



---

**UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ÁVILA

*- GRADO EN INGENIERÍA CIVIL -*



**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE  
LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A  
PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA  
CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

Alumno: Jorge López Rebollo

Tutor: Dr. Alberto Villarino Otero

Julio de 2018



**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE  
LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A  
PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA  
CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

Alumno: Jorge López Rebollo

Tutor: Dr. Alberto Villarino Otero

Julio de 2018



# RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado se expone una metodología para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera, valores fundamentales para poder llevar a cabo cálculos estructurales con este tipo de material. Para ello se implementa la Correlación Digital de Imágenes en los ensayos de compresión, llevándose a cabo en el estudio de la madera del Pino Carrasco (*Pinus halepensis*).

Se propone el uso de la Correlación Digital de Imágenes como técnica de medición de deformaciones en sustitución de otras técnicas convencionales (como las galgas extensiométricas o los sensores ópticos) debido a su carácter no invasivo, no destructivo y de bajo coste.

Para ello, se realizan ensayos conjuntos de compresión axial (paralelos a las fibras) y Correlación Digital de Imágenes en 20 probetas normalizadas según la norma UNE, pudiendo evaluar de manera sincronizada las cargas aplicadas en función del tiempo con las deformaciones originadas.

Tras el tratamiento de los datos obtenidos se determinan los valores del Módulo de Elasticidad, la Resistencia Máxima a compresión paralela a las fibras y las deformaciones para cada uno de los ensayos. Con el estudio estadístico posterior, se obtienen los valores característicos de esta madera, lo que permite validar dicha metodología pudiéndose emplear en la obtención de las propiedades mecánicas de otras especies de madera.



# AGRADECIMIENTOS

*Agradecer, en primer lugar a mi tutor, Alberto. Por toda la ayuda facilitada y tantas horas de tutorías prestadas para la realización de este TFG, buscando siempre la mejor solución posible para superar todos los obstáculos que han ido apareciendo en el camino.*

*También agradecer a Luis, Paloma, Francisco y Alberto, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid. Por abrirnos las puertas de su laboratorio y su disposición para colaborar en todo lo necesario.*

*Por supuesto, agradecer a todos y cada uno de los profesores de la Escuela Politécnica Superior de Ávila. Por aportar cada uno de ellos su granito de arena en mi formación, tanto académica como personal, durante estos cuatro años en el Grado.*

*Por último, en lo personal, agradecer a mi familia, a mis amigos y a mi novia por el apoyo mostrado durante estos duros meses de trabajo.*



# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
<b>3. CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA</b> .....	<b>5</b>
3.1. Propiedades físicas .....	6
3.1.1. Ortotropía.....	6
3.1.2. Humedad.....	7
3.1.3. Densidad .....	8
3.2. Propiedades mecánicas.....	10
3.2.1. Resistencia a tracción .....	11
3.2.2. Resistencia a compresión.....	12
3.2.3. Elasticidad .....	14
3.3. Características del <i>Pinus halepensis</i> .....	18
3.3.1. Descripción general .....	18
3.3.2. Distribución .....	19
3.3.3. Usos principales.....	21
<b>4. CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES (DIC)</b> .....	<b>25</b>
4.1. Introducción.....	25
4.2. Metodología de la Correlación Digital de Imágenes.....	27
4.2.1. Fundamento matemático de la Correlación Digital de Imágenes.....	28
4.3. Comparativa frente a métodos convencionales .....	32
4.4. Aplicaciones de la técnica DIC en el campo de la ingeniería .....	34
4.4.1. Aplicaciones a la caracterización de la madera .....	36
<b>5. MATERIAL Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>39</b>
5.1. Preparación de probetas .....	39
5.2. Instrumentación.....	43

5.3. Software DIC.....	45
5.4. Procedimiento de ensayo de compresión .....	46
<b>6. TRATAMIENTO DE DATOS E IMÁGENES.....</b>	<b>49</b>
6.1. Determinación del sistema de referencia temporal del ensayo .....	49
6.2. Análisis de los desplazamientos .....	51
6.3. Cálculo de las deformaciones.....	54
6.4. Sincronización de los datos de carga y deformación .....	56
6.5. Obtención del Módulo de Elasticidad .....	58
6.6. Obtención de la Resistencia Máxima a compresión.....	61
<b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>63</b>
7.1. Cálculo estadístico de resultados.....	63
7.2. Valores característicos de las propiedades mecánicas .....	65
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEJO 1: DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS .....</b>	<b>75</b>
<b>ANEJO 2: DATOS DESCARTADOS .....</b>	<b>141</b>
2.1. Ensayo A4 .....	142
2.2. Ensayo B3 .....	144
2.3. Ensayo B7 .....	147

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Direcciones ortogonales de la madera .....	7
Figura 3.2: Deformaciones de la madera de Haya en función de su humedad.....	8
Figura 3.3: Tracción perpendicular a las fibras. Tracción pura (izquierda) y originada por flexión (derecha).....	11
Figura 3.4: Tracción paralela a las fibras .....	11
Figura 3.5: Relación tensión/deformación en tracción y compresión paralela a la fibra .....	12
Figura 3.6: Compresión perpendicular a las fibras (izquierda) y compresión paralela a las fibras (derecha).....	13
Figura 3.7: Comportamiento elástico de la madera.....	14
Figura 3.8: Pinar de <i>Pinus halepensis</i> . Zona húmeda (izquierda) y zona semiárida (derecha) .....	18
Figura 3.9: Corteza de <i>Pinus halepensis</i> en el tronco (izquierda) y ramas (derecha).....	19
Figura 3.10: Distribución del <i>Pinus halepensis</i> en la Península Ibérica.....	20
Figura 3.11: Traviesas de madera de Pino Carrasco .....	22
Figura 3.12: Pasarelas de madera de Pino Carrasco.....	22
Figura 3.13: Puentes de madera de Pino Carrasco .....	23
Figura 3.14: Observatorios de madera de Pino Carrasco .....	23
Figura 3.15: Pilares sometidos a esfuerzos de compresión paralela a las fibras en viviendas rurales y modulares.....	24
Figura 4.1: Búsqueda del punto central P en la faceta correspondiente a la imagen deformada .....	29
Figura 4.2: Determinación del patrón y la ventana de búsqueda.....	31
Figura 5.1: Numeración de las probetas .....	40
Figura 5.2: Orientación de las probetas. Posición A (izquierda); Posición B (derecha). 40	
Figura 5.3: Aplicación de capa de pintura blanca .....	41
Figura 5.4: Aplicación del moteado negro sobre base blanca .....	41
Figura 5.5: Probetas con moteado en el plano de estudio .....	42
Figura 5.6: Máquina de ensayos empleada.....	43
Figura 5.7: Cámara digital empleada.....	43
Figura 5.8: Disposición de los ensayos .....	44
Figura 5.9: Probetas con rotura limpia oblicua. Rotura en la parte superior (izquierda); rotura en la parte media (derecha) .....	47
Figura 5.10: Probeta con rotura por aplastamiento .....	47
Figura 6.1: Diferente duración del vídeo y del ensayo.....	49
Figura 6.2: Determinación del fin del ensayo de compresión .....	50
Figura 6.3: Determinación del inicio del ensayo de compresión .....	50
Figura 6.4: Definición de escala.....	51
Figura 6.5: Definición de componente de superficie.....	52
Figura 6.6: Mapa colores con los desplazamientos .....	53
Figura 6.7: Definición de puntos para el cálculo de la deformación.....	54

Figura 6.8: Desplazamiento de los puntos deformados .....	55
Figura 6.9: Diagrama desplazamiento/tiempo de los puntos de referencia .....	55
Figura 6.10: Plantilla para el cálculo de las deformaciones .....	56
Figura 6.11: Plantilla para la relación de las cargas y las deformaciones .....	57
Figura 6.12: Distorsión inicial en la zona elástica. Probeta A3.....	58
Figura 6.13: Distorsión inicial en la zona elástica y final en la zona elasto-plástica y plástica. Probeta A8 .....	59
Figura 6.14: Intervalo 20-80% para la determinación del Módulo de Elasticidad. Probeta A1.....	60
Figura 2.1: Gráfica tensión/deformación ensayo A4.....	142
Figura 2.2: Aplastamiento en la parte superior y rotura en la parte inferior. Probeta A4 .....	143
Figura 2.3: Gráfica tensión/deformación ensayo B3 .....	144
Figura 2.4: Anomalías de los desplazamientos en la superficie. Probeta B3 .....	145
Figura 2.5: Gráfica tensión/deformación ensayo B7 .....	147
Figura 2.6: Anomalías de los desplazamientos en la superficie. Probeta B7 .....	148

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Valores del coeficiente de correlación.....	30
Tabla 7-1: Resultados de los ensayos de las probetas A .....	63
Tabla 7-2: Resultados de los ensayos de las probetas B .....	63
Tabla 7-3: Estadísticos del Módulo de Elasticidad para cada muestra de probetas.....	64
Tabla 7-4: Valores característicos medios del Módulo de Elasticidad y la Resistencia Máxima.....	65
Tabla 7-5: Valores característicos de Resistencia Máxima y Módulo de Elasticidad de Pinus halepensis .....	66
Tabla 7-6: Valores característicos del Pinus halepensis en bibliografía .....	67
Tabla 2-1: Coeficiente de regresión lineal de la línea de tendencia para obtener E .....	141



# 1. INTRODUCCIÓN

La madera es un material con multitud de aplicaciones que van desde la fabricación de muebles y utensilios, hasta el ámbito más ingenieril, ya sea como materia prima para la obtención de celulosa en las industriales del papel como en el campo de la Ingeniería Civil y estructural como material constituyente de determinadas construcciones. Más si cabe en los últimos años, en los que la creciente y justificada preocupación por el medio ambiente y el impacto visual han hecho que la utilización de otros materiales como el hormigón o el acero suponga un problema en determinados entornos naturales. De esta manera se opta por la utilización de la madera como material estructural, integrándose idóneamente con los entornos naturales, ya sea en la construcción de edificaciones rurales como de pasarelas y puentes que salvan el cauce de los ríos.

La clara tendencia hacia una construcción sostenible y las óptimas propiedades intrínsecas que tiene la madera han hecho de ésta un material empleado cada vez más en las construcciones en los espacios naturales, ofreciéndose como destacada alternativa frente al uso de otros materiales.

Por un lado, es evidente que la eficiencia energética de este material es mejor que la de otros materiales constructivos, pues supone un reducido coste energético ya que no se precisa consumo energético para su fabricación, siendo únicamente necesario en su posterior procesado. Además, su fabricación constituye una importante función en los ecosistemas gracias a su alto valor ecológico y la labor que desarrollan los árboles como almacenes de carbono.

Una vez acabado el ciclo de la vida útil de la madera, puede ser empleada nuevamente como materia prima para otros usos como la generación de tableros. Incluso en el caso de que no pueda ser reciclado, es factible su utilización como combustible para la generación de energía. La biomasa, como se conoce este método renovable, permite obtener energía para calefacción o agua caliente a partir de madera ya desechada que, a pesar de ver reducidas sus prestaciones estructurales, posee un alto poder calorífico. De esta forma, es posible encontrar un último uso útil en el ciclo de vida de la madera.

Además, la madera goza de una amplia versatilidad debido a la multitud de especies que se pueden encontrar en el mercado, haciendo de ella un material muy variado con elevadas posibilidades para un mismo uso y unas altas prestaciones en cuanto a su comportamiento mecánico. Esta versatilidad puede verse en la comparación que realiza (Cáceres Hidalgo, 2016) de la especie *Paulownia elongata* con otra más conocida como es el *Pinus pinaster*.

Sin embargo, la heterogeneidad que presenta el material, incluso dentro de la misma especie, supone una dificultad añadida a la hora de establecer sus propiedades mecánicas para su posterior utilización. A pesar del uso de la madera en la construcción, esta complejidad hace que sea un elemento que no disponga de numerosos estudios, existiendo

incluso diversas metodologías y ensayos para la determinación de sus propiedades con importante grado de diferencia. (Pérez Ortega, 2014) muestra por ejemplo la diferencia entre la determinación de estas propiedades mediante la normativa UNE y ASTM.

No obstante, el empleo de la madera en las construcciones requiere de unos cálculos estructurales para los cuales es preciso disponer inicialmente de unos valores de propiedades mecánicas lo más próximos posibles a sus valores reales. De lo contrario, podría incurrirse en un sobredimensionamiento de las estructuras que llevara a un encarecimiento del precio final de la construcción o, en el caso contrario, podría realizarse un dimensionamiento defectuoso que diera lugar a unas deformaciones excesivas o en el peor de los casos al colapso de las estructuras calculadas, con las consecuencias fatales en el ámbito de la seguridad que ello podría conllevar. Por ello se hace fundamental el conocimiento previo y preciso de las propiedades mecánicas de la madera a utilizar antes de acometer cualquier tipo de cálculo estructural con ella.

Para la determinación de esas propiedades mecánicas existen diversos ensayos y métodos. Las galgas extensiométricas, los sensores ópticos o de ultrasonidos son las técnicas convencionales más empleadas. Sin embargo, se presentan como métodos invasivos y destructivos debido al contacto directo con el material, obteniendo en determinados casos disparidad en los resultados debido a este contacto. Además en el aspecto económico suponen un elevado coste que no siempre es asumible en todas las tareas de investigación. Por ello se pone de manifiesto la necesidad de emplear un método eficiente y contrastado que conceda unas garantías suficientes para la determinación de las propiedades mecánicas.

En este sentido, en este Trabajo Fin de Grado (TFG en adelante) se propone la viabilidad, alcance e idoneidad de la Correlación Digital de Imágenes como uno de los métodos de medición que puedan ser implementados junto con el ensayo a compresión, con el fin de determinar las propiedades mecánicas de la madera. En este caso se aplica a un tipo de madera concreto como es el Pino Carrasco (*Pinus halepensis*), cuyas propiedades físico-mecánicas son excelentes (García Esteban & de Palacios de Palacios, 2000) a pesar de que su uso no se encuentre extendido por todo el territorio nacional debido a que se trata de una especie autóctona de la zona mediterránea.

Por su parte, la Correlación Digital de Imágenes es una técnica de bajo coste empleada tanto a nivel profesional como a nivel semiprofesional en el ámbito de la caracterización de materiales como el acero, hormigón o plásticos. Su metodología está basada en algoritmos de la fotogrametría y la visión computacional que permiten un análisis de imágenes tomadas con una cámara digital. Ha supuesto una revolución en el campo de la medición de desplazamientos y deformaciones al ser una técnica no invasiva ni destructiva y de bajo coste. Se trata por tanto de un método de medición que no requiere contacto directo con el material, lo que supone un gran avance al evitar los defectos producidos por la fricción o falta de adherencia de los dispositivos de medición convencionales que sí requieren de este contacto, como podrían ser las galgas extensiométricas.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente TFG es establecer una metodología para la obtención de las propiedades mecánicas de la madera mediante la implementación de la Correlación Digital de Imágenes a los ensayos de compresión. El caso de estudio se llevará a cabo en la madera de la especie Pino Carrasco (*Pinus halepensis*).

Como objetivos específicos de este TFG se pueden establecer los siguientes:

- a) Conocer las propiedades físicas de la madera y la influencia que éstas tienen en las propiedades mecánicas.
- b) Comprender el fundamento de la técnica de Correlación Digital de Imágenes, la calibración y la posición de la cámara digital utilizada.
- c) Implementar las deformaciones obtenidas con la Correlación Digital de Imágenes en los valores de carga resultantes del ensayo de compresión axial en 20 probetas acondicionadas según la norma *UNE 56535:1977: Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la compresión axial*.
- d) Elaborar las curvas de tensión-deformación a partir de los datos obtenidos conjuntamente de carga y deformación.
- e) Realizar un estudio estadístico para obtener los valores característicos medios y correspondientes al 5º percentil de la Resistencia Máxima y del Módulo de Elasticidad a compresión paralela a las fibras.



### 3. CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA

La madera es una materia prima proveniente de la naturaleza y fácilmente extraíble que ha sido empleada históricamente como elemento estructural y decorativo, para la fabricación de mobiliario o incluso para suelos desde que el hombre comenzó a construir. Una de las principales razones por las que su uso era muy frecuente es que no era necesaria su fabricación, siendo únicamente requerido en algunos casos el cambio de su forma o moldeado a partir del estado natural en el que se presenta. La madera es, incluso en el siglo XXI, un elemento común en determinados tipos de obras civiles y edificaciones gracias al hecho mencionado anteriormente y a sus propiedades y características que hacen de ella un material apropiado para su uso en la construcción.

La amplia variedad de tipos de maderas existentes, así como de propiedades y características, junto a la necesidad actual de favorecer una construcción eficiente y sostenible, hace que el ámbito de la madera tenga cada vez más importancia, situándose como un sector competitivo en el campo estructural y constructivo.

La variabilidad de las propiedades que seguidamente se exponen determinará notablemente su comportamiento. En muchas ocasiones, un pequeño cambio en características, tales como la humedad, puede influir de forma negativa hasta el punto de modificar la calidad o categoría de un determinado tipo de madera, reduciendo así sus prestaciones. Por ello, a la hora de trabajar con este material será preciso tenerlas en consideración.

Si bien es cierto que a continuación se presentan una serie de propiedades básicas y generales en cuanto a la madera como material de construcción, es necesario tener en cuenta que todas ellas variarán conforme a las diferentes especies con las que se esté trabajando. De esta forma, cada especie tendrá asociados unos valores de densidad característica, de resistencia a tracción y compresión, de módulo de elasticidad, etc., siendo comunes dichos valores para el conjunto de la correspondiente especie, pero no para todo el material en general.

Sin embargo, sí se puede afirmar que la modificación de las propiedades produce efectos similares en todas las especies. Por ejemplo, en el caso concreto del aumento de la humedad en una pieza de madera de cualquier especie por encima de su humedad de servicio produce la consecuente disminución de su capacidad resistente (Argüelles, et al., 2000). No obstante, el grado de afección correspondiente a dicha alteración, será mayor en unas especies de madera que en otras. Por lo tanto, es una labor fundamental el conocimiento de las propiedades de las distintas especies, con el fin de comprender su comportamiento y poder seleccionar la especie de madera más adecuada para su utilización en el campo estructural y constructivo.

## 3.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas son aquellas que se basan principalmente en la estructura interna del material por lo que su alteración no produce modificaciones químicas ni mecánicas en él, conservando así su composición inicial. Dichas propiedades definen el comportamiento del material ante las variaciones que pueda sufrir el mismo en el medio ambiente en general.

Varias son las propiedades que definen a la madera, pudiendo enumerar algunas simples como su durabilidad, higroscopicidad, flexibilidad, polaridad, etc. Sin embargo las más destacadas, y cuya influencia es más notable a la hora de determinar el comportamiento de dicho material, son las que a continuación se desarrollarán.

### 3.1.1. Ortotropía

La ortotropía es un caso particular de la anisotropía, por lo que es preciso introducir una definición general de esta propiedad. Así, se considera la anisotropía como una característica de aquellos materiales cuyas propiedades varían en función de la dirección en la que son estudiados, es decir, los atributos de dicho material variarán según sea la orientación del mismo.

De esta forma, un material ortótropo se define como un material anisótropo donde sus propiedades varían solo según la dirección de tres ejes ortogonales entre sí.

En el caso particular de la madera, se pueden describir los siguientes tres ejes ortogonales entre sí (Pérez Ortega, 2014), pudiendo apreciarse su representación en la figura 3.1:

- Longitudinal (L): su dirección es paralela a la dirección del grano o de las fibras, es decir, la dirección en la que crece el árbol. En algunos casos también se denomina dirección axial.
- Radial (R): su dirección es perpendicular a la dirección del grano o las fibras, de manera que forma un ángulo recto con la dirección longitudinal, cortando así al eje del árbol.
- Tangencial (T): se sitúa en el mismo plano que la dirección radial, formando un ángulo de noventa grados con ésta y con la dirección longitudinal, cortando los anillos de crecimiento del árbol.

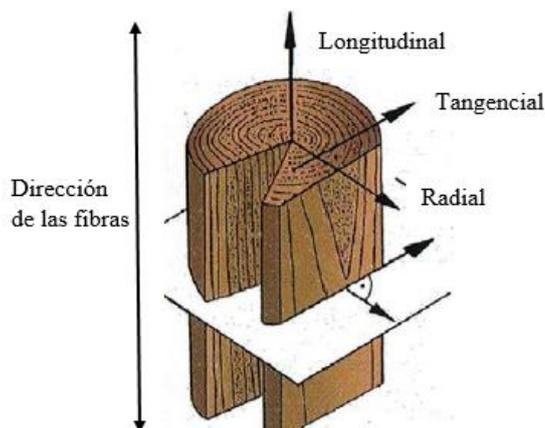


Figura 3.1: Direcciones ortogonales de la madera

Por lo tanto, al existir tres direcciones diferenciadas donde varían las propiedades de la madera, se obtendrán diferentes resultados en función de la dirección en la que se realicen los ensayos para la determinación de las propiedades. Por lo que para una caracterización correcta, se deben realizar diferentes ensayos con el fin de obtener las propiedades en las direcciones longitudinal, tangencial y radial (Argüelles, et al., 2000).

En cuanto a estudios de verificación de la ortotropía de la madera, existen artículos científicos como los que se comentan posteriormente en el apartado de la Correlación Digital de Imágenes. Otros como (Moya, et al., 2017) obtienen las propiedades elásticas mediante el método tradicional de galgas extensiométricas en las tres direcciones mencionadas para constatar dicha ortotropía.

### 3.1.2. Humedad

El contenido de humedad, tanto de la madera como de cualquier otro material, se expresa como el porcentaje en peso del mismo en su estado natural con respecto al peso en su estado seco. De esta forma, el porcentaje de la humedad de una pieza de madera se obtiene con la expresión que aparece a continuación (Cáceres Hidalgo, 2016):

$$H(\%) = \frac{P_H - P_0}{P_0} \cdot 100$$

Siendo:

- $H(\%)$ , el porcentaje de humedad de la madera.
- $P_H$ , el peso de la madera en su estado natural con un porcentaje  $H(\%)$  de humedad.
- $P_0$ , el peso de la madera en estado seco.

Diversos autores han analizado la importancia de la humedad en la madera, como es el caso de (Peña & Rojas, 2006). En este caso se trata de un libro dedicado a la tecnología

de la madera, donde se expresa la importancia del estudio de la humedad al influir en la mayoría de procesos de transformación. Debido a que la humedad afecta notablemente a propiedades como la durabilidad, el peso, la resistencia, etc. se considera ésta un factor determinante respecto a su comportamiento.

