tomasi, *Axial glued-in steel timber joints—experimental and numerical analysis*, Holz Roh Werkst 62: 137–146 (2004)

EN 1991 *Eurocode 1, Actions on Structures*, European Committee for Standardization, Bruselas, Belgica (2001).

EN 1993-1-1 *Eurocode 3, Design of Steel Structures. Part 1-8, Design of joints*, European Committee for Standardization, Bruselas, Belgica (2005).

EN 1995-1-1 *Eurocode 5, Design of Timber Structures. Part 1-1*, European Committee for Standardization, Bruselas, Belgica (2004).

EN 338, *Structural Timber Strength. Classes*, European Committee for Standardization, Bruselas, Belgica (2003).

Harvey K., M.P. Ansell, A.R. Hutchinson y J.G. Broughton, *Improved timber connections using bonded-in rods*. Proceedings of the 5th WCTE, Montreux, August, (1998)

Larsen, H.J. y J.L. Jensen, *Influence of Semi-rigidity of Joints on the Behaviour of Timber Structures*, Prog. Struct. Engng. Mater.: 2, 267-277 (2000).

Serrano E., *Glued-in rods for timber structures—an experimental study of softening behaviour*, Mater Struct 34: 228–234 (2001)

Thelandersson, S. y H.J. Larsen, *Timber Engineering*, Wiley & Sons (2003).

USDA, Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI (1998).