Cabe destacar la influencia de la humedad en la deformabilidad de la madera, de manera que a medida que el contenido de agua aumenta, el material incrementa su deformación de manera proporcional hasta alcanzar aproximadamente el 30% de humedad. En la figura 3.2 (Arredondo y Verdú, 1992), para el caso concreto de madera de Haya, las deformaciones se incrementan proporcionalmente hasta alcanzar un máximo correspondiente a dicho contenido de humedad.

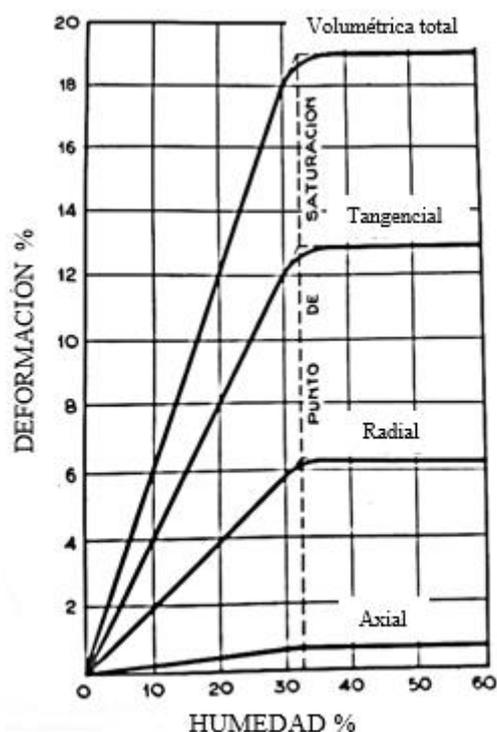


Figura 3.2: Deformaciones de la madera de Haya en función de su humedad

### 3.1.3. Densidad

Tanto para la madera como para cualquier otro material, la densidad puede calcularse mediante la relación entre la masa de una determinada pieza y su correspondiente volumen, según se expresa a continuación:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Sin embargo, el agua contenida en los poros de una determinada pieza de madera puede variar haciendo que su masa sea diferente (Arredondo y Verdú, 1992). Consecuentemente, el volumen de dicha pieza también se verá alterado al producirse una

expansión de los poros. Estas variaciones hacen que la densidad sea una propiedad que esté directamente relacionada con la humedad.

Por ello, generalmente la densidad debe ser calculada acorde a un valor de humedad normalizado del 12% tal y como marca la norma *UNE 56528:1978: Características físico-mecánicas de la madera. Preparación de probetas para ensayos*. Si el contenido de humedad es diferente del 12%, la densidad debe aumentarse o disminuirse en proporción a dicha variación ya que ha de coincidir con el contenido de humedad en el momento de realización de los ensayos para la obtención del resto de propiedades.

- Para valores superiores al 12% de humedad, el valor de la densidad habrá de disminuirse un 0,5% por cada variación del 1% del contenido de humedad.
- Para valores inferiores al 12% de humedad, la densidad debe aumentarse un 0,5% por cada 1% de variación del contenido de humedad.

Por otro lado la densidad es una de las propiedades más influyentes en la resistencia de la madera. Generalmente, la alta densidad en la madera indica una menor cantidad de poros, con el consecuente aumento de resistencia que ello implica.

Además, la densidad es un indicativo de la debilidad de la madera dentro de una misma especie. Así las piezas de madera que dentro de una misma familia, tengan una densidad inferior al valor característico, presentarán signo de debilidad reduciendo en consecuencia su resistencia.

## 3.2. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas son las que definen el comportamiento del material ante esfuerzos o sollicitaciones externas. Estas propiedades permiten a la madera resistir los cambios de forma y tamaño ante dichos esfuerzos.

A continuación se menciona una breve descripción de cada una de ellas:

- Dureza: puede ser definida como la resistencia que la madera opone ante su penetración o rayado, siendo únicamente de interés para aquellas maderas con fines de ser trabajadas o empleadas en pavimentos o acabados.
- Fatiga: se trata del límite o tensión máxima que la madera puede soportar un número infinito de veces sin que se produzca la rotura.
- Hendibilidad: es propiedad que permite a la madera romperse por separación de las fibras al aplicar un esfuerzo de tracción de forma transversal.
- Pandeo: fenómeno que sucede cuando las piezas son sometidas a compresión paralelas a las fibras, generándose una fuerza perpendicular a éstas que origina su doblamiento. Se produce aproximadamente cuando la relación de esbeltez (longitud/anchura) es superior a 10.
- Resistencia al corte: se considera la capacidad que tiene la madera de resistir fuerzas que produzcan el deslizamiento de una parte del material sobre otra adyacente en dirección paralela a las fibras. En el caso de que ésta sea perpendicular a las mismas no se produce la rotura por éste efecto, sino por otros, ya que la resistencia en este caso es muy elevada.
- Resistencia a flexión: respecto a dicha propiedad, al aplicar esfuerzos transversales, se considera que la madera posee muy baja resistencia a la flexión. Sin embargo, si la longitud de la pieza coincide con la dirección longitudinal, la mitad superior de la pieza quedará sometida a compresión y la inferior a tracción, con un plano medio en el que únicamente existirán tensiones cortantes.

Sin embargo, existen otras propiedades mecánicas como la resistencia a tracción y a compresión o la elasticidad cuya importancia en el campo estructural y constructivo es más destacado.

A continuación se centrará la atención en analizar estas propiedades, principalmente la resistencia a compresión y las propiedades elásticas, por ser uno de los objetivos principales de estudio en este TFG.

### 3.2.1. Resistencia a tracción

La resistencia a tracción de la madera se considera una de las propiedades fundamentales para su empleo como elemento estructural, presentando un elevado valor de resistencia a la tracción. Sin embargo, uno de los principales impedimentos a la hora de trabajar con este material son las uniones de los elementos. Las juntas suponen una debilidad en las piezas de madera ya que la probabilidad de que la rotura se produzca en estos puntos es muy elevada (Arredondo y Verdú, 1992).

A este inconveniente se han de sumar otras dificultades como las que se presentan a la hora de realizar los ensayos, ya que las mordazas que sujetan las probetas de madera para realizar el ensayo a tracción pueden provocar esfuerzos cortantes o de compresión, que pueden distorsionar los resultados obtenidos de resistencia a tracción.

La resistencia a tracción en dirección perpendicular a las fibras (figura 3.3) es escasa, debido a que únicamente se opone a dicho esfuerzo de tracción la adherencia entre las fibras. En comparación con la resistencia a tracción en la dirección paralela a las fibras, es del orden de 30 a 70 veces menor.

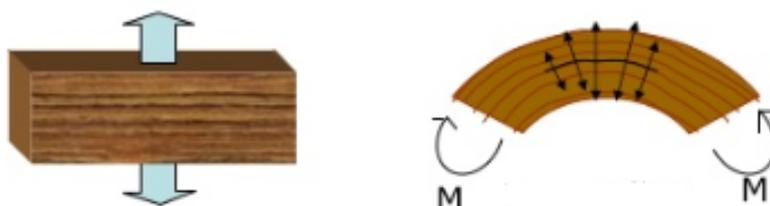


Figura 3.3: Tracción perpendicular a las fibras. Tracción pura (izquierda) y originada por flexión (derecha)

Por otro lado, en la dirección paralela a las fibras (figura 3.4), la resistencia a tracción es del orden de 2.5 veces mayor que la resistencia a compresión, produciéndose en este caso la rotura de forma repentina. En la figura 3.5 (Argüelles, et al., 2000), puede observarse que la zona plástica es muy reducida, siendo este fenómeno contrario a lo que ocurre en los ensayos a compresión, en los cuales se puede observar una gran deformación una vez se ha alcanzado el límite elástico.



Figura 3.4: Tracción paralela a las fibras

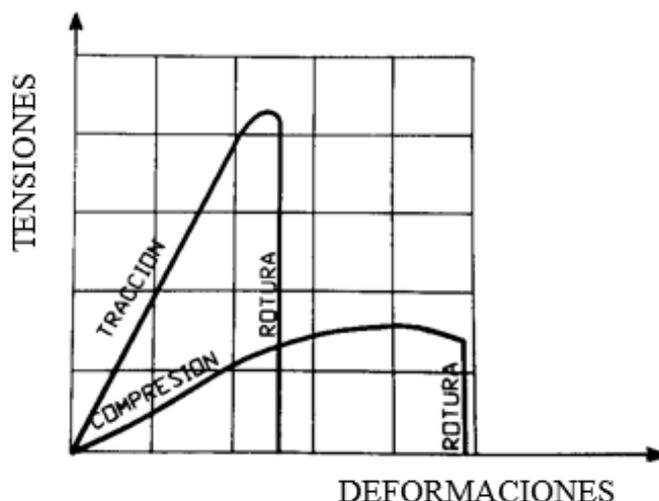


Figura 3.5: Relación tensión/deformación en tracción y compresión paralela a la fibra

Debido a la gran utilidad de este material como elemento constructivo ante sollicitaciones a tracción, diversos autores han realizado trabajos para caracterizar la madera a tracción. A los que emplean la técnica DIC, que posteriormente serán analizados, se suman otros como (Martinez-Espinosa, et al., 2002), quienes determinan la resistencia a tracción de la madera para su empleo en tableros.

### 3.2.2. Resistencia a compresión

Como se ha comentado anteriormente, el valor de la resistencia a compresión en la madera es, por lo general, aproximadamente la mitad que el valor de la resistencia a tracción. A pesar de ello, en este caso la madera presenta una mejor trabajabilidad ya que determinados inconvenientes que se presentan a tracción como las uniones, en este caso no suponen ningún problema.

Son muchos los factores que influyen en la resistencia a compresión y que es necesario tener en cuenta a la hora de su utilización para la construcción. Los más destacados son las propiedades de la ortotropía, la humedad y la densidad. Según (Arredondo y Verdú, 1992) estas propiedades afectan a la resistencia a compresión de la siguiente manera:

- Ortotropía: de igual forma que en el caso de la tracción, los mayores valores de resistencia a compresión se dan para la dirección paralela a las fibras (figura 3.6). En este caso, las fibras tienden a separarse produciéndose la rotura por deslizamiento en un plano oblicuo a dicho eje. Tanto en la dirección radial como tangencial la resistencia es menor, originando esta rotura la compactación de las fibras y la importante deformación que éstas sufren.
- Humedad: alcanzado el punto de saturación, la resistencia a compresión permanece prácticamente constante. Sin embargo, por debajo de este valor de saturación, se produce un aumento de la resistencia de manera inversa a la humedad.

- Densidad: altos valores indican generalmente mayor resistencia a compresión. Dentro de una misma especie, se puede establecer también una relación entre dicha resistencia y la densidad introduciendo el concepto de cota específica de calidad, asociado como su propio nombre indica a la calidad de cada pieza de madera.

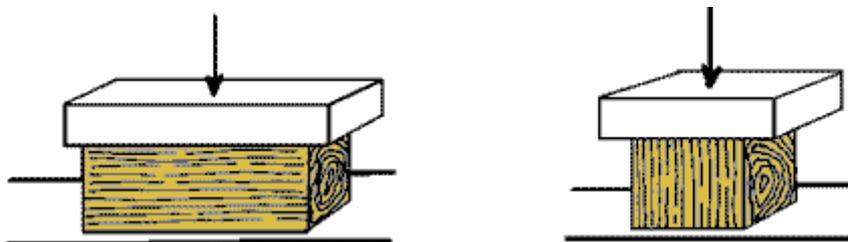


Figura 3.6: Compresión perpendicular a las fibras (izquierda) y compresión paralela a las fibras (derecha)

Debido a la relación entre las óptimas prestaciones que ofrece la madera a compresión con respecto a su peso, existe una elevada tendencia en la actualidad a su uso en la construcción. Especialmente existe una predisposición en el uso de este material en los entornos rurales donde el impacto visual es muy reducido, proporcionando una solución limpia y sostenible. En este sentido destaca su uso en traviesas de ferrocarril y pilares en construcciones rurales como se verá más adelante. Además, los residuos pueden ser empleados para otros usos derivados como la producción de biomasa e incluso la fabricación de otros materiales como los tableros de aglomerado de madera.

Sin embargo, normalmente el valor de la resistencia a compresión se obtiene a partir de una estimación en base a ensayos de flexión (Argüelles, et al., 2000). Por ello, la realización de ensayos a compresión como los presentados en este TFG permite precisar en estos valores de resistencia a compresión, mostrando una mayor garantía con respecto a los valores obtenidos por estimación.

Algunos autores se han dedicado al estudio de la madera a compresión como es el caso de (Hernández-Maldonado & Sotomayor-Castellanos, 2014), quienes examinan el comportamiento elástico de la madera a compresión empleando sensores de deformación de resistencia eléctrica. En su estudio, verificaron la influencia de la ortotropía anteriormente mencionada y compararon los resultados obtenidos con respecto a otros valores de bases de datos bibliográficas.

Por su parte, (Pérez Ortega, 2014) realiza una comparación entre las diferentes normativas UNE y ASTM con el fin de estudiar el comportamiento de la madera a compresión de diferentes especies coníferas y frondosas.

### 3.2.3. Elasticidad

La elasticidad es una propiedad mecánica que presentan aquellos materiales que son capaces de sufrir deformaciones reversibles cuando son sometidos a esfuerzos exteriores y una vez cesan estos esfuerzos, recuperan su forma inicial.

Sin embargo, la madera no es un material perfectamente elástico cuando se realizan esfuerzos de compresión sobre ella, sino que su comportamiento pasa por tres fases diferenciadas durante el proceso de carga (Baño, et al., 2014). Este comportamiento puede ser observado en la curva de tensión-deformación de la figura 3.7 en la que se representan las diferentes zonas del comportamiento elástico a compresión paralela a las fibras.

- Existe una primera zona, denominada zona elástica, en la cual el comportamiento es completamente elástico. Las deformaciones aumentan de manera proporcional y lineal a las tensiones aplicadas. En este caso, las deformaciones son reversibles, es decir, una vez cesa la carga se recupera la forma original. El valor del coeficiente angular de dicha línea recta será el correspondiente al módulo de elasticidad.
- A continuación se entra en la denominada zona elasto-plástica. En esta zona se produce la transición de la zona elástica donde las deformaciones son reversibles, a aquella en la que las deformaciones son irreversibles. En esta franja, las deformaciones aumentan de manera directamente proporcional a las tensiones pero este aumento no se produce de forma lineal. Esto es debido a que las deformaciones en este tramo dependen tanto de las deformaciones elásticas como de las plásticas. Como consecuencia de ello, se producirá una recuperación parcial si se produce una descarga, siguiendo una línea paralela a partir de límite elástico.
- Por último se puede encontrar la zona de fluencia, en la cual las deformaciones aumentan considerablemente respecto a la carga aplicada. En este caso las deformaciones son permanentes. Dicha zona no es apreciable en tracción debido a que la rotura se produce de inmediato al superar el límite elástico.

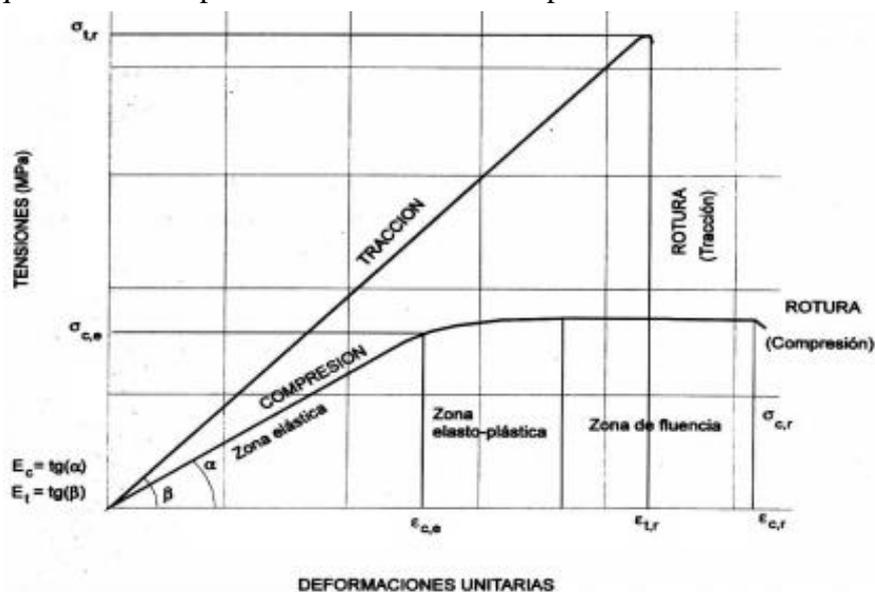


Figura 3.7: Comportamiento elástico de la madera

A pesar de existir diferentes fases en el proceso de carga a compresión, en el ámbito estructural para poder trabajar dentro de un rango de seguridad tensional y de deformaciones, se considera el límite elástico como tensión de diseño. Por ello, la caracterización de mayor interés se centrará en dicha fase inicial denominada zona elástica. Sin embargo, debido a la mencionada ortotropía, es complejo de definir el comportamiento con un único valor ya que tanto el módulo de elasticidad como el valor del límite elástico varían según la dirección en la que se aplique la carga.

Por otro lado, para llevar a cabo una adecuada y precisa caracterización es necesario introducir la denominada matriz de constantes elásticas. Se trata de una matriz que reúne todas y cada una de las constantes que son requeridas para caracterizar el comportamiento elástico de la madera, entendida esta como un sólido elástico con simetrías materiales de tipo ortotrópico.

Dicha matriz será el denominado tensor de constantes elásticas (S) de la ley general de comportamiento elástico, también conocida como Ley de Hooke, que se expresa como:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}$$

Donde:

- $\varepsilon$ = Tensor de deformaciones, producidas por un esfuerzo  $\sigma$  en un material cuyas características elásticas sean definidas por S.
- S= Tensor de constantes elásticas de dicho material.
- $\sigma$ = Tensor de tensiones provocados en el material.
- $i,j,k,l \in \{1,2,3\}$

Esta ley puede ser escrita en forma matricial, obteniendo la mencionada matriz de constantes elásticas:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{pmatrix}$$

Donde:

- $\varepsilon$ = Deformación unitaria.
- S= Constante elástica.
- $\sigma$ = Esfuerzo normal.
- $\tau$ = Esfuerzo cortante.

Los ejes que definen la Ley de Hooke {1,2,3} se corresponden con los ejes Radial, Tangencial y Longitudinal {R,T,L} definidos por la ortotropía de la madera (epígrafe 3.1.1). A partir de estos ejes y teniendo en cuenta la simetría de las constantes (S<sub>21</sub> con S<sub>12</sub>; S<sub>31</sub> con S<sub>13</sub>; S<sub>32</sub> con S<sub>23</sub>), se pueden definir las constantes elásticas en función del

Módulo de elasticidad E, el Módulo de rigidez G y el Coeficiente de Poisson  $\nu$  (Hernández-Maldonado & Sotomayor-Castellanos, 2014):

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{1}{E_R} & S_{44} &= \frac{1}{G_{TL}} \\
 S_{22} &= \frac{1}{E_T} & S_{55} &= \frac{1}{G_{LR}} \\
 S_{33} &= \frac{1}{E_L} & S_{66} &= \frac{1}{G_{RT}} \\
 S_{21} &= \frac{-\nu_{RT}}{E_R} = S_{12} = \frac{-\nu_{TR}}{E_T} \\
 S_{31} &= \frac{-\nu_{RL}}{E_R} = S_{13} = \frac{-\nu_{LR}}{E_L} \\
 S_{32} &= \frac{-\nu_{TL}}{E_T} = S_{23} = \frac{-\nu_{LT}}{E_L}
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la ley general de comportamiento elástico, una vez definidas todas y cada una de las constantes elásticas, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{pmatrix}$$

La matriz que define las constantes elásticas, es fundamental para poder caracterizar el comportamiento de la madera en su fase elástica. Para ello es necesario la determinación en primer lugar del Módulo de elasticidad E, que constituye uno de los principales objetivos del presente TFG.

Algunos autores como los mencionados en el correspondiente apartado de la Correlación Digital de Imágenes han llegado a obtener dicha matriz de constantes elásticas empleando este método para la medición de deformaciones y obtener así el

Módulo de elasticidad y el Coeficiente de Poisson. Sin embargo, para la obtención de estas propiedades se realizaron ensayos de tracción.

En cuanto a ensayos a compresión para determinar el comportamiento de la madera existen escasos ejemplos. Entre ellos, (Ballarin Wagner & Nogueira, 2003) obtienen la caracterización elástica de la madera procedente de *Eucalyptus citriodora* con ensayos a compresión empleando técnicas convencionales de medición de las deformaciones como las bandas extensiométricas. De forma similar, (Hernández-Maldonado & Sotomayor-Castellanos, 2014) realizan la caracterización completa de la madera de tipo *Acer rubrum* y *Abies balsamea* utilizando el mismo tipo de ensayo y medición.

### 3.3. Características del *Pinus halepensis*

#### 3.3.1. Descripción general

La madera empleada para la realización de los ensayos y la obtención de sus propiedades mecánicas procede del árbol denominado comúnmente Pino Carrasco, acorde a la siguiente clasificación:

Orden: *Pinales*.

Familia: *Pinaceae*.

Género: *Pinus*

Especie: *Pinus halepensis*.

Se trata de una especie que puede llegar a alcanzar los 20 metros de altura (figura 3.8) en las estaciones húmedas, aunque es originaria de los climas semiáridos, donde su altura se sitúa en torno a los 12 metros. La longevidad media de esta especie suele situarse entre los 150 y los 200.



Figura 3.8: Pinar de *Pinus halepensis*. Zona húmeda (izquierda) y zona semiárida (derecha)

La fisionomía más característica es la de un árbol poco denso, con una copa generalmente ancha y baja pero con muchas ramas salpicadas de piñas que quedan secas. La corteza es diferente en el tronco y en las ramas como puede verse en la figura 3.9, siendo en el primero de los casos generalmente de color oscuro y encontrándose agrietada mientras que en las ramas más jóvenes se puede encontrar un color grisáceo.



Figura 3.9: Corteza de *Pinus halepensis* en el tronco (izquierda) y ramas (derecha)

De todos los pinos que habitan en la Península Ibérica, el Pino Carrasco es el más xerófilo, es decir, el que mejor se adapta a los climas secos. Por ello soporta perfectamente periodos de muy bajas precipitaciones, que por lo general se sitúan entre 250 y 1000mm. Esta característica hace que sea una especie idónea para soportar las sequías, resultando habitualmente empleada para la repoblación en zonas como la costa de Almería con periodos de aridez intensos y prolongados.

Sin embargo, la temperatura sí es un factor que limita la existencia de este tipo de pino, siendo considerado el más termófilo, es decir, el más sensible al frío. El hecho de situarse en regiones mediterráneas con un clima frecuentemente suave que apenas llega a temperaturas negativas a lo largo del año permite la conservación de esta especie.

### 3.3.2. Distribución

El *Pinus halepensis* es considerado una especie originaria del área mediterránea. Por lo general, puede encontrarse en regiones occidentales de la Península Ibérica, el norte de Marruecos y Argelia y el sur de Francia e Italia.

Dentro de la Península Ibérica el Pino Carrasco es considerado una especie autóctona en la costa mediterránea. Se trata por lo tanto de una de las regiones naturales con mayor abundancia de esta ejemplar, situándose por lo general en la zona occidental de Cataluña y Levante como puede verse en la figura 3.10.

A pesar de ello, puede ser encontrada en cualquier otra región con clima mediterráneo, ya que es empleada con asiduidad para la repoblación. De esta forma el área de influencia del Pino Carrasco se extiende por toda la zona sur del continente europeo y el norte del africano, situándose siempre cercano a la costa mediterránea.

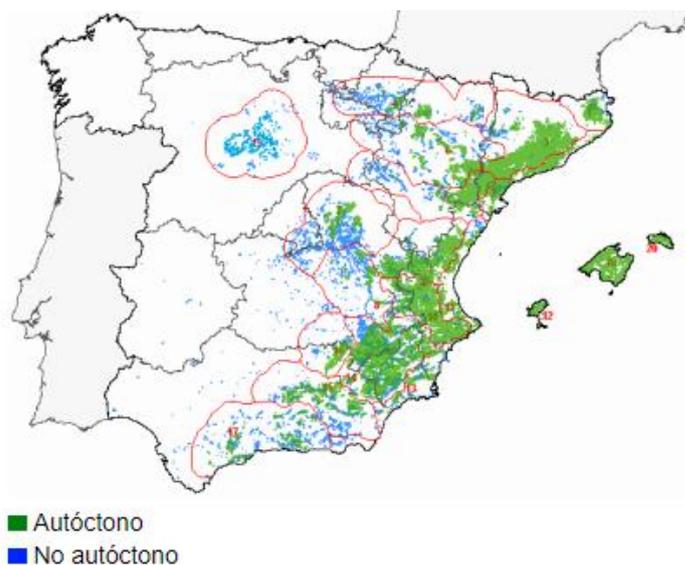


Figura 3.10: Distribución del *Pinus halepensis* en la Península Ibérica

Fuera de esta región principal, se han llevado algunos ejemplares a otros continentes para la repoblación debido a la gran utilidad de esta especie. Pueden citarse algunas localizaciones puntuales como las colinas de Hollywood y otros parques naturales cercanos a Los Ángeles, extendiéndose por el Estado de California y situándose siempre en las proximidades de la costa del Pacífico.

En cuanto a la altitud, aparece en zonas generalmente bajas, por debajo del 1.000 m, debido principalmente al factor limitante de la temperatura. Sin embargo, no es extraño encontrarlo en algunas ocasiones hasta los 1.600 m.

A pesar de adaptarse mejor a los climas áridos, también aparece en otras regiones algo más frías como son el valle del Ebro y la comarca de Baza, en Granada. El límite podría situarse por lo tanto en la división central de la Península, ya que no suele aparecer en la zona oeste, que generalmente presenta inviernos más acusados con bajas temperaturas.

Respecto a los suelos en los que crece el Pino Carrasco suelen ser de composición carbonatada, siendo uno de los más frecuentes los suelos calizos. Sin embargo, también se le puede ver en terrenos silíceos e incluso yesosos. Por lo general se trata de una especie que se adapta perfectamente a los sustratos pobres y pedregosos en los que pocas plantas pueden arraigar.

### 3.3.3. Usos principales

El Pino Carrasco es una de las especies más numerosas en la Península Ibérica y como tal supone una fuente de recursos de elevada importancia debido a la multitud de utilidades que se le pueden asignar.

Una de las utilidades que ya se ha mencionado con anterioridad es la repoblación forestal llevada a cabo con estas especies gracias a las óptimas condiciones que presenta ante situaciones adversas como las sequías.

En el ámbito industrial, se ha empleado la resina del Pino Carrasco para la fabricación de barnices, adhesivos, aguarrás, etc. Uno de los productos que alcanza mayor valor en el mercado es la trementina (derivada de la destilación de la resina) debido a la gran productividad y elevada calidad que presenta esta especie.

La madera propiamente dicha puede disponer de varios usos. Se puede decir de ella que es generalmente dura, de densidad media y de color blanquecino amarillento, con las partes centrales más oscuras.

En algunas ocasiones es complejo obtener madera de alta calidad debido a que no siempre el tronco del árbol crece recto. En estos casos se suele emplear para hacer tableros de aglomerado, pasta de papel o incluso para leña. Cuando el árbol permite extraer secciones de mejor calidad puede utilizarse para la fabricación de cajas de embalaje o palés.

En el ámbito de la Ingeniería Civil existen importantes usos de esta especie de madera, Estos fines comprenden generalmente piezas de amplias secciones a la vez que reducidas longitudes, conformando pequeñas pero numerosas piezas no muy esbeltas.

Uno de los más destacados es la fabricación de traviesas de madera de las vías de ferrocarril (figura 3.11). A pesar de que en la actualidad la tendencia se sitúa a favor de las traviesas de hormigón, históricamente se ha tratado de la principal especie proveedora de dichos elementos requeridos en las vías férreas debido a su elevada resistencia a compresión. A pesar de esta preferencia, aún existen numerosos kilómetros vías férreas en las que se continúan empleando, como la rehabilitación y/o sustitución de traviesas deterioradas.

Además, en zonas rurales en las que existen trenes turísticos o históricos de limitada capacidad puede optarse por el empleo de este tipo de traviesas de madera como alternativa sostenible con el entorno, con el fin de preservar la estética y minimizar el impacto visual.



Figura 3.11: Traviesas de madera de Pino Carrasco

En el ámbito estructural es frecuente su utilización para pequeñas piezas en estructuras que no requieren de una amplia luz y no están sometidas a importantes esfuerzos.

Este es el caso de muchas pasarelas (figura 3.12) en la zona mediterránea, donde pueden encontrarse los tableros, y las celosías de soporte de los mismos, de este tipo de madera. En estas mismas estructuras, los pilares pueden ser también de este tipo de madera en aquellos casos que no requieran de una elevada altura y una amplia sección.



Figura 3.12: Pasarelas de madera de Pino Carrasco

Existe también un importante uso en puentes que cruzan pequeños ríos o arroyos (figura 3.13), que por lo general son estrechos y no muy elevados. El empleo de la madera en este tipo de construcciones es fundamental para preservar la estética y garantizar la armonía visual con el medio ambiente.



*Figura 3.13: Puentes de madera de Pino Carrasco*

Pueden encontrarse también algunas construcciones en el ámbito rural o en la costa en las que se utiliza la madera de Pino Carrasco, en cuyo caso el empleo de otros materiales como hormigón o acero supone un notable impacto visual. Tanto en casas rurales como en observatorios de la fauna y flora (figura 3.14) que se encuentran rodeados de vegetación es frecuente la construcción con este tipo de madera.



*Figura 3.14: Observatorios de madera de Pino Carrasco*

En cuanto al uso de piezas a compresión en dirección paralela a las fibras pueden reconocerse los ejemplos anteriores ya que los pilares de las pasarelas, puentes u observatorios están constituidos por piezas de reducido tamaño que, en la dirección paralela a las fibras, soportan los esfuerzos a compresión. Este es el caso también de viviendas rurales o modulares que no requieren de elevada altura y cuyos pilares pueden ser fabricadas con piezas de este tipo de madera como puede verse en la figura 3.15.



*Figura 3.15: Pilares sometidos a esfuerzos de compresión paralela a las fibras en viviendas rurales y modulares*

# 4. CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES (DIC)

## 4.1. Introducción

La Correlación Digital de Imágenes surge en sus inicios como una rama de la fotogrametría digital, donde se analiza la correspondencia entre dos imágenes, datando los primeros antecedentes históricos a finales de la década de 1950 y siendo considerado como el principal precursor de esta disciplina el estadounidense Gilbert Louis Hobrough (Louis, 1960), quien demostró por primera vez el concepto de correlación de imágenes. Poco después, a principios de los 60, fue el propio Hobrough quien planteó el primer experimento como una correlación del tipo analógica, en la cual trataba de comparar mediante un instrumento diseñado por él mismo, dos imágenes de alta resolución a través del contraste de sus niveles de grises (1960).

El primer equipo propuesto específicamente para la correlación data de 1968 y fue diseñado por la compañía suiza Wild Heerbrugg, pionera en fotogrametría por aquel entonces. Sin embargo, a pesar de suponer una gran novedad, presentaba una serie de defectos que mermaron su impacto en el sector, principalmente debido a la reducida flexibilidad y exactitud que presentaba el equipo.

Los primeros estudios en cuanto a la correspondencia de imágenes se habían llevado a cabo de manera analógica. Con el paso de los años avanzaron los estudios en cuanto a la tecnología digital y la investigación pasó a centrarse en la fotogrametría digital. La búsqueda o identificación de puntos homólogos en las imágenes era remplazada por la “correlación”, la cual se realizaba en base a un software informático. De esta manera, el proceso de análisis pasó a ser completamente automatizado.

A raíz de esto surgen las primeras investigaciones en cuanto a la correlación digital. Inicialmente se centraron en el análisis del terreno, como las llevadas a cabo por uno de los ingenieros alemanes más destacados de la época en este campo (Kreiling, 1976) para generar Modelos Digitales de Elevación y ortofotos a partir de fotografías aéreas que permitían el cálculo de elevaciones mediante correlación digital. Otros investigadores como (Helava, 1988), y el ya mencionado Hobrough, trataron de aportar innovaciones en las técnicas de correlación. Sin embargo, no se encontró una solución universal que permitiera aplicar la técnica de forma genérica, sino que se trataba de aplicaciones muy específicas en campos concretos como el mencionado de MDE.

A finales de la década de 1980 y principios de la siguiente, comenzaron a sumarse a dicha investigación técnicas aplicadas en otras áreas tales como la robótica y la inteligencia artificial. Estas técnicas permitieron desarrollar algoritmos fundamentados

metodologías de visión en estéreo que fueron aplicadas en otras áreas tales como el reconocimiento de caracteres o la fotogrametría aérea. No obstante, la aplicación de dichas técnicas en sus inicios al ámbito de la ingeniería y la caracterización de materiales era muy escasa, centrándose en otros sectores como la medicina o la radiología.

La técnica relativa a la correlación alcanzaba un punto de madurez ya en la década de 1990, pero se necesitaba una mejora en cuanto a los aspectos técnicos. Se puso entonces de manifiesto el desarrollo de métodos de grabación digital que permitía llevar a cabo la medición de los datos de forma más precisa. Además, los algoritmos empleados para los softwares fueron también mejorados de forma notable debido a los avances computacionales. De esta manera, se posibilitó un mejor análisis de las imágenes digitales tomadas y la posterior extracción de los datos medidos en ellas. Además, se trató de buscar diferentes formas de enfocar la automatización de todo este proceso, logrando así múltiples softwares con características similares.

El desarrollo relativo a los procedimientos hasta ahora mencionadas es referido a las técnicas 2D, y no fue hasta la década de 1990 cuando comenzaron a desarrollarse técnicas para 3D. Se puso de manifiesto la importancia de las deformaciones producidas fuera del plano de estudio en aquellos casos en los que éste no fuera perpendicular a la toma de imágenes. Empezaron a surgir a partir de este momento las técnicas tridimensionales, que a pesar de no ser tratadas en este TFG, adquieren una importancia en la actualidad, mejorando considerablemente la técnica de Correlación Digital de Imágenes para el análisis de materiales de forma irregular.

## 4.2. Metodología de la Correlación Digital de Imágenes

La Correlación Digital de Imágenes, también conocida como videocorrelación o DIC por sus siglas en inglés (Digital Image Correlation), es una técnica de análisis experimental basada en el tratamiento de imágenes digitales. Éstas son tomadas durante el proceso de ensayo y posteriormente procesadas de forma que permite evaluar, como aspectos más importantes, los desplazamientos y deformaciones producidas en el material ensayado. En determinados casos pueden llegar a medir incluso tensiones o aceleraciones, en función de los diferentes softwares utilizados para el tratamiento de las imágenes. Para ello se requiere conexión directa en tiempo real entre el ordenador con dicho software y la máquina de ensayos. De esta manera pueden tomarse los datos de los correspondientes esfuerzos, pudiendo obtener algunas propiedades tales como el módulo de elasticidad o coeficiente de Poisson sin la necesidad de realizar cálculos auxiliares.

Se trata de una técnica empleada principalmente en la caracterización de materiales y aplicada de manera conjunta en los ensayos de tracción y de compresión, permitiendo así analizar las deformaciones sufridas por los materiales en función de las cargas aplicadas en los ensayos.

La técnica consta de un proceso no muy complejo pero en el que se han de seguir minuciosamente una serie de pasos, donde mediante una cámara digital se han de tomar imágenes secuenciales del ensayo a realizar. En primer lugar, se ha de obtener un fotograma como referencia del estado inicial, en reposo y sin deformación. A continuación, se realizará la toma de imágenes sucesivas hasta el instante en el que se desea finalizar el ensayo. En este último punto, habrá de obtenerse un nuevo fotograma correspondiente al estado final en el que se ha completado la deformación. En casos de breve duración de ensayos o para una mayor precisión en cuanto a la evolución de las propiedades a analizar, se puede optar por la grabación de vídeo para una posterior secuenciación de los fotogramas.

Se debe realizar un proceso previo de tratamiento de las probetas o materiales a ensayar para que las imágenes puedan ser posteriormente analizadas por el software empleado para su procesamiento. Será necesario por tanto la aplicación de un patrón estocástico que permita generar una escala de grises de gran contraste. Para ello, inicialmente se aplicará sobre la superficie a estudiar una base de pintura en spray de color blanco mate para evitar la aparición de brillo. Posteriormente se generará un nuevo moteado aleatorio de pintura en spray de color negro mate. Esta última capa habrá de ser aplicada de tal forma que se produzca un patrón no homogéneo por toda la superficie que permita reconocer diferentes tonos de grises para el posterior procesado.

Una vez se han obtenido las imágenes de cada estado de carga con su correspondiente deformación, la técnica pasa a su fase de procesado mediante el software adecuado. En este caso se ha empleado el programa *GOM Correlate* para el análisis de imágenes, del

que posteriormente se detallarán sus fundamentos y los aspectos más importantes para su utilización.

A grandes rasgos, se puede decir que, tanto éste como el resto de softwares de Correlación Digital de Imágenes, están basados en la maximización de un coeficiente de correlación establecido a partir del estudio de un subconjunto de píxeles. Este subconjunto se basa en términos generales en la comparación de la intensidad de la escala de grises entre dos imágenes (la inicial tomada como referencia y la que corresponde a cada estado de carga), por lo que con su debido análisis se puede obtener el mapa de deformaciones o desplazamientos en cada una de las imágenes estudiadas.

De esta forma, al disponerse de un mapeo puede obtenerse la información de toda la muestra estudiada. Dicho mapa permite analizar la superficie completa y no únicamente la deformación o desplazamiento en un punto determinado como el valor medio de la zona de estudio.

La técnica puede ser empleada y aplicada tanto para el tratamiento de imágenes en 2D como en 3D. En el primero de los casos basta con disponer de una única cámara para obtener la secuencia de imágenes con un posicionamiento fijo. En el segundo caso, es necesaria la utilización de dos cámaras calibradas con la orientación y distancia precisa que permita la obtención de imágenes en tres dimensiones para el posterior procesado y análisis de las imágenes. La principal diferencia de emplear la técnica en 2D y en 3D radica en la obtención de deformaciones y desplazamientos fuera del plano principal de estudio.

#### **4.2.1. Fundamento matemático de la Correlación Digital de Imágenes**

La técnica DIC analiza las imágenes permitiendo obtener parámetros tales como el desplazamiento de los puntos de referencia o la deformación de éstos a lo largo del plano de estudio. Este análisis está basado en la maximización de un coeficiente de correlación establecido a partir de la comparación de la escala de grises entre dos imágenes. Dicha escala de grises se obtiene aplicando en la superficie a analizar un moteado negro sobre una base de pintura blanca permitiendo hallar de esta manera el grado de semejanza entre las diferentes imágenes.

Para ello, se divide inicialmente la imagen en diferentes subconjuntos de píxeles denominados “facetas” en las cuales se centrará la comparación (figura 4.1). En la imagen de referencia esta faceta adquirirá la denominación de faceta de referencia o L, mientras que la correspondiente a la misma en la imagen deformada se denominará faceta de búsqueda, correspondencia o R.

A continuación se fijará en la faceta de referencia un punto central  $P(x_0, y_0)$  conocido como “patrón” que determinará las coordenadas de la misma y a partir del cual se medirán los desplazamientos como se explicará más adelante.

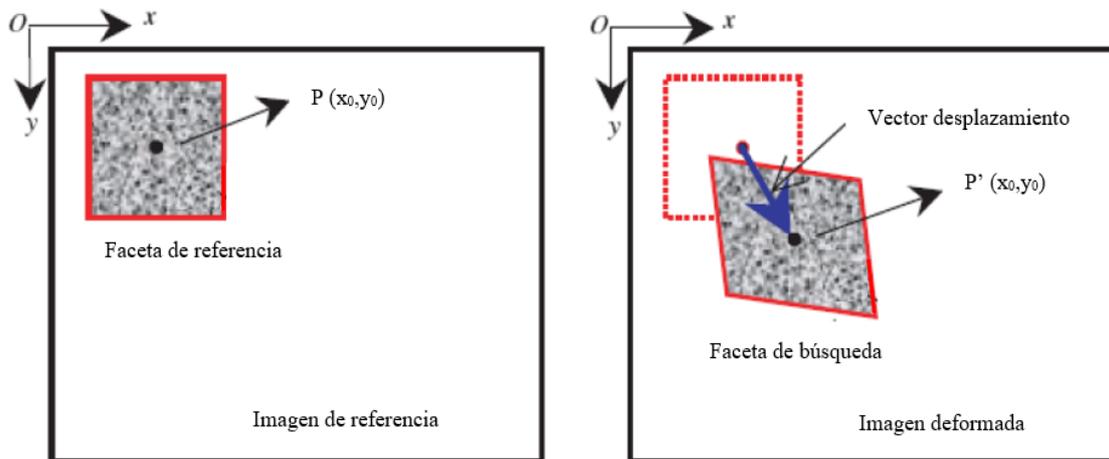


Figura 4.1: Búsqueda del punto central  $P$  en la faceta correspondiente a la imagen deformada

Para dichas facetas de imágenes, tanto de referencia como de búsqueda, se establecen las correspondientes “funciones imagen” que relacionan la intensidad de grises de cada una de ellas. Estas funciones quedan definidas matemáticamente como se muestra a continuación:

$$\bar{g}_L = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_L(x_i, y_j)}{n \cdot m}$$

$$\bar{g}_R = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_R(x_i, y_j)}{n \cdot m}$$

Siendo:

- $g_L(x_i, y_j)$  = valor en la escala de grises correspondiente al pixel  $x_i, y_j$  de la imagen L.
- $g_R(x_i, y_j)$  = valor en la escala de grises correspondiente al pixel  $x_i, y_j$  de la imagen R.
- $n$  = número de píxeles en la dirección  $i$ .
- $m$  = número de píxeles en la dirección  $j$ .

Una vez definidas las funciones imagen correspondientes a las facetas será necesario calcular la desviación típica de cada una de ellas y la covarianza entre ambas para poder realizar posteriormente el cálculo del coeficiente de correlación. En términos matemáticos estos parámetros se expresan de la siguiente forma:

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_L(x_i, y_j) - \bar{g}_L)^2}{n \cdot m - 1}}$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_R(x_i, y_i) - \bar{g}_R)^2}{n \cdot m - 1}}$$

$$\sigma_{LR} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((g_R(x_i, y_i) - \bar{g}_R)^2 (g_L(x_i, y_i) - \bar{g}_L)^2)}{n \cdot m - 1}$$

Por último, se define el coeficiente de correlación  $\rho$ :

$$\rho = \frac{\sigma_{LR}}{\sigma_L \sigma_R}$$

Donde:

- $\sigma_{LR}$ = covarianza de las facetas de imagen L, en este caso el patrón, y R, en este caso la ventana de correspondencia.
- $\sigma_L$ = desviación típica o estándar de la faceta de imagen L.
- $\sigma_R$ = desviación típica o estándar de la faceta de imagen R.

A partir del cálculo del coeficiente de correlación, pueden obtenerse valores entre -1 y +1, intervalo [-1,1] adquiriendo el siguiente significado en cada uno de los casos y quedando resumido en la tabla 4.1:

- En el caso de que la correlación sea completa, es decir, la faceta sea idéntica en la imagen de referencia y la imagen a analizar, el coeficiente tomará valor +1.
- Si por el contrario la correlación es totalmente inversa, el coeficiente adquirirá un valor -1.
- En caso de que no exista ninguna coincidencia entre las facetas analizadas, el coeficiente de correlación tomará el valor 0.
- Los valores comprendidos en el intervalo [-1,1] que sean distintos de los anteriores indicarán la existencia de correlación pero ésta no será completa. Es decir, habrá coincidencia entre las facetas analizadas pero no serán idénticas. En este caso, los valores del coeficiente estarán comprendidos en el intervalo (-1,0) si la correlación es inversa y el (0,1) si la correlación es directa.

Valor/Intervalo	Significado
-1	La faceta es inversa
(-1,0)	Correlación inversa
0	No hay coincidencia
(0,1)	Correlación directa
1	La faceta es idéntica

*Tabla 4-1: Valores del coeficiente de correlación*

Una vez se han definido los fundamentos matemáticos que constituyen la base del principio de la Correlación Digital de Imágenes, pueden establecerse los pasos a seguir en el proceso de análisis.

- a) En primer lugar será necesario definir una superficie de estudio en cuyo área se centrará toda la búsqueda de desplazamientos y que generalmente ha de coincidir con la superficie pintada del material a analizar.

- b) A continuación se define el tamaño de las facetas a emplear para la búsqueda, expresando las dimensiones en píxeles. Por lo tanto, la superficie de estudio quedará dividida en facetas. Cada una de ellas tendrá unas coordenadas de referencia dadas por el punto central tomado en la imagen inicial de referencia.
- c) A continuación se asignará para cada una de las facetas una ubicación aproximada en la imagen deformada, constituyendo así la denominada ventana de búsqueda en la cual se centrará el análisis (figura 4.2). En función de las dimensiones introducidas para las facetas, esta ventana de búsqueda tomará una extensión proporcional.

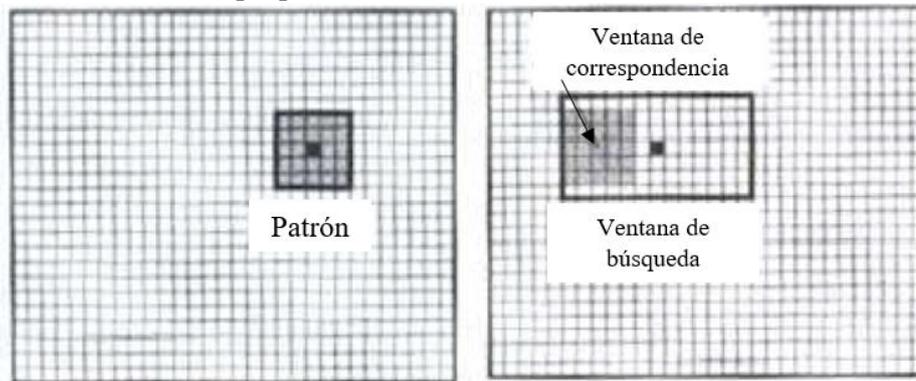


Figura 4.2: Determinación del patrón y la ventana de búsqueda

- d) Como la superficie de la ventana de búsqueda es mayor que la de una faceta, se establecen diferentes ventanas de correspondencia dentro de ella del mismo tamaño que la faceta de referencia, que podrán situarse en cada una de las posiciones correspondientes a cada pixel. Cada una de estas nuevas ventanas de correspondencia tendrá asignada unas coordenadas definidas por el punto central. A partir de estas coordenadas se definirían las funciones imagen y se habrán de calcular los coeficientes de correlación asociados a cada una de las ventanas de correspondencia.
- e) El software establece un valor mínimo para el coeficiente de correlación a partir del cual determina que existe correlación entre ambas imágenes. Una vez se hayan analizado los coeficientes de correlación de todas las ventanas de correspondencia posibles en la ventana de búsqueda se determinará la ventana correspondiente al valor máximo.
- f) El punto central de la ventana de correspondencia con el máximo coeficiente de correlación en la imagen deformada ( $P'(x_0, y_0)$ ) corresponderá al punto homólogo de la faceta de referencia ( $P(x_0, y_0)$ ) (figura 4.1.).
- g) Por lo tanto, una vez se han determinado las coordenadas del patrón en la imagen deformada, puede obtenerse el vector desplazamiento entre los puntos  $P$  y  $P'$ .

Realizando todos estos pasos con cada una de las facetas de la superficie de estudio pueden obtenerse los vectores de desplazamiento en cada uno de los puntos del plano. Estos valores pueden obtenerse tanto en porcentaje como en píxeles. Además, es posible introducir inicialmente una escala en el software que permita la medición directa de los desplazamientos en la unidad de longitud establecida.

### 4.3. Comparativa frente a métodos convencionales

La Correlación Digital de Imágenes se trata por tanto de una técnica novedosa que se ha venido desarrollando principalmente en los inicios del siglo XXI. Gracias a su evolución, permite disponer de una serie de ventajas respecto a otros métodos convencionales como las galgas extensiométricas o extensómetros y los sensores ópticos de deformación, que son los instrumentos comúnmente utilizados para medir desplazamientos o deformaciones. Sin embargo, éstas son técnicas invasivas y/o destructivas ya que requieren contacto directo con los materiales al ser pegados o soldados a éstos. En este caso, la Correlación no requiere de contacto, al realizarse las mediciones mediante imágenes tomadas a distancia con una cámara digital

Uno de los principales análisis de la técnica 2D DIC (Pan, et al., 2009) plantea una serie de ventajas, respecto a otras tecnologías de medición, de los cuales se destacan las siguientes:

- a) La técnica en sí no requiere de gran complejidad o medios técnicos como se ha explicado anteriormente. A pesar de suponer un trabajo minucioso, no precisa complejos requerimientos informáticos en cuanto al software empleado.
- b) El proceso experimental constituye un trabajo laborioso, siendo necesaria la preparación de las muestras y la continua toma de imágenes. Sin embargo, puede desarrollarse tanto en exteriores como en interiores al ser indiferente el uso de luz natural o luz artificial. A pesar de ello, generalmente se emplean unidades de iluminación para garantizar la calidad en la toma de las imágenes.
- c) Por sus reducidos requerimientos en cuanto a medios a emplear, se trata de un sistema de bajo coste tanto a nivel económico como de tiempo. Las técnicas convencionales como por ejemplo, los extensómetros o sensores ópticos requieren de dispositivos más complejos y costosos.
- d) Se califica como una técnica ni destructiva ni invasiva, es decir, no requiere de contacto con el material a analizar para la toma de información, pues utiliza algoritmos de la fotogrametría y visión computacional basados en el análisis de las imágenes tomadas.
- e) El hecho de tratarse de una técnica sin contacto, permite la continua toma de datos frente a otros métodos convencionales. Por ejemplo, en el caso de las galgas extensiométricas, al ir adheridas al material, si se produce la rotura de éste, los sensores se desprenden y pierden el contacto con el material de ensayo impidiendo la toma de medidas.
- f) Permite la obtención de un mapa de deformaciones o desplazamientos en toda la superficie analizada (bien sea en 2D o 3D). Por el contrario, con los métodos convencionales las mediciones son puntuales, obteniendo valores de deformación solo en los puntos donde son colocados los dispositivos de medición.

- g) La precisión de la información obtenida depende en gran parte de la calidad de las imágenes tomadas y, por lo tanto, de la calidad de la cámara digital empleada. Hoy en día, equipos de alta calidad permiten obtener precisiones de hasta 0,01 pixel en el caso de la medida de los desplazamientos y de hasta 0,01% para el caso de las deformaciones unitarias. Estas precisiones son muy superiores a las obtenidas con extensómetros, que generalmente se sitúan en torno al 1%.

Sin embargo, a pesar de ser una técnica que se ha ido consagrando en los últimos años debido a los grandes avances tecnológicos, presenta aún en la actualidad una serie de aspectos a mejorar que pueden llegar incluso a permitir la obtención de mejores resultados. Entre ellos destacan los que se muestran a continuación.

- a) Como se ha comentado anteriormente, la precisión en la información obtenida depende de la calidad del equipo empleado. Utilizar cámaras digitales de última generación para la toma de imágenes permitirá obtener una alta resolución que posibilite un análisis y resultados de calidad. Por lo tanto, cuanto mayor sea el avance tecnológico en este aspecto, mayor será la calidad de la técnica.
- b) El proceso de preparación de las probetas se ha de realizar con gran precisión, principalmente en lo que a la aplicación del patrón se refiere con el fin de obtener el mayor contraste posible entre el moteado negro y el fondo blanco. Por ello será preciso disponer de pinturas de calidad que permitan una preparación adecuada. En el apartado correspondiente se detallará el procedimiento seguido para la preparación de las muestras que se utilizarán en los ensayos.
- c) La superficie a examinar ha de estar libre de imperfecciones (grietas o fisuras), ya que en caso de existir éstas, los datos obtenidos de deformaciones en la zona de las mismas, pueden ser erróneos. Dichas impurezas pueden hacer perder información al constituir puntos de concentración de tensiones en los cuales las deformaciones serán muy diferentes al resto de la muestra. Para evitar esto habrá de realizar los ensayos con materiales libres de defectos.

## 4.4. Aplicaciones de la técnica DIC en el campo de la ingeniería

Como ya se ha comentado anteriormente, si bien las primeras técnicas de correspondencia de imágenes trataron de emplearse para el análisis del terreno, una vez se consolidó la Correlación Digital de Imágenes, ésta comenzó a ser utilizada para otras áreas. La ingeniería supone el principal campo de aplicación con multitud de modalidades en diferentes investigaciones del área industrial, de materiales, etc. Además, la técnica también es utilizada para otros campos que han aprovechado la fiabilidad y variabilidad de la misma para su aplicación. Entre ellos, se pueden destacar algunos como la microscopía, medicina o radiología.

De esta manera, el reciente desarrollo tecnológico y la garantía alcanzada por la técnica han permitido que desde principios del siglo XXI, investigadores en diversos campos de la ingeniería hayan implementado la técnica DIC en sus ensayos. Debido a las ventajas comentadas anteriormente, en algunas ocasiones han sustituido a otros métodos de medición convencionales, o han aprovechado ambos para realizar una comparación entre cada una de ellas.

El principal campo de estudio y aplicación de la Correlación Digital de Imágenes en lo referido a la ingeniería, abarca principalmente el área del análisis mecánico de diversos materiales, tanto para la obtención de sus características físicas como para el análisis de deformaciones estructurales. A continuación se comentan una serie de artículos científicos con estudios en este sentido.

En el ámbito español, los Congresos Nacionales de Ingeniería Mecánica organizados por la Asociación Española de Ingeniería Mecánica han servido como precursores de la técnica, siendo en éstos donde se han presentado dos ensayos importantes. En el primero de ellos (López-Alba, et al., 2010), aplican la Correlación para analizar la deformación en probetas planas de policarbonato que presentan discontinuidades, comparando los resultados con simulaciones por elementos finitos. Posteriormente (López-Alba, et al., 2012), aplicaron la Correlación para determinar el valor de las deformaciones del contacto puntual entre sólidos. Para ello emplearon una pieza de policarbonato y otra de bronce, de modo que esta última pudiera ser considerada infinitamente rígida respecto a la pieza en la cual se miden las deformaciones.

Otras aplicaciones han tenido lugar a nivel microscópico (Canal Casado, et al., 2010), dedicadas a estudiar la evolución de las deformaciones producidas en materiales laminados de matriz polimérica.

Por otro lado (Resendiz-Hernández & Palacios Pineda, 2017) emplean la Correlación Digital de Imágenes para analizar las deformaciones producidas en juntas soldadas, localizando las zonas de fallo en uniones soldadas en estructuras metálicas, validando los resultados mediante la simulación por elementos finitos.

En el campo de la fractura de materiales (Luo, et al., 2017) analizan las líneas de rotura a partir de la evolución de las tensiones en una grieta preexistente en probetas circulares de mármol. Los ensayos se realizan variando el ángulo de las grietas para comparar así las diferentes probetas y determinar la influencia de la inclinación de éstas.

Dentro de la Ingeniería Civil, en el campo ferroviario (Sabato & Niezrecki, 2017), proponen un sistema de evaluación de las deformaciones de las vías férreas, mediante DIC en 3D, con el fin de llevar a cabo el Monitoreo de la Salud Estructural (SHM) de los carriles ferroviarios.

El hormigón es uno de los materiales empleados con mayor asiduidad en la Ingeniería Civil y del cual pueden encontrarse también algunos casos. La Correlación Digital de Imágenes ha sido empleada para analizar el proceso de fractura del hormigón armado (Fayyad & Lees, 2014), sometiendo pequeñas probetas a flexión para determinar la propagación de las grietas, cuyos desplazamientos se han medido gracias a la técnica DIC.

En esta misma línea, (Aghlara & Tahir, 2018) han analizado el enlace acero-hormigón. Para ellos realizaron ensayos en los cuales una barra de acero embebida en un bloque de hormigón se sometía a esfuerzos de extracción, validando la gran calidad de las deformaciones calculadas mediante el método DIC con una cámara semiprofesional.

El acero es otro de los materiales más frecuentes en las estructuras de Ingeniería Civil y que también ha sido analizado en diferentes modalidades. (Krishnan, et al., 2014) emplearon la Correlación Digital de Imágenes para medir deformaciones en probetas planas de acero sometido a pruebas de tracción de alta tensión. De esta manera, los resultados obtenidos constituían los datos necesarios para un posterior análisis numérico del material.

También se ha empleado la técnica para la evaluación de la fase plástica del acero durante esfuerzos a tracción (Guo, et al., 2017). El método DIC permite en este caso calcular las deformaciones sufridas por el material frente a las cargas aplicadas en diferentes direcciones y comparar así el comportamiento en cada una de estas direcciones.

A nivel de enseñanza, también ha sido aplicada esta metodología en proyectos de innovación docente. Es el caso de la Universidad Nacional de Misiones (Alonso, et al., 2016) donde profesores y estudiantes utilizaron la técnica para determinar las deformaciones en materiales constructivos como el ladrillo, comparando las obtenidas mediante DIC con los resultados de los ensayos con flexímetros.

#### 4.4.1. Aplicaciones a la caracterización de la madera

Dentro de los diferentes materiales que se han analizado con esta técnica, uno de los más complejos en cuanto a su estudio es la madera. Debido a las características y propiedades descritas en apartados anteriores presenta diversas dificultades que la hacen un material singular con múltiples campos de estudio, como consecuencia de la gran variedad de tipos de madera que podemos encontrar en el mercado y el gran número de propiedades a examinar.

Sin embargo, en el campo de la madera existen menos investigaciones con DIC en comparación con los estudios de otros materiales como el hormigón o el acero. Ello se debe, en gran parte, al menor uso de la madera a nivel estructural. La cierta incertidumbre en el conocimiento de sus características físicas, su marcado carácter ortotrópico, la amplia variedad de especies, la menor resistencia tensional respecto a otros materiales y el mantenimiento que se debe realizar en las estructuras de madera, motiva que, a la hora de diseñar y calcular una estructura, se valore como primera opción el uso de otros materiales, donde sus características mecánicas son conocidas con mayor grado de exactitud, como por ejemplo las el acero o el hormigón.

Pero en estos últimos años, debido a la justificada preocupación por el medio ambiente y con el fin de preservar la estética y minimizar el impacto visual de los entornos rurales, se hace cada vez más necesario el uso de la madera en las construcciones rurales. Por lo que un primer paso es intentar determinar las características mecánicas de la madera con técnicas distintas a las usadas hasta la actualidad como han sido las galgas extensiométricas o los sensores ópticos. Dichas técnicas tienen un carácter destructivo e invasivo en cuanto a que es necesario el contacto directo con el material. De esta manera la DIC se presenta como una metodología ni invasiva ni destructiva, e idónea para su implementación en los ensayos con madera. Permite además determinar con exactitud sus parámetros mecánicos, valores fundamentales necesarios para realizarlos cálculos estructurales posteriores.

Uno de los primeros estudios de la madera llevados a cabo utilizando la técnica DIC data de finales del siglo pasado (Zink, et al., 1997). En él, se realizó la medición de los coeficientes de Poisson del Tulípero (*Liriodendron tulipifera*) mediante ensayos de probetas de esta madera a compresión. Para ello se empleó un método de Correlación Digital de Imágenes basado únicamente en un número limitado de puntos distribuidos en la superficie de las probetas de madera a ensayar. Los resultados obtenidos mediante dicha técnica fueron comparados con valores bibliográficos, determinándose que el uso de la Correlación era válido para la obtención de estos coeficientes. Sin embargo, el hecho de que únicamente se realizara la Correlación en base a un número reducido de puntos, asemeja bastante el método empleado a otros dispositivos como los extensómetros que ofrecen únicamente mediciones puntuales con menor precisión. Obviamente, tanto el software como la técnica en sí han sufrido desde entonces un evidente progreso, permitiendo en la actualidad una mayor calidad y precisión en los resultados así como un mapeo de valores que no fue posible obtener en esta ocasión.

Posteriormente, cuando la técnica fue mejorada y se desarrollaron diversos softwares más potentes y específicos, fue empleada para la comparación de las propiedades de dos tipos de madera, mediante ensayos a tracción (Bjurhager, et al., 2008). En este caso, se compara el álamo temblón europeo (*Populus tremula*) con el álamo temblón híbrido (*Populus tremula* y *Populus tremuloides*) utilizando para ello el software ARAMIS, también de la compañía GOM.

Por otro lado (Jeong, et al., 2009) utilizan el sistema de DIC en ensayos de tracción con madera temprana y tardía extraída del *Pinus Taeda*, comparando los módulos de elasticidad y coeficientes de Poisson de estas dos especies de madera en función de los anillos de crecimiento. Al tratarse de muestras de reducido tamaño, emplea esta técnica de no contacto a nivel microscópico, acoplado a una cámara digital a un microscopio de manera que permita la toma de capturas durante el proceso de carga.

(Jeong, et al., 2010) analizan la ortotropía de la madera, utilizando la DIC y el ensayo de tracción, de forma que le permite obtener las propiedades elásticas y valores de resistencia en todas las direcciones necesarias para configurar la matriz de constantes elásticas que caracteriza a dicho material. En este caso además compara los valores obtenidos en los ensayos realizados en cada una de las direcciones con respecto a las fibras (longitudinal, radial y tangencial). Corroborar así la ortotropía de la madera al verificar la influencia que tiene la dirección a la hora de determinar a las propiedades elásticas.

Por otro lado existen estudios de madera laminada con Correlación Digital de Imágenes. (Dubois, et al., 2012) caracterizan la fractura de la madera mediante DIC determinando el estado cinemático y desplazamiento producido en una grieta y estableciendo la relación con el análisis por elementos finitos, obteniendo con ello los parámetros de fractura de dicho material.

Además la madera aserrada se ha llegado a comparar también con la madera laminada. (Ritschel, et al., 2013) realizan pruebas con DIC y ensayos de tracción con distintos tipos de madera aserrada y laminada, comparando los resultados obtenidos con la técnica de monitoreo por emisión acústica (AE). El análisis permite observar la evolución de las tensiones originadas en los distintos tipos de madera, laminada y aserrada, durante el ensayo de tracción. La comparación de ambos métodos permite además la validación de la técnica DIC debido a la alta resolución de sus resultados.

La técnica DIC también se ha utilizado para la obtención de propiedades elásticas y módulos de rigidez de la madera en ensayos a flexión (Guindos & Ortiz, 2013). Permite además introducir los datos obtenidos mediante la Correlación Digital de Imágenes para la realización de un modelo por elementos finitos.

Con ensayos a flexión (Kunecký, et al., 2015), analizan el comportamiento de las uniones o juntas en la madera. Con la técnica DIC obtienen las deformaciones sufridas en las juntas de madera, comparando dichos resultados con análisis por los elementos finitos, verificando las ventajas que tiene la DIC en la facilidad y precisión de resultados.

En una de las publicaciones más recientes (Jeong & Park, 2016) emplean la Correlación Digital de Imágenes para analizar nuevamente la ortotropía de la madera. En este caso realizan ensayos a tracción con cuatro tipos de diferentes especies, comparando cada uno de los módulos de elasticidad en las diferentes direcciones con su homólogo en los otros tipos de madera empleada. En los resultados obtenidos puede verse que existen diferencias entre los valores obtenidos para cada una de las especies. Sin embargo, es mayor la diferencia entre los módulos de elasticidad obtenidos para cada una de las direcciones dentro de un mismo tipo de madera que la que hay entre las diferentes especies. Por lo tanto, se evidencia nuevamente la influencia de la dirección a la hora de determinar las propiedades elásticas.

# 5. MATERIAL Y METODOLOGÍA

## 5.1. Preparación de probetas

El material a estudiar en el presente TFG se corresponde con la madera procedente del Pino Carrasco, cuyo nombre científico es *Pinus halepensis*. Se trata de un árbol de procedencia principalmente mediterránea, encontrándose por lo general en el este de la Península Ibérica que es empleado principalmente para la fabricación de traviesas y para la construcción de pasarelas y puentes que cruzan el cauce de pequeños ríos.

Para la realización de los ensayos a compresión se han preparado probetas de madera sin desperfectos de Pino Carrasco en las especificaciones que contempla la norma *UNE: 56535:1977. Características Físico-Mecánicas de la Madera. Determinación de la Resistencia a la Compresión Axial*, siendo sus dimensiones de 20x20x60 mm, correspondiendo la dimensión mayor a la dirección longitudinal de ortotropía paralela al crecimiento de las fibras. Se obtuvieron un total de veinte (20) probetas.

Sin embargo, no todas se ensayaron con la misma orientación, empleando dos posiciones diferentes como puede verse a continuación (figura 5.1). De esta manera, se ensayaron diez (10) probetas en cada una de las orientaciones mostradas. Estas orientaciones permiten la medición de deformaciones en dos planos mediante la Correlación Digital de Imágenes:

- a) Posición A: la cámara digital se sitúa frente al plano correspondiente a la dirección tangencial. En este caso, la Correlación permite la medición de las deformaciones longitudinales ( $\epsilon_L$ ) en el plano tangencial.
- b) Posición B: el plano de estudio frontal en el que se realizan las mediciones para obtener las deformaciones longitudinales ( $\epsilon_L$ ) se corresponde con la dirección radial.

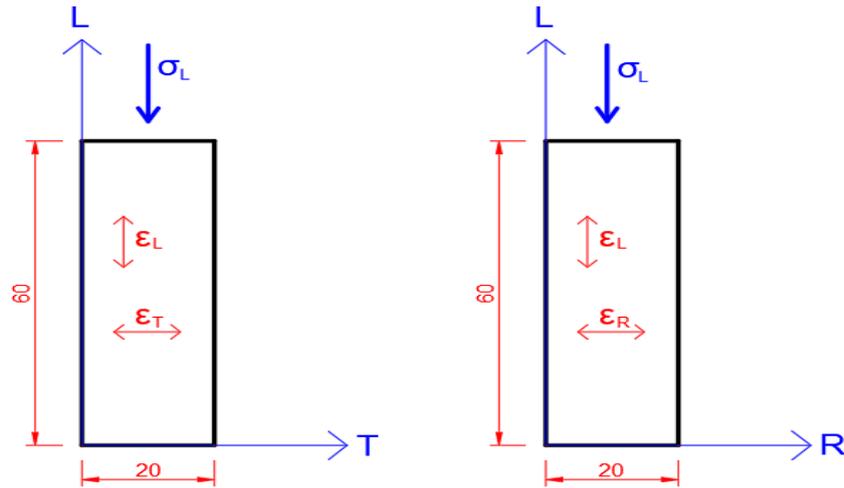


Figura 5.2: Orientación de las probetas. Posición A (izquierda); Posición B (derecha).

Después de determinada la orientación de las probetas, éstas se numeran con un código formado por una letra y un número. La letra representa la posición del ensayo correspondiente a la orientación A o B definidas anteriormente. El número indica el orden de la probeta a ensayar, con el fin de permitir un correcto orden de los ensayos e interpretación de los datos posteriores. Para poder ver la numeración después de la deformación de la probeta, ésta se dibujó en el plano lateral derecho (respecto al de la medida de las deformaciones) y en la parte central de la probeta. A continuación se muestra la numeración de las veinte probetas utilizadas (figura 5.2):

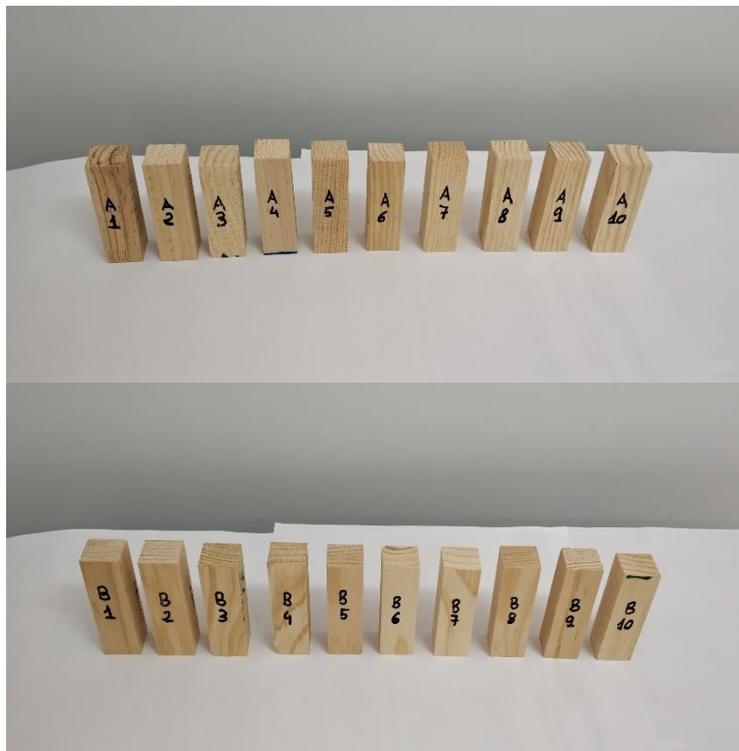
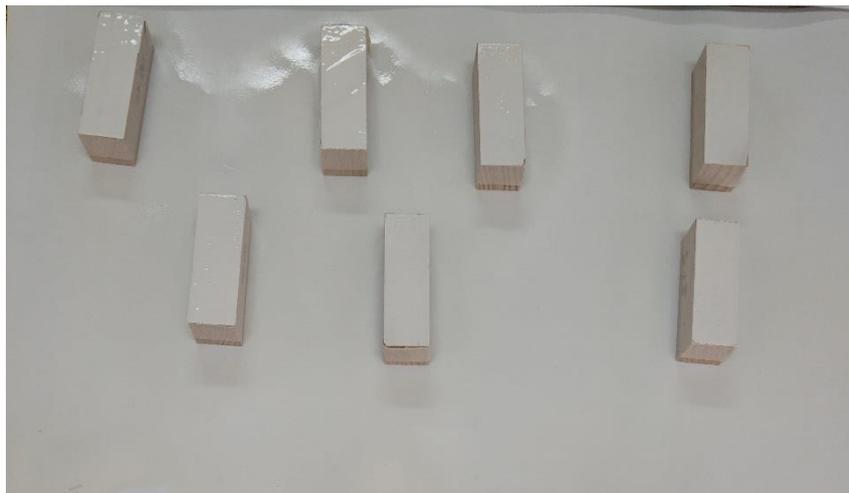


Figura 5.1: Numeración de las probetas

El siguiente proceso consiste en el tratamiento de pintura de las probetas necesario para el análisis de deformaciones por parte del software de Correlación Digital de Imágenes.

En primer lugar se aplica, sobre la superficie a analizar, una primera capa de pintura en spray de color blanco mate (para evitar la aparición de brillos y reflejos que disminuyan la calidad de las imágenes). Debe evitarse el exceso de pintura ya que provoca la formación de burbujas por la absorción de los poros de la madera. En algunos casos si se produce dicha absorción es necesario aplicar una segunda capa, para garantizar que toda la superficie queda completamente blanca (figura 5.3).



*Figura 5.3: Aplicación de capa de pintura blanca*

Una vez seca la capa de pintura blanca, se ha de aplicar una segunda capa de pintura en spray negra mate. En este caso la distribución no ha de ser uniforme para que se genere un moteado a base de puntos negros en contraste con el fondo blanco. Para ello, se aplica el spray desde una distancia de aproximadamente 50cm a base de pequeñas salpicaduras y con un movimiento aleatorio, con el fin de evitar cubrir toda la superficie por igual. De esta forma se obtiene un patrón heterogéneo como puede verse a continuación en la figura 5.4.



*Figura 5.4: Aplicación del moteado negro sobre base blanca*

Tras la aplicación de cada una de las capas de pintura a todas las probetas, se procede al secado de las mismas obteniendo el moteado en la superficie de cada una de las posiciones como aparece en la siguiente imagen (figura 5.5).



*Figura 5.5: Probetas con moteado en el plano de estudio*

Por último, las probetas han de ser acondicionadas para realizar los ensayos a compresión según la norma UNE por lo que son introducidas en una cámara con atmósfera normalizada a una temperatura de  $(20\pm 2)$  °C y una humedad relativa del  $(65\pm 5)$  % durante un periodo de 15 días hasta obtener dichas condiciones. De esta manera, la madera adquiere una humedad de aproximadamente el 12%, valor universal de realización de los ensayos.

Se considera que están acondicionadas cuando llegan a masa constante, es decir, cuando tras dos pesadas sucesivas en un intervalo de 6 horas no difieren en más de 0,1% de la masa de la probeta.

## 5.2. Instrumentación

Los ensayos han sido llevados a cabo en el laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid.

Para ello se ha empleado una máquina multiensayo electromecánica de la marca MicroTest. El modelo utilizado es el EM1/50/FR cuya capacidad máxima de carga es de 50kN (figura 5.6).



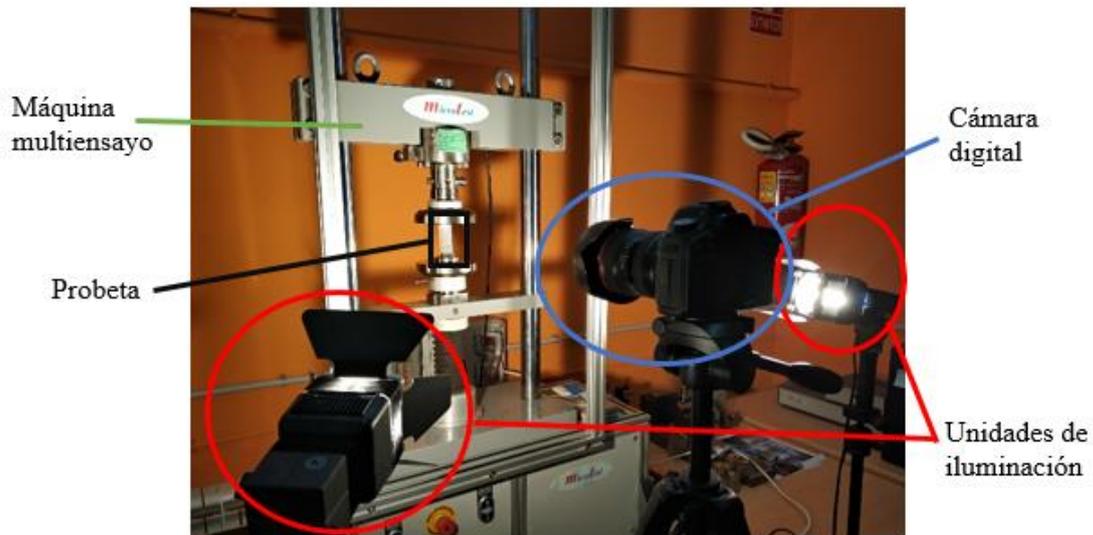
*Figura 5.6: Máquina de ensayos empleada*

Para la grabación de los ensayos y la obtención de las imágenes para su posterior tratamiento y análisis mediante Correlación Digital de Imágenes se ha empleado una cámara digital. El modelo utilizado fue el 5D Mark II de la marca Canon (figura 5.7). Permite la grabación de video en resolución Full HD (1920x1080 píxeles) a 25 FPS (Fotogramas Por Segundo).



*Figura 5.7: Cámara digital empleada*

Adicionalmente se emplearon dos unidades de iluminación durante la realización de los ensayos para garantizar la calidad de la luz en la superficie a analizar de las probetas. Dichas unidades se situaron a los lados de la cámara para evitar la aparición de sombras o brillos que posteriormente pudieran degradar la calidad de las imágenes y consecuentemente obtener valores de deformaciones distorsionados o erróneos. De esta forma, la disposición del equipo de trabajo para la realización de los ensayos queda conformada como se muestra a continuación en la figura 5.8.



*Figura 5.8: Disposición de los ensayos*

### 5.3. Software DIC

El software empleado para la fase de procesamiento de imágenes de la técnica de Correlación Digital de Imágenes es *GOM Correlate*. Se trata de un programa en su versión libre de la compañía alemana GOM para la investigación de materiales y pruebas de componentes.

Se encuentran disponibles tres versiones de dicho software. La primera de ellas, de carácter gratuito permite el procesado de todos los elementos en 2D, por lo que resulta suficiente para el tratamiento requerido en este TFG. Por encima de ésta podemos encontrar la versión *GOM Correlate Professional*, permitiendo los trabajos tanto bidimensionales como tridimensionales. Por último, existe una versión superior denominada *GOM Correlate Enterprise*, similar a la anterior pero con alguna funcionalidad añadida.

Respecto a la versión libre de 2D *GOM Correlate*, la cual ha sido empleada, la propia compañía específica que admite la evaluación de series de imágenes digitales o archivos de vídeo, pudiendo emplear cualquier cámara digital para ello. Las imágenes importadas son evaluadas automáticamente por el software, proporcionando un acceso agilizado a todos los resultados para las pruebas realizadas en el plano.

## 5.4. Procedimiento de ensayo de compresión

El procedimiento llevado a cabo en los ensayos se realizó tal y como dicta la norma UNE 56-535-77. *Características Físico-Mecánicas de la Madera. Determinación de la Resistencia a la Compresión Axial*. Inicialmente se coloca la probeta en la placa inferior de la prensa, de modo que la dirección longitudinal de las fibras sea perpendicular a dicha placa. A continuación se aplica una carga uniforme de entre 200 y 300 Kg/cm<sup>2</sup> por minuto. El ensayo finaliza una vez se ha llegado a la rotura de la probeta (figuras 5.9 y 5.10).

Los ensayos a compresión se realizan aplicando un esfuerzo de compresión simple sobre la probeta. La placa inferior comienza a elevarse hasta que la probeta entra en contacto con la placa superior, comenzando en este momento a aplicarse dicha carga uniforme. Una vez ha contactado toda la superficie de la probeta, ésta empieza a deformarse.

En los primeros segundos del ensayo, las deformaciones pueden estar distorsionadas. Esto es debido a que la carga comienza a aplicarse cuando la probeta contacta con la placa superior. Sin embargo, las imperfecciones producidas por el corte en las caras inferior y superior de la probeta pueden provocar que el reparto de la carga no sea uniforme debido al contacto puntual de la placa con la base de la probeta.

Una vez ha contactado toda la superficie con las placas de carga, el reparto comienza a ser uniforme y la deformación es proporcional a la aplicación de dicha carga hasta alcanzar el límite elástico. En esta primera fase la madera se comporta de manera elástica, es decir, si los esfuerzos cesaran, la probeta recuperaría sus dimensiones iniciales desapareciendo las deformaciones.

A continuación y tras alcanzar el límite elástico, la madera encuentra una zona de transición denominada elasto-plástica, en la cual las deformaciones son proporcionales a la carga pero no de forma lineal. En el caso de que las cargas cesaran, las deformaciones desaparecerían de acuerdo a una línea paralela a la zona elástica ya que en este caso son la suma de las deformaciones elásticas y plásticas.

Por último y en los momentos previos a la rotura, la madera se sitúa en una fase plástica o de fluencia. En este tramo, las deformaciones aumentan considerablemente con pequeñas variaciones de carga. Además, estas deformaciones no son recuperables una vez haya cesado la aplicación de las mismas.

En esta última fase de fluencia las deformaciones pueden encontrarse también distorsionadas en función de la forma en la que se produzca la rotura (figura 5.10). Por ello, en algunos de los gráficos de las curvas carga/deformación obtenidos tras el análisis mediante la Correlación Digital de Imágenes es más complejo apreciar esta última fase.

Sin embargo, las distorsiones producidas tanto en la fase inicial al comienzo del ensayo como en la fase final previa a la rotura no interfieren en la obtención del módulo

de elasticidad. Esto es debido a que, como se explicará posteriormente, el análisis se lleva a cabo entre el 20 y el 80% de la fase elástica. Este intervalo permite evitar los posibles errores derivados del inicio de la carga y de la diferenciación de fases, ya que es muy compleja la determinación de un valor exacto del límite de elasticidad de la madera al disponer de una zona elasto-plástica.



*Figura 5.9: Probetas con rotura limpia oblicua. Rotura en la parte superior (izquierda); rotura en la parte media (derecha)*



*Figura 5.10: Probeta con rotura por aplastamiento*



# 6. TRATAMIENTO DE DATOS E IMÁGENES

## 6.1. Determinación del sistema de referencia temporal del ensayo

La grabación de los ensayos con la cámara empleada permite la obtención de una película de 25 FPS (Fotogramas Por Segundo) por lo que cada segundo se dispone de 25 fotogramas, lo que resulta una imagen cada 0,04 segundos.

Una vez grabado el ensayo es necesario descargar el archivo de video completo en el software *GOM Correlate*, de forma que una vez es introducido, el vídeo queda fraccionado automáticamente en los mencionados 25 FPS. De esta manera la Correlación Digital de Imágenes se realizará directamente con las imágenes extraídas del vídeo debidamente secuenciadas.

Con el fin de obtener unos resultados lo más precisos posibles se han tenido en cuenta dos importantes consideraciones, que se detallan a continuación:

- a) La duración de la grabación del video debe ser superior a la duración del ensayo de compresión, debido a que al pulsar el botón de disparo de la cámara (tanto en el inicio como en el final) se imprime una pequeña fuerza en la cámara, provocando un pequeño movimiento en ésta, y como consecuencia un desplazamiento diferencial en las imágenes durante un reducido periodo de tiempo. Este hecho no es apreciable ni es tomado en consideración cuando se usa la cámara con fines de la fotografía al uso, pero si es destacable y debe tenerse en cuenta para la Correlación Digital de Imágenes, ya que provoca distorsión de los resultados en los instantes inicial y final de la grabación.

De este modo la duración de los videos de cada ensayo es superior a la duración del ensayo de compresión (figura 6.1). De esta forma, se garantiza que una vez se inicia el ensayo a compresión y la placa del mismo comienza a aplicar la carga sobre la probeta, ya se ha iniciado el vídeo y la cámara se encuentra estabilizada y por lo tanto las imágenes obtenidas también.

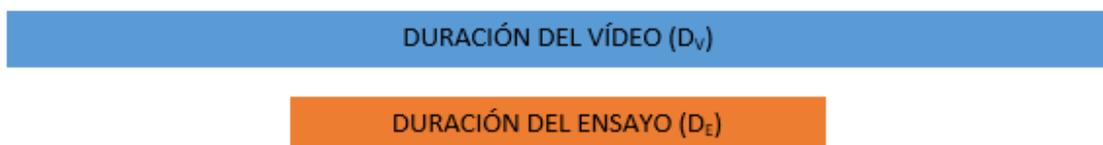


Figura 6.1: Diferente duración del vídeo y del ensayo

- b) Por otro lado, es muy complicado visualmente apreciar el momento exacto en el cual la probeta entra en contacto con la placa superior de carga y comienza el ensayo de compresión. De igual forma, no puede visualizarse en tiempo real el momento en el que la placa superior deja de tocar la probeta y comienza la descarga. Por ello este procedimiento se llevará a cabo sobre el video introducido en el software, ya que éste queda fraccionado en fotogramas con una separación de 0,04 segundos, siendo posible diferenciar los pequeños movimientos.

Identificar el momento inicial en el que la probeta comienza a tocar la placa de carga superior es complejo ya que los desplazamientos son positivos en todo momento y no puede apreciarse. Sin embargo, una vez finaliza el ensayo de compresión, la placa deja de aplicar carga, comenzando a descender en ese mismo momento y produciéndose un cambio en el sentido de los desplazamientos de manera que comienzan a ser negativos. De esta forma, determinando visualmente el momento exacto en el cual el ensayo de compresión finaliza, podrá calcularse el momento en el cual comienza dicho ensayo de compresión.

Por lo tanto, en primer lugar habrá de identificarse visualmente el fotograma exacto en el cual los desplazamientos son negativos y la placa de carga desciende, finalizando así el ensayo de compresión. El instante correspondiente a dicho fotograma será  $T_F$  (figura 6.2).



Figura 6.2: Determinación del fin del ensayo de compresión

Una vez identificado el tiempo en el cual el ensayo de compresión ha finalizado ( $T_F$ ), podrá calcularse el instante en el cual comienza ( $T_0$ ). Para ello habrá que descontar la duración del ensayo de compresión ( $D_E$ ), obtenida de los datos extraídos del software de la máquina de compresión, tal y como puede verse en la figura 6.3:



Figura 6.3: Determinación del inicio del ensayo de compresión

A partir de este momento, bastará con tomar el fotograma correspondiente al instante  $T_0$  como punto de referencia inicial para la Correlación Digital de Imágenes. De esta forma, los desplazamientos se calcularán a partir de dicha imagen.

Los resultados obtenidos en los fotogramas que estén fuera de este intervalo de tiempo carecerán de significado. Están relacionados con los desplazamientos de la imagen debido a la subida de la placa de carga para aproximar la probeta al inicio del ensayo o con el descenso de la placa una vez ha finalizado. Sin embargo no existirá carga en ningún momento, al no existir contacto con la placa de carga superior.

## 6.2. Análisis de los desplazamientos

Una vez se han introducido todos los fotogramas en el software *GOM Correlate* y se ha definido la imagen de referencia (con el procedimiento comentado en el punto anterior), el siguiente paso es proceder al análisis mediante la Correlación Digital de Imágenes. Se trata de un proceso interno que realiza el propio software, pero donde es necesario introducir previamente una serie de parámetros iniciales, los cuales se detallan a continuación:

- a) En primer lugar debe definirse la escala en la imagen de referencia. De esta forma, los resultados obtenidos de desplazamientos indicarán la longitud real, con los milímetros como unidad de medida.

Inicialmente el software asigna una equivalencia píxeles-milímetro y calcula una longitud para el segmento que une los puntos definidos como 1 y 2, correspondientes a la altura de la probeta (figura 6.4). Para ello multiplica los píxeles de la imagen por dicha equivalencia, obteniendo para el caso mostrado una distancia  $d=61,648\text{mm}$ .

Por ello es preciso modificar esta longitud e introducir la distancia real, que en este caso son  $60\text{mm}$ . De esta forma, quedará redefinida la escala mostrando así los desplazamientos reales.

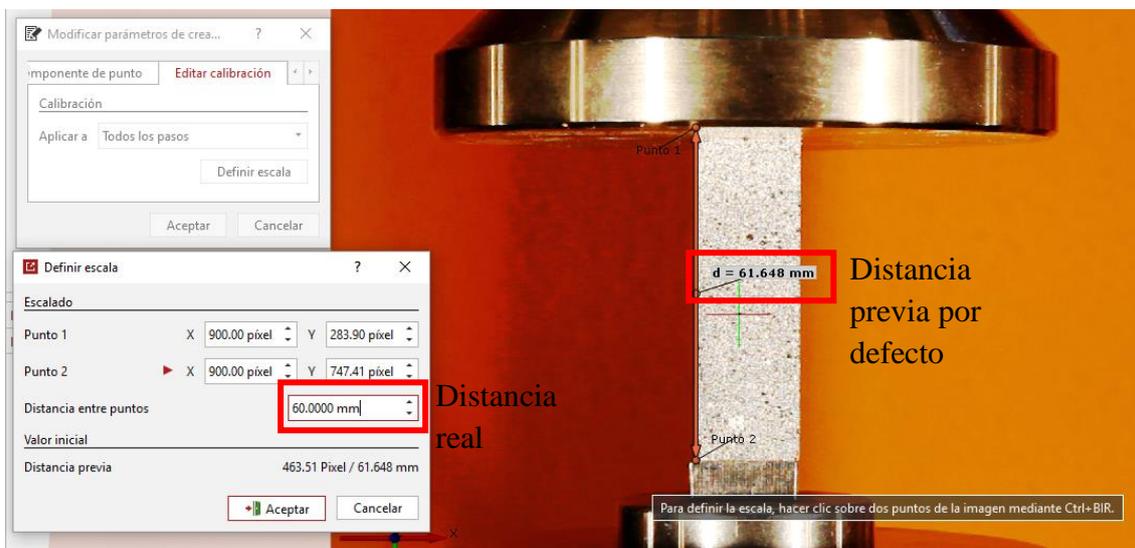


Figura 6.4: Definición de escala

- b) A continuación se define la superficie de estudio (denominada por el software “componente de superficie”) en la cual se desea realizar la Correlación Digital de Imágenes. Para ello, al crear dicha componente, el software da la opción de elegir la superficie de estudio en función de la calidad del patrón, cuantificando esa calidad mediante un mapa de colores. En la figura 6.5 se aprecian las zonas donde podrá realizarse el análisis, donde el área de color verde indica una mayor calidad del patrón

mientras que el resto de la imagen indicará que no es posible realizar la correlación en esa superficie.

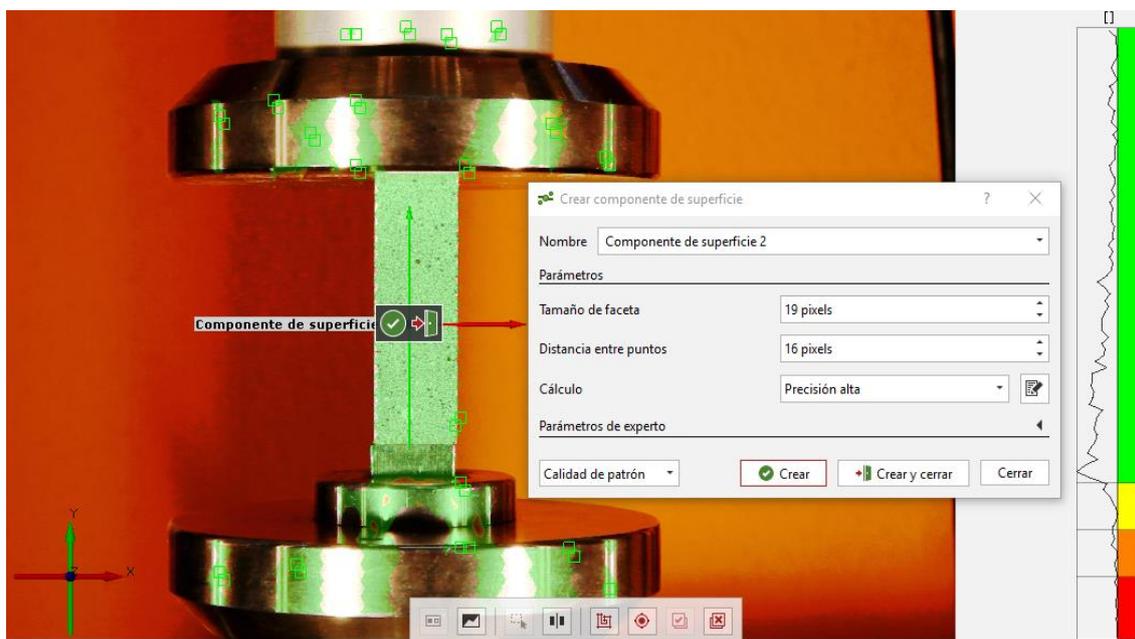


Figura 6.5: Definición de componente de superficie

Con el fin de evitar posibles distorsiones en los contornos, es preciso tomar una superficie de análisis que no sobrepase los límites del patrón. De esta forma, la componente de superficie se sitúa en el interior de la superficie de la probeta pero con un margen tanto lateral como superior e inferior como puede verse en la figura 6.6.

- c) El siguiente paso consiste en la fijación del eje de coordenadas para ajustar la orientación de la probeta a la dirección en la cual se medirán los desplazamientos. Sin embargo, para la grabación de los ensayos se utilizó un trípode con nivel y se estabilizó la cruz de enfoque con el fin de establecer la horizontalidad de la probeta por lo que en la mayoría de los casos no se requiere del ajuste del eje de coordenadas. Aun así, basta con situar el eje vertical “y” en el borde de la probeta para garantizar la verticalidad, siendo éste positivo en sentido superior. Perpendicular a éste se situará el eje “x”, siendo positivo hacia la derecha.

Una vez han sido definidos todos los parámetros iniciales se realiza el cálculo de los desplazamientos. De esta forma se obtiene un mapa de colores con una escala en el lateral que indica la longitud (mm) de los desplazamientos de cada uno de los puntos (figura 6.6). De esta forma queda definida toda la superficie y puede obtenerse el desplazamiento en cualquier punto de ella.

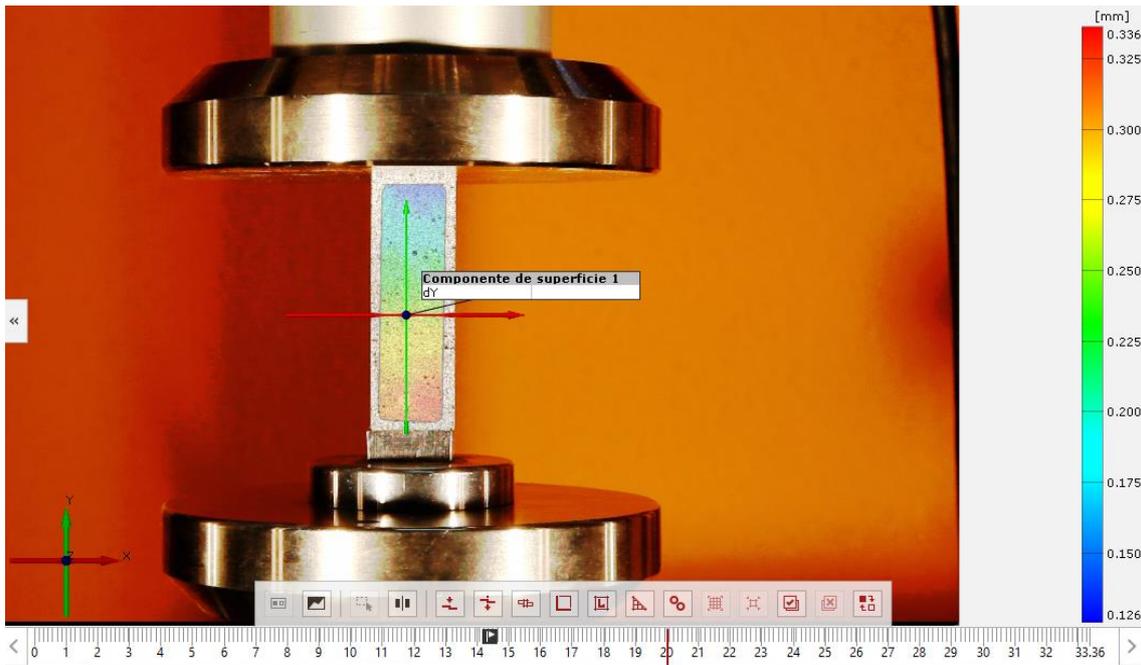


Figura 6.6: Mapa colores con los desplazamientos

### 6.3. Cálculo de las deformaciones

Tras obtener el desplazamiento en cada una de los fotogramas será preciso calcular la deformación que sufre la probeta. Al producirse el contacto entre la probeta y la placa de carga superior e inferior, comienza a efectuarse dicha deformación. En este caso, al aplicarse la carga por elevación de la placa inferior es evidente que los desplazamientos serán positivos según el criterio tomado para los ejes (siendo el eje “y” positivo en el sentido superior). Además los puntos cercanos a la arista inferior sufrirán un desplazamiento mayor que los puntos cercanos a la arista superior. Esta variación puede verse en la figura 6.6, donde la escala de colores disminuye desde la parte inferior hacia la parte superior de la imagen.

La norma UNE establece que la medición de las deformaciones tiene que realizarse en la parte central de la probeta puesto que los contornos sufrirán una deformación mayor (debido al aplastamiento por contacto directo con las placas de carga). Por ello, será preciso tomar dos puntos centrados y separados de estos contornos con el fin de evitar dichas distorsiones.

En primer lugar se han de definir dos puntos en la imagen de referencia inicial del ensayo (figura 6.7), cuyas coordenadas serán  $P_1(x_1, y_1)$  y  $P_2(x_2, y_2)$ . A partir de estos puntos, y en base a sus desplazamientos, se podrá calcular la deformación unitaria que sufre la probeta en su parte central. La separación inicial de dichos puntos es de 40mm, dejando un margen de 10mm con las aristas superior e inferior de la probeta.

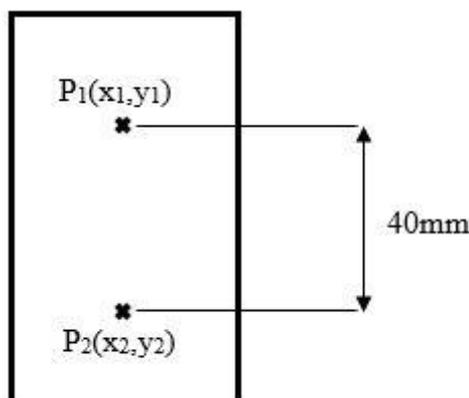


Figura 6.7: Definición de puntos para el cálculo de la deformación

Una vez comienza la aplicación de la carga, la probeta se deformará y consecuentemente estos puntos variarán su posición, es decir, se desplazarán. Como se ha explicado anteriormente, el desplazamiento de los puntos inferiores será mayor que el de los superiores. De esta forma, el punto superior tendrá un desplazamiento “+a” y el inferior un desplazamiento “+b”, siendo “b” mayor que “a”. Por lo tanto, la posición de estos puntos variará de la forma que se muestra a continuación en la figura 6.8.

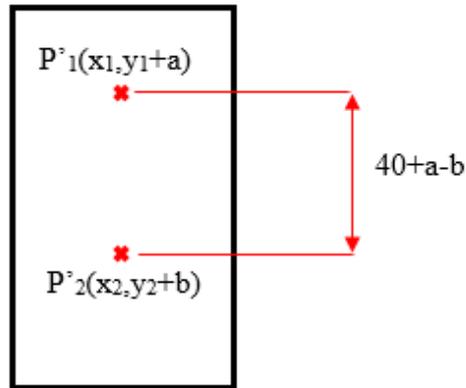


Figura 6.8: Desplazamiento de los puntos deformados

A partir de estos desplazamientos se puede calcular la deformación en este tramo. La distancia inicial de 40mm se ha reducido en una longitud de  $b-a$  milímetros. De esta forma, al realizar el cociente entre dicha deformación y la distancia inicial puede obtenerse la deformación unitaria en cada una de los fotogramas correspondiente a los diferentes momentos del ensayo.

$$\varepsilon = \frac{b - a}{40}$$

En la imagen siguiente (figura 6.9) puede apreciarse la evolución de los desplazamientos de los puntos en el tramo de carga. El software realiza un diagrama desplazamiento/tiempo cuyos valores pueden ser exportados para posteriormente realizar el cálculo de estas deformaciones en una hoja de cálculo Excel. La diferencia entre la curva superior azul (correspondiente al punto 2) e inferior roja (correspondiente al punto 1) es la deformación anteriormente comentada. Para este caso concreto, en el segundo 20, la deformación total es  $\Delta L = 0,309 - 0,188 = 0,121$  mm y la deformación unitaria  $\varepsilon Y =$

$$\frac{121}{40} = 0,003025 \text{ (mm/mm)}.$$

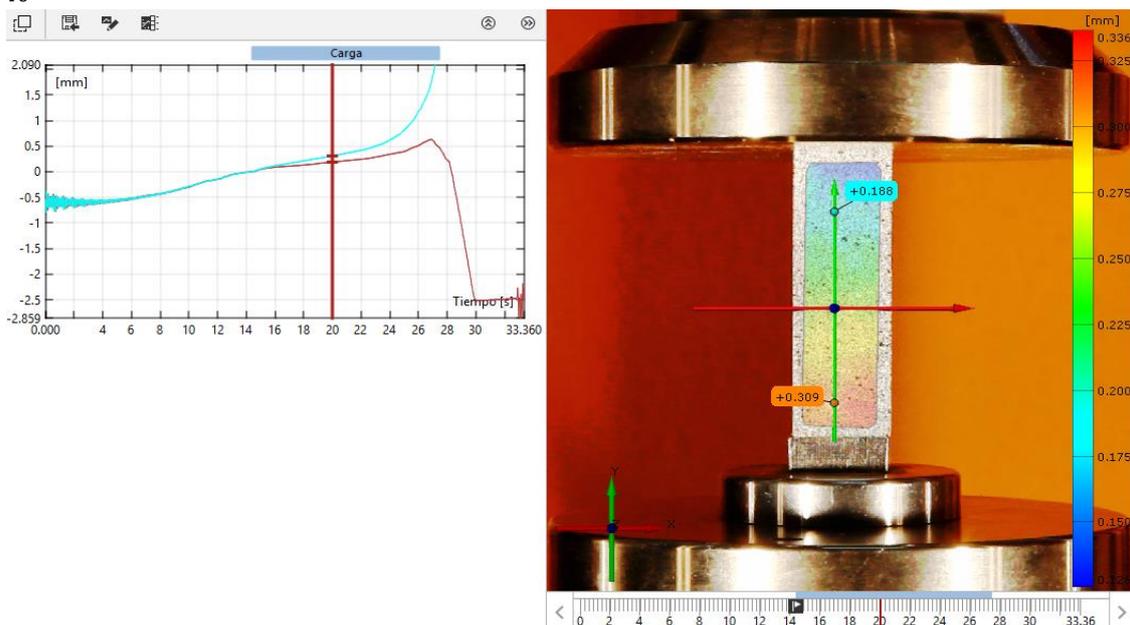


Figura 6.9: Diagrama desplazamiento/tiempo de los puntos de referencia

## 6.4. Sincronización de los datos de carga y deformación

La Correlación Digital de Imágenes permite medir los desplazamientos en las probetas a partir de los cuales pueden calcularse las deformaciones, mientras que los ensayos de compresión determinan las cargas aplicadas. A partir de aquí, es necesario establecer una relación entre dichas deformaciones y las cargas que las originan para poder obtener el Módulo de Elasticidad (E).

Los datos obtenidos del software de la máquina de ensayos y las deformaciones calculadas con la DIC son, a priori, independientes. El tiempo  $T_0$  correspondiente al inicio del ensayo a compresión referenciado en el vídeo (figura 6.3) se corresponde con el segundo cero de los datos de carga obtenidos del ensayo de compresión. En el ejemplo mostrado en la figura 6.10 y 6.11, el instante  $T_0$  en el que comienza el ensayo de compresión es el segundo 14,4.

Para establecer esta relación se diseña una plantilla en una hoja de cálculo Excel. Ésta permite relacionar los datos de las deformaciones medidas mediante DIC y las cargas aplicadas con el fin de realizar la gráfica tensión/deformación que permita obtener el Módulo de Elasticidad.

En primer lugar son exportados los datos del diagrama de desplazamientos (del software *GOM Correlate*) de los puntos seleccionados (figura 6.9). Estos desplazamientos aparecen en la hoja de cálculo (figura 6.10) como dY punto 1 y dY punto 2 junto al instante correspondiente al vídeo (Tiempo). A partir de estos desplazamientos puede obtenerse el incremento de longitud total ( $\Delta L$ ). Por último puede calcularse la deformación unitaria ( $\epsilon Y$ ) mediante la expresión que se vio en el apartado anterior.

Tiempo [s]	Desplazamiento dY punto 1 [mm]	Desplazamiento dY punto 2 [mm]	$\Delta L$ (mm)	$\epsilon Y$ (mm/mm)
14,4	0	0	0	0
14,44	-0,001371	0,000553	0,001924	0,0000481
14,48	0,002626	0,005975	0,003349	0,000083725
14,52	0,00502	0,005986	0,000966	0,00002415
14,56	0,006549	0,008136	0,001587	0,000039675
14,6	0,011439	0,013585	0,002146	0,00005365
14,64	0,01328	0,015471	0,002191	0,000054775
14,68	0,014681	0,018852	0,004171	0,000104275
14,72	0,024167	0,025578	0,001411	0,000035275
14,76	0,02507	0,025601	0,000531	0,000013275
14,8	0,028561	0,03146	0,002899	7,2475E-05
14,84	0,03716	0,038213	0,001053	0,000026325
14,88	0,032817	0,037587	0,00477	0,00011925
14,92	0,040703	0,045812	0,005109	0,000127725
14,96	0,046065	0,049531	0,003466	8,665E-05
15	0,043396	0,048614	0,005218	0,00013045
15,04	0,051071	0,056495	0,005424	0,0001356
15,08	0,053979	0,058058	0,004079	0,000101975
15,12	0,051408	0,058612	0,007204	0,0001801
15,16	0,058677	0,065479	0,006802	0,00017005
15,2	0,060641	0,067011	0,00637	0,00015925

Figura 6.10: Plantilla para el cálculo de las deformaciones

A continuación es necesario importar los datos extraídos del software de la máquina del ensayo de compresión (Carga-Tiempo). A partir de estos datos se realiza el cálculo para obtener la tensión correspondiente como el cociente entre la carga y la superficie de las probetas (20x20mm). Además, para ajustar los tiempos, se crea una nueva columna en la que aparece el tiempo correspondiente al video (Tiempo video) en la que únicamente se ha de sumar el tiempo de inicio ( $T_0$ ) (en este caso 14,4 segundos) a cada tiempo del ensayo (Tiempo).

El paso fundamental consiste en la asociación de las deformaciones a cada uno de los tiempos. Para ello se emplea una función de Excel en la que se busca en la matriz anterior (figura 6.10) el valor de deformación correspondiente al tiempo de video. De esta forma se obtiene una tabla como la que puede verse en la figura 6.11 en la que aparecen relacionados todos los datos anteriormente mencionados.

Como puede verse en la figura 6.11, existen valores de carga que no pueden ser asociados a valores de deformación (#N/A). Esto es debido a que los valores de deformación se obtienen a partir de los fotogramas tomados del video, cuya frecuencia es de 25 FPS, es decir, un fotograma cada 0,04 segundos. Sin embargo, los valores de carga se muestran cada 0,1 segundos, por lo que ambos valores de tiempo coincidirán cuando sus múltiplos sean comunes. De esta forma, podrá asociarse un valor de deformación a uno de tensión cada 0,2 segundos.

Carga (kgf)	Tensión (Mpa)	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
13,15	0,3225	0	14,4	0
14,69	0,3725	0,1	14,5	#N/A
15,54	0,38	0,2	14,6	0,00005365
18,44	0,4525	0,3	14,7	#N/A
21,35	0,6325	0,4	14,8	7,2475E-05
33,99	0,8325	0,5	14,9	#N/A
50,89	1,2475	0,7	15,1	#N/A
62,85	1,54	0,8	15,2	0,00015925
85,22	2,09	0,9	15,3	#N/A
100,42	2,7375	1	15,4	0,000253775
122,79	3,01	1,1	15,5	#N/A
146,19	3,585	1,2	15,6	0,0004053
156,78	4,095	1,3	15,7	#N/A
177,27	4,345	1,4	15,8	0,00054265
199,31	4,8875	1,5	15,9	#N/A
209,38	5,375	1,6	16	0,00068775
232,61	5,7025	1,8	16,2	0,000825275
252,25	6,185	1,9	16,3	#N/A
263,69	6,465	2	16,4	0,000955325
283,33	6,9475	2,1	16,5	#N/A
296,31	7,5025	2,2	16,6	0,001040075
315,78	7,7425	2,3	16,7	#N/A

Figura 6.11: Plantilla para la relación de las cargas y las deformaciones

## 6.5. Obtención del Módulo de Elasticidad

Una vez se han relacionado los datos de carga con las deformaciones correspondientes ya se dispone de los medios necesarios para la obtención del Módulo de Elasticidad.

Como ya se estudió en el apartado correspondiente, el Módulo de Elasticidad será la pendiente de la recta que constituye la zona elástica en el gráfico de tensión/deformación. Sin embargo, es preciso matizar que a pesar de que teóricamente dicha zona esté formada por una línea recta que va desde el origen hasta el límite elástico, en la práctica la posición de la misma puede variar debido a posibles distorsiones tanto en el tramo inicial como en el tramo final.

La zona inicial de este tramo se corresponde a los primeros segundos del ensayo en los que comienza a aplicarse la carga. En algunas ocasiones, la probeta puede presentar determinadas imperfecciones en sus bases ocasionadas durante el proceso de corte, así como otro tipo de irregularidades en el cuerpo de las mismas durante su perfilado.

En estos casos el reparto de carga en los primeros instantes no es uniforme, pues aquellos puntos que sobresalgan de las bases superior e inferior de la probeta serán los que primero contacten con la placa de carga, no existiendo un reparto uniforme de la carga en las bases de la probeta. De esta forma, pueden encontrarse algunas distorsiones en el inicio del ensayo hasta que se regularice el reparto de carga y éste se realice ya de manera uniforme en las bases de contacto.

Como consecuencia de ello, pueden encontrarse algunas gráficas en las que para cargas muy reducidas las deformaciones no son directamente proporcionales y no siguen la línea que marca la elasticidad como puede verse en la figura 6.12, que representa los resultados del ensayo A3. Estas cargas representan por lo general del 10 al 15% con respecto a la carga que define el límite elástico. Por ello, en la práctica la pendiente de la línea que determinará el Módulo de Elasticidad habrá de medirse en el tramo central del intervalo elástico (Hernández-Maldonado & Sotomayor-Castellanos, 2014). De esta forma, el tramo comienza a medirse a partir del 20% de dicho límite elástico.



Figura 6.12: Distorsión inicial en la zona elástica. Probeta A3

El límite elástico es el punto teórico en el cual finaliza la zona elástica. Sin embargo, en la práctica es muy complejo asignar un valor exacto a dicho punto, pues al existir una zona de transición (elasto-plástica) el cambio de la pendiente es suavizado y no existe un punto concreto. Por ello para el cálculo del 20% y del 80% se estima un valor aproximado, no afectando su variación al tomar la pendiente de un tramo en el que no existen distorsiones.

Además, las mediciones de las deformaciones realizadas en este tramo final de la carga pueden verse también distorsionadas en función de cuál sea el modo de rotura y dónde se produzca ésta.

Aquellas probetas en las que se produzca rotura con aplastamiento o deslizamiento, pueden provocar un mayor desplazamiento de uno de los puntos respecto al otro en este tramo final de carga. Esto provoca que las deformaciones se encuentren alteradas, pudiendo desaparecer la zona elástica en las gráficas de tensión/deformación como ocurre en el ensayo A8 cuya gráfica se representa en la figura 6.13.



Figura 6.13: Distorsión inicial en la zona elástica y final en la zona elasto-plástica y plástica. Probeta A8

Esta distorsión se da en la zona elasto-plástica y en la zona plástica, cuyas deformaciones no alteran el cálculo del Módulo de Elasticidad. Sin embargo, debido a la complejidad para obtener el límite elástico, en la práctica la pendiente de la línea que determinará el Módulo de Elasticidad finaliza en el 80% de dicho límite elástico.

El intervalo del 20 al 80% garantizará que no existan errores en el inicio y fin de la zona elástica, pudiendo realizar un cálculo más preciso al evitar las distorsiones anteriormente mencionadas. En la siguiente figura 6.14 puede verse la relación de dicho intervalo con respecto a la gráfica completa.

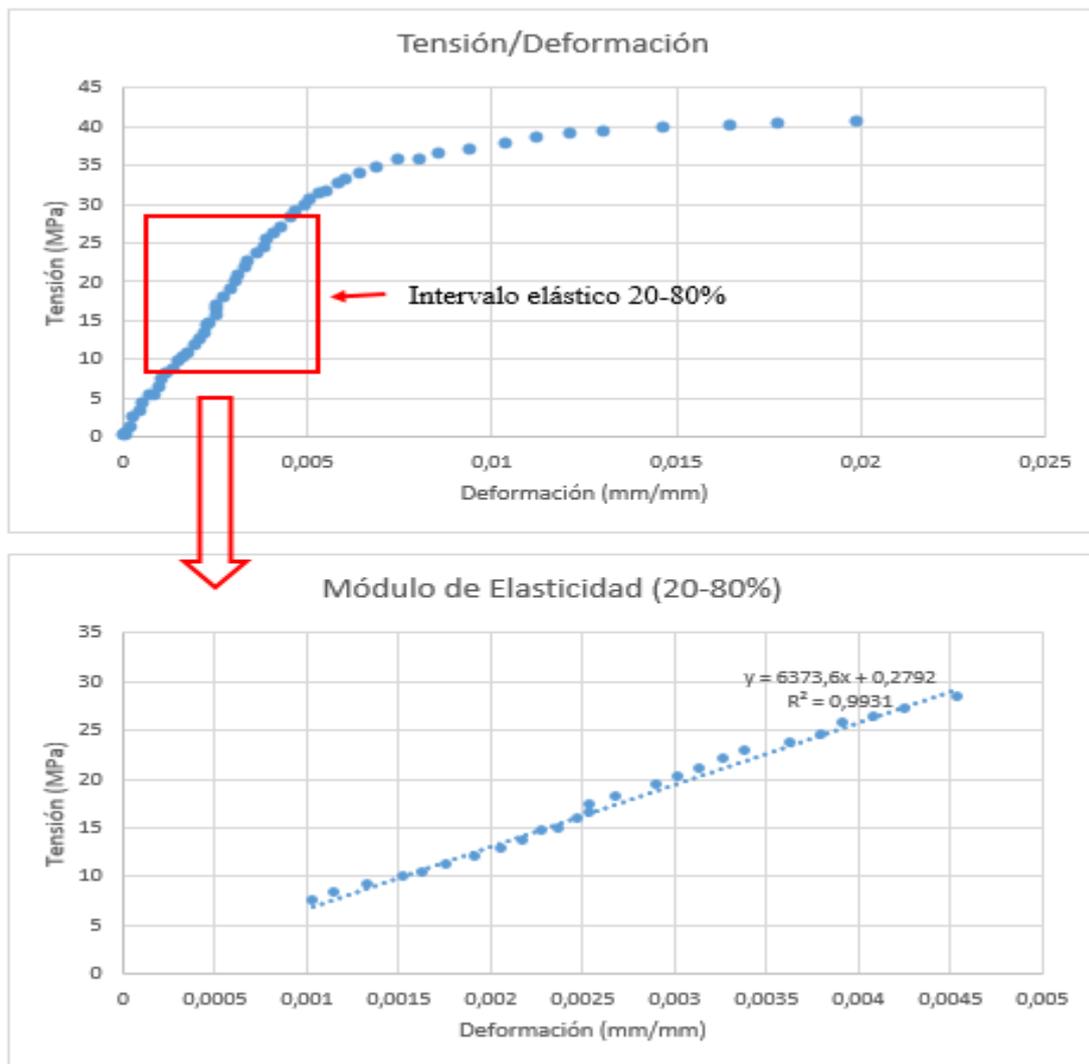


Figura 6.14: Intervalo 20-80% para la determinación del Módulo de Elasticidad. Probeta A1

A pesar de ello es posible que en algunas ocasiones, dentro de estos tramos puedan existir pequeñas variaciones en la pendiente de la recta. La causa de estas curvas puede deberse a la velocidad de aplicación de la carga o a pequeños defectos que presenten las probetas en la superficie cercana a los puntos de medición.

Por ello, para el cálculo del Módulo de Elasticidad se empleará la línea de tendencia de todos los datos correspondientes al mencionado tramo del 20 al 80% del límite elástico. En el caso de que existan graves errores o que el coeficiente de regresión lineal  $R^2$  sea inadecuado, estos resultados serán analizados posteriormente de forma individual para tratar de detectar sus causas y definir posibles soluciones.

Todos los resultados obtenidos para cada uno de los ensayos, tanto las tablas como las gráficas, pueden verse en el *Anejo 1: Datos obtenidos de los ensayos*.

## 6.6. Obtención de la Resistencia Máxima a compresión

La Resistencia Máxima a compresión es el mayor de los valores de carga que es capaz de soportar la probeta ante esfuerzos de compresión antes de que se produzca su rotura. Al tratarse en este caso de probetas cuya superficie de contacto es de 20x20mm, la Resistencia Máxima estará expresada en MPa (tensión) siendo ésta la relación entre la mencionada carga y dicha superficie.

Como puede verse en la figura 6.11, los datos extraídos del software de la máquina de ensayo fueron transformados para obtener así la tensión aplicada en cada momento del ensayo. De esta forma es suficiente con hallar el máximo de dichas tensiones para obtener así la Resistencia Máxima en cada uno de los ensayos.

Empleando una función propia de la hoja de cálculo Excel puede realizarse dicha maximización obteniendo el valor de Resistencia Máxima de forma directa y sin necesidad de realizar ningún tipo de cálculo adicional.

De igual forma que todos los datos anteriores, los valores de resistencia máxima aparecen junto a los del Módulo de Elasticidad para cada uno de los ensayos en el *Anejo 1: Datos obtenidos de los ensayos*.



# 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 7.1. Cálculo estadístico de resultados

A continuación se presentan en las tablas 7.1 y 7.2 los resultados para cada uno de los ensayos realizados. Las variables a analizar en todos ellos son la Resistencia Máxima (MPa) y el Módulo de Elasticidad (MPa). Su cálculo se ha realizado tal y como se indica en el apartado 6: *Tratamiento de datos e imágenes*. Además, la totalidad de los datos necesarios para su obtención se muestran en el *Anejo 1: Datos obtenidos de los ensayos*.

Tras la revisión de todos los resultados de los ensayos y el descarte de tres de ellos (*Anejo 2: Descarte de datos*) se han obtenido un total de 17 valores de Resistencia Máxima y Módulo de Elasticidad.

Probeta	Resistencia Máxima (MPa)	Módulo E (MPa)
A1	40,60	6374
A2	47,50	9430
A3	46,77	7188
A5	49,74	7775
A6	44,03	8461
A7	45,90	10456
A8	52,93	14163
A9	49,35	10325
A10	49,72	7478

Tabla 7-1: Resultados de los ensayos de las probetas A

Probeta	Resistencia Máxima (MPa)	Módulo E (MPa)
B1	49,74	7358
B2	58,29	10826
B4	53,03	11726
B5	59,52	12270
B6	49,40	7432
B8	56,48	11869
B9	56,14	11709
B10	51,23	9593

Tabla 7-2: Resultados de los ensayos de las probetas B

A partir de estos resultados se puede establecer un valor característico medio y un valor característico correspondiente al 5º percentil para cada una de estas propiedades (en el punto siguiente se detallara el significado de este valor)

En primer lugar se determina si existe diferencia significativa entre los resultados del Módulo de Elasticidad obtenido de las probetas A con las probetas B. Para ello será preciso realizar un contraste de hipótesis sobre la media de cada una de las muestras. A continuación se recogen en la tabla 7.3 los estadísticos necesarios para realizar dicho contraste de hipótesis, donde  $\bar{X}$  es el valor medio,  $\sigma^2$  la varianza y “n” el número muestral:

Probetas	$\bar{X}$	$\sigma^2$	n
A	9072	4995539	9
B	10348	3500214	8

*Tabla 7-3: Estadísticos del Módulo de Elasticidad para cada muestra de probetas*

Suponiendo que se trata de dos poblaciones normales independientes, se establecen las siguientes hipótesis:

$$\text{Hipótesis nula } H_0: \bar{X}_A = \bar{X}_B$$

$$\text{Hipótesis alternativa } H_1: \bar{X}_A \neq \bar{X}_B$$

El estadístico empleado para la prueba de hipótesis será “z”, obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$z = \frac{\bar{x}_A - \bar{x}_B}{\sqrt{\frac{\sigma_A^2}{n_A} + \frac{\sigma_B^2}{n_B}}}$$

En este caso y con los valores presentados en la tabla 7.3 se obtiene un valor de  $z = -1,28$ .

La prueba se realizará con un nivel de confianza del 99%, por lo que el valor del coeficiente “ $\alpha$ ” será de 0,01.

De acuerdo con la hipótesis alternativa presentada, para que ésta sea aceptada y por lo tanto la hipótesis nula sea rechazada, el estadístico “z” habrá de presentarse en la región crítica  $|z| > z_{\alpha/2}$ .

El valor de “z” correspondiente a “ $\alpha/2$ ” (en este caso 0,005) es de 2,575. De esta forma, el estadístico de contraste no se presenta en dicha región crítica.

Por lo tanto, puede aceptarse la hipótesis nula y determinar que las medias de ambas muestras son similares. De esta forma, no se hará distinción de aquí en adelante entre los dos tipos de probetas, obteniendo un valor característico único del Módulo de Elasticidad para todo el conjunto de ensayos.

El Módulo de Elasticidad es una propiedad intrínseca del material y está relacionado directamente con la resistencia del propio material. Por ello se considerará de igual forma un único valor característico para la Resistencia Máxima a compresión paralela a las fibras para todo el conjunto de ensayos, no realizando ninguna distinción entre las muestras de tipo A y las de tipo B.

## 7.2. Valores característicos de las propiedades mecánicas

Una vez determinado que no existe diferencia significativa entre los valores obtenidos en los dos tipos de probetas A y B, se han calculado los resultados correspondientes al conjunto de todas las muestras. A continuación se muestran en la tabla 7.4 los valores característicos medios para las variables Módulo de Elasticidad (E), Resistencia Máxima ( $R_{Máx}$ ) y los estadísticos de cada una de ellas, siendo  $\bar{X}$  es el valor medio,  $\sigma^2$  la varianza y “n” el número muestral.

Propiedad	$\bar{X}$	$\sigma^2$	n
E	9672	4697290	17
$R_{Máx}$	50,61	24,15	17

Tabla 7-4: Valores característicos medios del Módulo de Elasticidad y la Resistencia Máxima

Sin embargo, el criterio aceptado para definir el comportamiento de las piezas de madera no es el valor característico medio, si no el valor perteneciente al 5° percentil que se encuentra especificado en la norma UNE. De esta forma, son las piezas más débiles las que determinan el valor característico de un material. Si éste es variable, su peor rendimiento corresponderá al 5° percentil, ya que éste estará constituido por las peores piezas.

El valor correspondiente al 5° percentil, tanto de la Resistencia Máxima como del Módulo de Elasticidad, será el empleado para realizar las comprobaciones de los cálculos estructurales de resistencia e inestabilidad (pandeo) de las piezas de madera. Por su parte, el valor medio del Módulo de Elasticidad será empleado para el cálculo de las deformaciones (Argüelles, et al., 2000).

En este sentido, la norma *UNE-EN 14358: Estructuras de Madera. Determinación y verificación de los valores característicos*, permite obtener los valores característicos correspondientes al 5° percentil para la madera estructural a partir de los resultados de los ensayos realizados.

Para ello es necesario realizar cálculos paramétricos en los que se utilizará un nivel de confianza del 75% tal y como recomienda la norma *UNE-EN 1990*. Con dicho nivel de confianza, el valor característico de una muestra correspondiente al 5° percentil ( $m_k$ ) se determinará según la siguiente expresión:

$$m_k = \bar{y} - k_s(n) \cdot s_y$$

Donde  $\bar{y}$  es el valor medio de la muestra;  $s_y$  es la desviación típica; y  $k_s(n)$  es una constante que puede tomarse a partir de la siguiente expresión simplificada en la que “n” es el número muestral:

$$k_s(n) = \frac{6,5n + 6}{3,7n - 3}$$

Con estas ecuaciones y los datos de la tabla 7.4 pueden obtenerse los valores característicos correspondientes al 5º percentil tanto del Módulo de Elasticidad como de la Resistencia Máxima.

A continuación se presentan en la tabla 7.5 los resultados obtenidos para los valores característicos de la madera de *Pinus halepensis*:

$f_{c,0,medio}$ (MPa)	50,6
$f_{c,0,k}$ (MPa)	40,8
$E_{0,medio}$ (MPa)	9670
$E_{0,k}$ (MPa)	5330

*Tabla 7-5: Valores característicos de Resistencia Máxima y Módulo de Elasticidad de Pinus halepensis*

Donde los valores se expresan en MPa y:

- $f_{c,0,medio}$  es el valor característico medio de la Resistencia Máxima a compresión paralela a las fibras.
- $f_{c,0,k}$  es el valor característico del 5º percentil de la Resistencia Máxima a compresión paralela a las fibras.
- $E_{0,medio}$  es el valor característico medio del Módulo de Elasticidad a compresión paralela a las fibras.
- $E_{0,k}$  es el valor característico del 5º percentil del Módulo de Elasticidad a compresión paralela a las fibras.

En la mayor parte de los casos, la obtención de las propiedades de la madera se realiza a partir de ensayos a flexión. En base a los valores obtenidos en los ensayos a flexión, se aproximan y estiman el resto de propiedades, tanto a compresión como a tracción (Arredondo y Verdú, 1992). Además, en cuanto al Módulo de Elasticidad, en determinadas ocasiones no se realiza diferenciación entre tracción, compresión y flexión a pesar de que sí existe una marcada diferencia. En estos casos se utiliza un único valor del Módulo de Elasticidad, adoptando el valor aparente obtenido del ensayo a flexión. Este valor resulta intermedio entre el de tracción (superior) y el de compresión (inferior) (Argüelles, et al., 2000).

La variabilidad dentro de una misma especie de madera hace que incluso a partir del mismo tipo de ensayos, existan diferencias entre los valores obtenidos. A continuación se muestran valores encontrados en la bibliografía del Módulo de Elasticidad (a flexión) y de la Resistencia Máxima a compresión paralela a las fibras:

<b>Fuente</b>	<b><math>f_{c,0,medio}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{0,medio}</math> (flexión) (MPa)</b>
(Forestales, s.f.)	45-62	10600-14500
(García Esteban & de Palacios de Palacios, 2000)	45,4	9950
(WOODTECH, 2014)	47,6	10873

Tabla 7-6: Valores característicos del *Pinus halepensis* en bibliografía

Comparando los valores obtenidos en los ensayos del presente TFG (tabla 7.5) con los valores recogidos de la bibliografía (tabla 7.6) puede deducirse lo siguiente:

- a) El valor de la Resistencia Máxima a compresión paralela a las fibras se sitúa muy próximo a los valores teóricos que aparecen en la bibliografía, encontrándose dentro del intervalo propuesto por (Forestales, s.f.). De esta forma puede determinarse que los valores obtenidos en los ensayos realizados son válidos al atribuirse la diferencia existente a la variabilidad que puede encontrarse dentro de la propia especie.
- b) El valor del Módulo de Elasticidad a compresión paralela a las fibras se sitúa por debajo de todos los valores teóricos que aparecen en la bibliografía. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que estos valores se corresponden con los resultados de ensayos a flexión, por lo que el valor del Módulo de Elasticidad a compresión ha de ser inferior a éstos (Argüelles, et al., 2000). De esta forma puede verificarse que los valores obtenidos para esta propiedad son válidos, situándose por debajo de los valores de flexión pero próximos a estos.



## 8. CONCLUSIONES

A continuación se exponen las principales conclusiones obtenidas tras la realización del presente TFG.

- En el presente Trabajo Fin de Grado se ha propuesto, desarrollado y probado una metodología para la obtención de las propiedades mecánicas de la madera, a partir del ensayo de compresión y la Correlación Digital de Imágenes.
- La Correlación Digital de Imágenes, se presenta como una técnica idónea en el estudio de deformaciones de la madera debido principalmente a su precisión, bajo coste y a su carácter no invasivo y no destructivo, siendo una alternativa idónea a otras técnicas convencionales invasivas y destructivas como las galgas extensiométricas.
- Los ensayos de compresión axial se han sincronizado con la Correlación Digital de Imágenes de forma que se han podido relacionar las cargas aplicadas en cada instante con la deformación provocada por las mismas. Como consecuencia de ello, se ha logrado la implementación inicialmente propuesta de la técnica DIC junto con los ensayos de compresión.
- Se han ensayado 20 probetas (la mitad de ellas del tipo A y la otra mitad del tipo B) y se ha llevado a cabo un estudio estadístico para determinar si existe diferencia entre los resultados obtenidos para cada una de ellas. El contraste de hipótesis realizado para las probetas de tipo A y tipo B ha determinado que con un nivel de confianza del 99% no existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos para cada una de ellas. De esta forma se han considerado los resultados para todo el conjunto de ensayos.
- El tratamiento de datos resultantes de los ensayos (deformaciones y cargas aplicadas a lo largo del tiempo) ha permitido determinar las propiedades mecánicas de la especie Pino Carrasco (*Pinus halepensis*). Se han obtenido unos valores característicos medios de la Resistencia Máxima a compresión paralela a las fibras de 50,6 MPa y del Módulo de Elasticidad de 9670 MPa.
- De acuerdo con la norma UNE, a partir de los resultados anteriores se han obtenido unos valores característicos correspondientes al 5º percentil de la Resistencia Máxima a compresión paralela a las fibras de 40,8 MPa y del Módulo de Elasticidad de 5330 MPa. Estos valores, junto con los anteriores, podrán ser empleados para realizar los cálculos estructurales necesarios relativos a esta especie.



# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghlara, R. & Tahir, M. M., 2018. Measurement of Strain on Concrete Using an Ordinary Digital. *Measurement*.
- Alonso, V., Javier, D., Hugo, R. & Fernando, D., 2016. Validación de deformaciones por técnica de correlación de imágenes. *Salão do Conhecimento*, 2(2).
- Argüelles, R., Arriaga, F. & Martínez, J. J., 2000. *Estructuras de madera. Diseño y cálculo*. s.l.:Asociación de Investigación Técnica de la Industria de la Madera y del Corcho (AITIM).
- Arredondo y Verdú, F., 1992. *Madera y Corcho*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones, D.L.
- Ballarin Wagner, A. & Nogueira, M., 2003. Caracterização elástica da madeira de Eucalyptus citriodora. *Cerne*, 9(1).
- Baño, V., Cetrangolo, G., O'Neill, H. & Morquio, A., 2014. *Diagrama tensión-deformación de la madera libre de defectos de Pinus elliottii de procedencia uruguaya*. Montevideo, Uruguay, s.n.
- Bjurhager, I., Berglund, L. A., Bardage, S. L. & Sundberg, B., 2008. Mechanical characterization of juvenile European aspen (*Populus tremula*) and hybrid aspen (*Populus tremula* x *Populus tremuloides*) using full-field strain measurements. *Journal of wood science*, 54(4), pp. 349-355.
- Cáceres Hidalgo, E., 2016. *Caracterización físico-mecánica de la madera de Paulownia elongata*. s.l.:s.n.
- Canal Casado, L. P. y otros, 2010. Mecanismos de Deformación en laminados de matriz polimérica correlación digital de imágenes y micromecánica computacional.
- Dubois, F., Méité, M., Pop, O. & Absi, J., 2012. Characterization of timber fracture using the digital image correlation technique and finite element method. *Engineering Fracture Mechanics*, Volumen 96, pp. 107-121.
- Fayyad, T. M. & Lees, J. M., 2014. Application of Digital Image Correlation to reinforced concrete. *Procedia Material Science*, Volumen 3, pp. 1585-1590.
- Forestales, E., s.f. *Especies Forestales de España*. [En línea] Available at: <http://especiesforestales.com/>

- García Esteban, L. & de Palacios de Palacios, P., 2000. La madera de pino carrasco (*Pinus Hale-pensis* Mill.). *Cuad. Soco Esp. Cien. For.*, Volumen 10, pp. 51-55.
- Guindos, P. & Ortiz, J., 2013. The utility of low-cost photogrammetry for stiffness analysis and finite-element validation of wood with knots in bending. *Biosystems engineering*, 114(2), pp. 86-96.
- Guo, N., Liang, J., Yu, Q. & Qian, B., 2017. Plastic evolution behavior of H340LAD\_Z steel by an optical method. *Physica B: Condensed Matter*, Volumen 506, pp. 69-74.
- Helava, U. V., 1988. Object-space least-squares correlation.. (*ACSM and American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Annual Convention, Saint Louis, MO, Mar. 14-18, 1988*) *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Volumen 54, pp. 711-714.
- Hernández-Maldonado, S. A. & Sotomayor-Castellanos, J. R., 2014. Comportamiento elástico de la madera de *Acer rubrum* y de *Abies balsamea*. *Madera y bosques*, 20(3), pp. 113-123.
- Jeong, G. Y., Hindman, D. P. & Zink-Sharp, A., 2010. Orthotropic properties of loblolly pine (*Pinus taeda*) strands. *Journal of materials science*, 45(21), pp. 5820-5830.
- Jeong, G. Y. & Park, M. J., 2016. Evaluate orthotropic properties of wood using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, Volumen 113, pp. 864-869.
- Jeong, G. Y., Zink-Sharp, A. & Hindman, D. P., 2009. Tensile properties of earlywood and latewood from loblolly pine (*pinus taeda*) using digital image correlation. *Wood and Fiber Science*, 41(1), pp. 51-63.
- Kreiling, W., 1976. Automatische Erstellung von Hohenmodellen und Orthophotos durch digitale korrelation. *Dissertation, Institute fur Photogrammetrie, Universitat Karlsruhe*..
- Krishnan, S. A. y otros, 2014. Assessment of deformation field during high strain rate tensile tests of RAFM steel using DIC technique. *Procedia Engineering*, Volumen 86, pp. 131-138.
- Kunecký, J. S. V. y otros, 2015. Experimental assessment of a full-scale lap scarf timber joint accompanied by a finite element analysis and digital image correlation. Volumen 76, pp. 24-3.
- López-Alba, E., López-García, R., Dorado, R. & Díaz, F. A., 2010. *Análisis de deformaciones en probetas planas mediante correlación digital de imágenes*. s.l., s.n.

- López-Alba, E., L.-G. R., Dorado, R. & Díaz, F. A., 2012. *Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto*. s.l., s.n.
- Louis, H. G., 1960. *Method and apparatus for locating corresponding areas of two similar images*. U.S., Patente nº 2,964,644.
- Louis, H. G., 1960. *Random scanning method and system for identifying corresponding detail in two stereoimages*. U.S., Patente nº 2,964,643.
- Luo, L., Li, X. Q. J. & Zhu, Q., 2017. Study on Fracture Initiation and Propagation in a Brazilian Disc with a Preexisting Crack by Digital Image Correlation Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volumen 2017.
- Martínez-Espinosa, M., Calil Jr, C. & Fiorelli, J., 2002. Martínez-Espinosa, M., Calil Jr, C., & Fiorelli, J. (2002). Resistencia mecánica de los tableros de densidad media: Parte 1: Resistencia a la tracción paralela a la superficie. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 4(2), pp. 179-185.
- Moya, L. y otros, 2017. *Determinación de las constantes elásticas de pino uruguayo de rápido crecimiento mediante ensayos de compresión y flexión*. Buenos Aires, Argentina, s.n.
- Pan, B., Xiang, K., Xie, H. & Asundi, A., 2009. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement science and technology*, 20(6).
- Peña, S. V. & Rojas, I. M., 2006. *Tecnología de la madera*. s.l.:Mundi-Prensa Libros.
- Pérez Ortega, Á., 2014. *Comparación de ensayos a compresión de madera estructural mediante norma UNE y norma ASTM*. s.l.:s.n.
- Resendiz-Hernández, J. E. & Palacios Pineda, L. M., 2017. Análisis de deformaciones unitarias en juntas soldadas utilizando correlación. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 1(1), pp. 10-19.
- Ritschel, F., Brunner, A. J. & Niemz, P., 2013. Nondestructive evaluation of damage accumulation in tensile test specimens made from solid wood and layered wood materials.. *Composite Structures*, Volumen 95, pp. 44-52.
- Sabato, A. & Niezrecki, C., 2017. Feasibility of Digital Image Correlation for railroad tie inspection and ballast support assessment. *Measurement*, Volumen 103, pp. 93-105.
- WOODTECH, 2014. *Proyecto WOODTECH*. [En línea] Available at: <http://www.woodtech-project.eu/>

- Zink, A. G., Hanna, R. B. & Stelmokas, J. W., 1997. Measurement of Poisson's ratios for yellow-poplar. *Forest Products Journal*, 47(3), pp. 78-80.

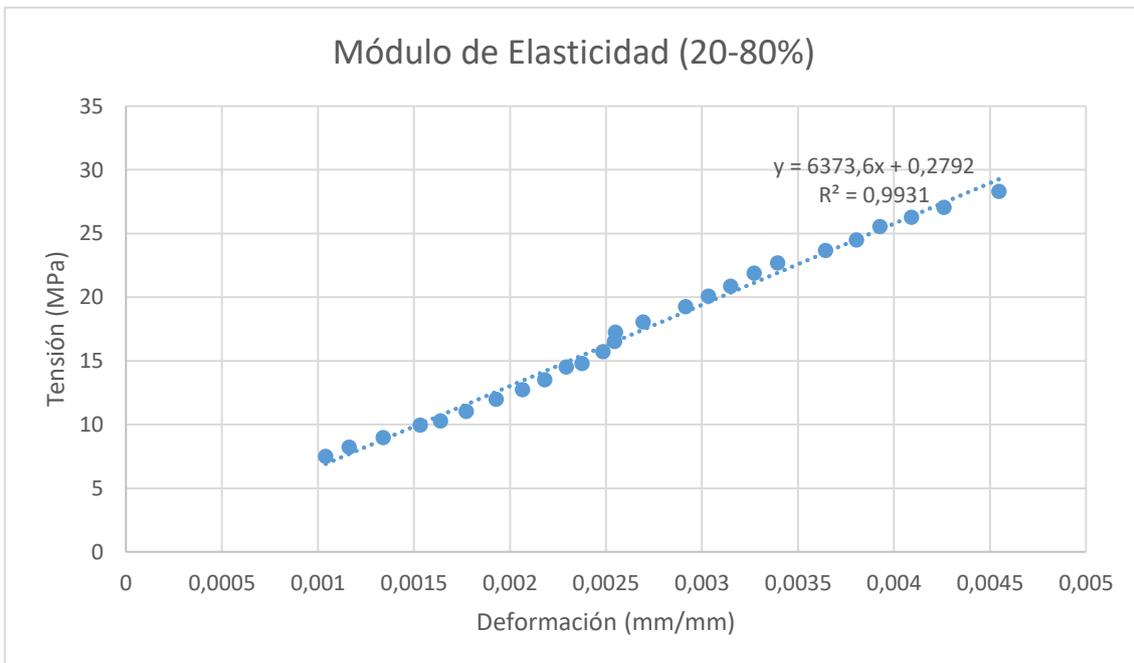
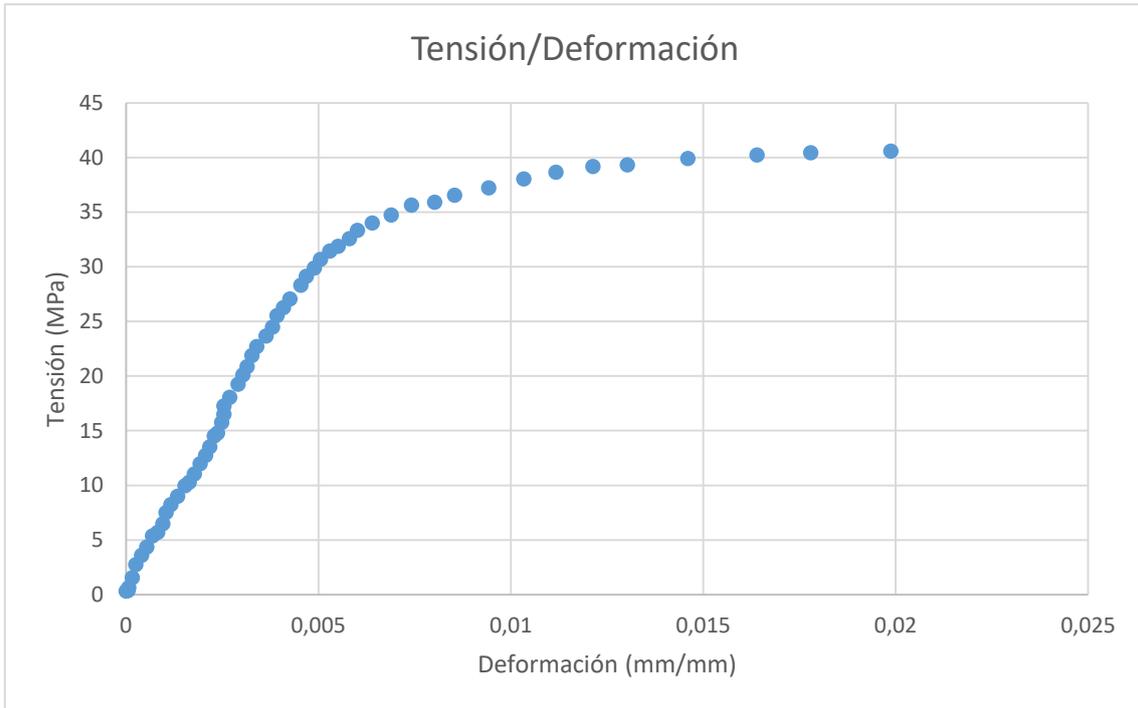
# ANEJO 1: DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo A1		Duración (s)	13,1	
		Inicio (s)	14,4	
		Fin (s)	27,5	
Carga (kgf)	Tensión MPa	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
13,15	0,3225	0	14,4	0
15,54	0,38	0,2	14,6	0,00005365
21,35	0,6325	0,4	14,8	7,2475E-05
62,85	1,54	0,8	15,2	0,00015925
100,42	2,7375	1	15,4	0,000253775
146,19	3,585	1,2	15,6	0,0004053
177,27	4,345	1,4	15,8	0,00054265
209,38	5,375	1,6	16	0,00068775
232,61	5,7025	1,8	16,2	0,000825275
263,69	6,465	2	16,4	0,000955325
296,31	7,5025	2,2	16,6	0,001040075
335,42	8,2225	2,4	16,8	0,00116315
366,33	8,9825	2,6	17	0,00134065
396,73	9,965	2,8	17,2	0,0015333
419,45	10,2825	3	17,4	0,001638375
450,02	11,0325	3,2	17,6	0,0017728
488,79	11,9825	3,4	17,8	0,0019284
519,36	12,7325	3,6	18	0,002065625
551,63	13,525	3,8	18,2	0,002181625
582,2	14,5125	4	18,4	0,0022944
603,21	14,7875	4,2	18,6	0,00237565
633,61	15,73	4,4	18,8	0,002484675
673,57	16,515	4,6	19	0,002545875
703,8	17,255	4,8	19,2	0,00254935
735,91	18,0425	5	19,4	0,002694675
785,61	19,26	5,4	19,8	0,00291495
819,25	20,085	5,6	20	0,00303515
851,02	20,865	5,8	20,2	0,003150825
881,42	21,885	6	20,4	0,003272625
916,43	22,7025	6,2	20,6	0,003395425
998,92	24,49	6,8	21,2	0,00380475

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

1030,69	25,5375	7	21,4	0,0039268
1071,67	26,275	7,2	21,6	0,00409195
1103,27	27,0475	7,4	21,8	0,00426075
1155,02	28,3175	7,8	22,2	0,004547375
1187,81	29,12	8	22,4	0,004687875
1218,72	29,88	8,2	22,6	0,00489105
1251,17	30,675	8,4	22,8	0,0050559
1281,74	31,425	8,6	23	0,005293225
1300,01	31,8725	8,8	23,2	0,005512775
1328,7	32,575	9	23,4	0,0058082
1359,79	33,3375	9,2	23,6	0,006014125
1387,8	34,025	9,4	23,8	0,006400475
1416,83	34,735	9,6	24	0,0068923
1443,81	35,64	9,8	24,2	0,00741815
1464,82	35,9125	10	24,4	0,008024475
1490,78	36,55	10,2	24,6	0,0085439
1518,62	37,2325	10,4	24,8	0,0094268
1544,23	38,0425	10,6	25	0,0103379
1568,49	38,655	10,8	25,2	0,01116975
1598,54	39,19	11	25,4	0,01213585
1604,52	39,3375	11,2	25,6	0,01303285
1623,31	39,91	11,4	25,8	0,01460045
1640,73	40,225	11,6	26	0,0164016
1649,95	40,45	11,8	26,2	0,01779325
1655,25	40,58	12	26,4	0,0198784
1654,05	40,505	12,4	26,8	0,0256036
1639,53	40,195	12,6	27	0,03144585
1573,95	38,5875	12,8	27,2	-0,013430625
1295,91	31,7725	13	27,4	-0,012139625

Tensión de rotura (MPa)	40,58
Módulo de Elasticidad (MPa)	6373,6



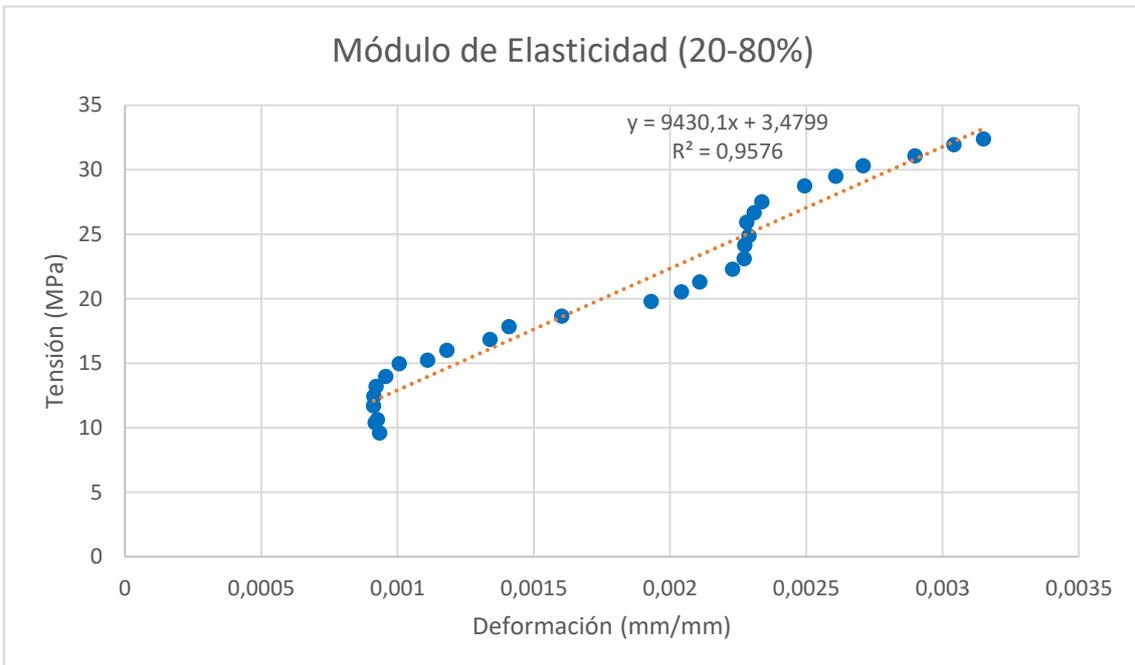
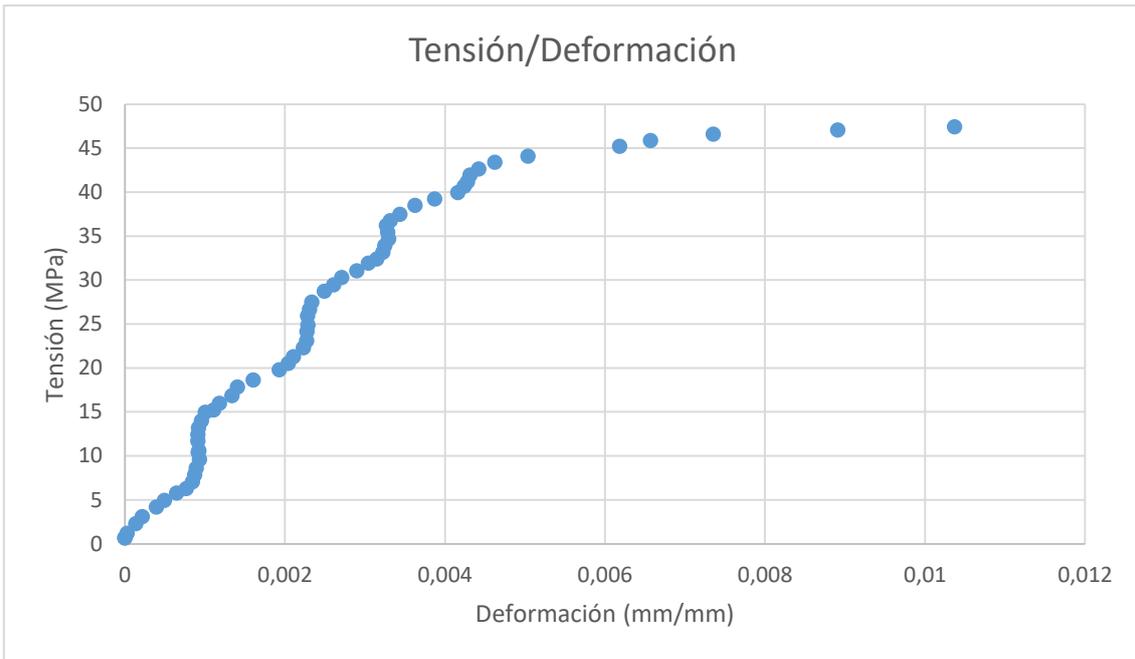
**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

<b>Ensayo A2</b>		Duración (s)	16,7	
		Inicio (s)	18,96	
		Fin (s)	35,66	
<b>Carga (kgf)</b>	<b>Tensión (MPa)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Tiempo video</b>	<b>Deformación (mm/mm)</b>
27,84	0,6825	0	18,96	0
42,01	1,205	0,4	19,36	0,00002625
94,1	2,3075	0,8	19,76	0,000137475
127,58	3,1275	1	19,96	0,000217725
161,56	4,205	1,2	20,16	0,000394475
203,06	4,9775	1,4	20,36	0,000494875
235,85	5,7825	1,6	20,56	0,00064915
245,76	6,305	1,8	20,76	0,0007699
288,46	7,0725	2	20,96	0,0008446
320,9	7,8675	2,2	21,16	0,00087165
351,47	8,6175	2,4	21,36	0,000893575
382,39	9,61	2,6	21,56	0,000934375
424,4	10,405	2,8	21,76	0,000918025
433,96	10,64	3	21,96	0,000926125
466,24	11,7075	3,2	22,16	0,00091255
507,91	12,4525	3,4	22,36	0,000914125
538,65	13,205	3,6	22,56	0,000922075
570,76	13,9925	3,8	22,76	0,0009574
601,5	14,9825	4	22,96	0,0010072
622,17	15,2525	4,2	23,16	0,001110925
652,74	16,0025	4,4	23,36	0,00118115
687,92	16,865	4,6	23,56	0,001340175
718,15	17,845	4,8	23,76	0,00140885
751,62	18,665	5	23,96	0,001603075
807,47	19,7975	5,4	24,36	0,001931125
837,36	20,53	5,6	24,56	0,002041775
868,95	21,305	5,8	24,76	0,002108875
900,21	22,3	6	24,96	0,002229775
933	23,1075	6,2	25,16	0,00227275
985,26	24,155	6,6	25,56	0,0022745
1015,31	24,8925	6,8	25,76	0,002289625
1047,08	25,9425	7	25,96	0,00228205
1088,58	26,6875	7,2	26,16	0,002308975
1121,88	27,505	7,4	26,36	0,002337025
1172,61	28,7475	7,8	26,76	0,002493725
1202,67	29,485	8	26,96	0,0026092
1235,97	30,3025	8,2	27,16	0,00270895
1267,56	31,0775	8,4	27,36	0,0028988
1302,75	31,94	8,6	27,56	0,003042175

DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

1321,7	32,4025	8,8	27,76	0,0031506
1352,96	33,17	9	27,96	0,00322435
1384,72	33,9475	9,2	28,16	0,0032492
1414,78	34,685	9,4	28,36	0,003297825
1446,38	35,46	9,6	28,56	0,00328655
1477,8	36,23	9,8	28,76	0,00326875
1499,83	36,77	10	28,96	0,003317375
1529,55	37,5	10,2	29,16	0,00343955
1561,14	38,5	10,4	29,36	0,003626975
1599,91	39,225	10,6	29,56	0,003874325
1629,46	39,95	10,8	29,76	0,0041602
1660,2	40,7025	11	29,96	0,0042405
1680,18	41,1925	11,2	30,16	0,00428425
1710,75	41,9425	11,4	30,36	0,0043144
1739,27	42,64	11,6	30,56	0,0044253
1770,52	43,4075	11,8	30,76	0,004625725
1798,19	44,085	12	30,96	0,005040125
1844,3	45,215	12,4	31,36	0,006183375
1871,63	45,885	12,6	31,56	0,00657275
1894,34	46,6025	12,8	31,76	0,00735575
1920,3	47,08	13	31,96	0,008912425
1934,82	47,435	13,2	32,16	0,01037225
1934,82	47,33	13,6	32,56	0,01683535
1913,47	46,6825	13,8	32,76	0,0214121
1843,62	45,2	14	32,96	0,022740025
1720,48	42,18	14,2	33,16	-0,0084422
1594,1	39,0825	14,4	33,36	-0,007970275
1514,01	37,1175	14,8	33,76	-0,00738245
1518,28	37,2575	15	33,96	-0,00706765
1521,18	37,295	15,2	34,16	-0,0064648
1514,18	37,1225	15,4	34,36	-0,006056425
1498,46	36,7375	15,6	34,56	-0,0056836
1478,31	36,1475	16	34,96	-0,0048442
1466,02	35,875	16,2	35,16	-0,004579625
1455,09	35,675	16,4	35,36	-0,00440495
1445,69	35,4425	16,6	35,56	-0,00395965

Tensión de rotura (MPa)	47,4975
Módulo de Elasticidad (MPa)	9430,1



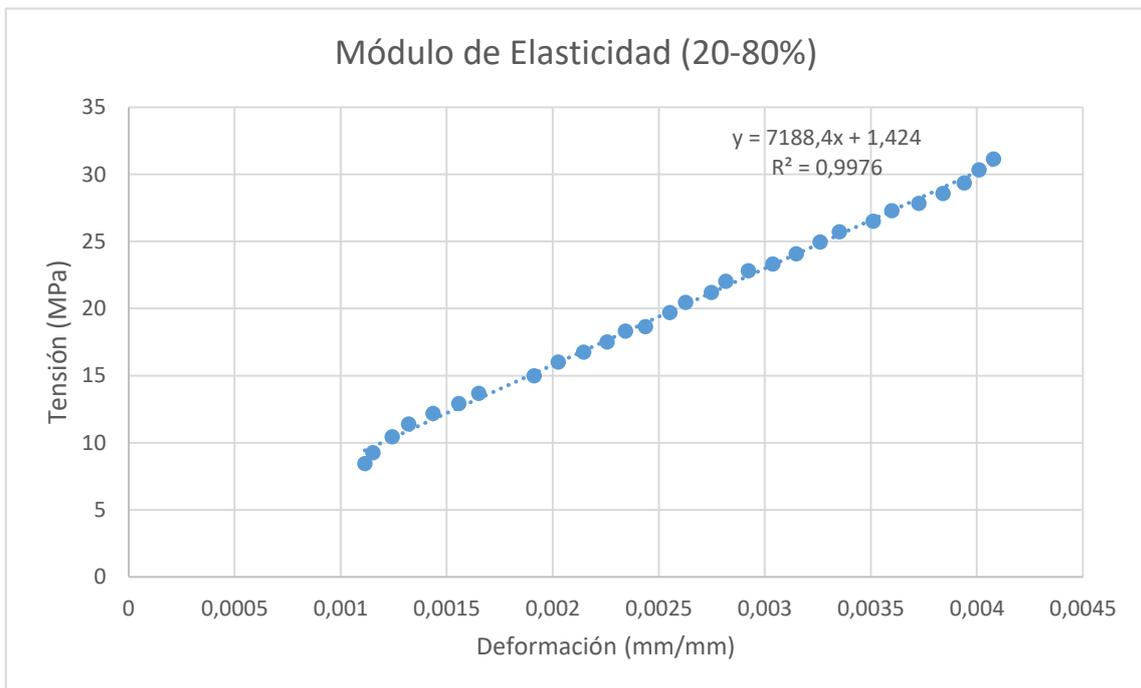
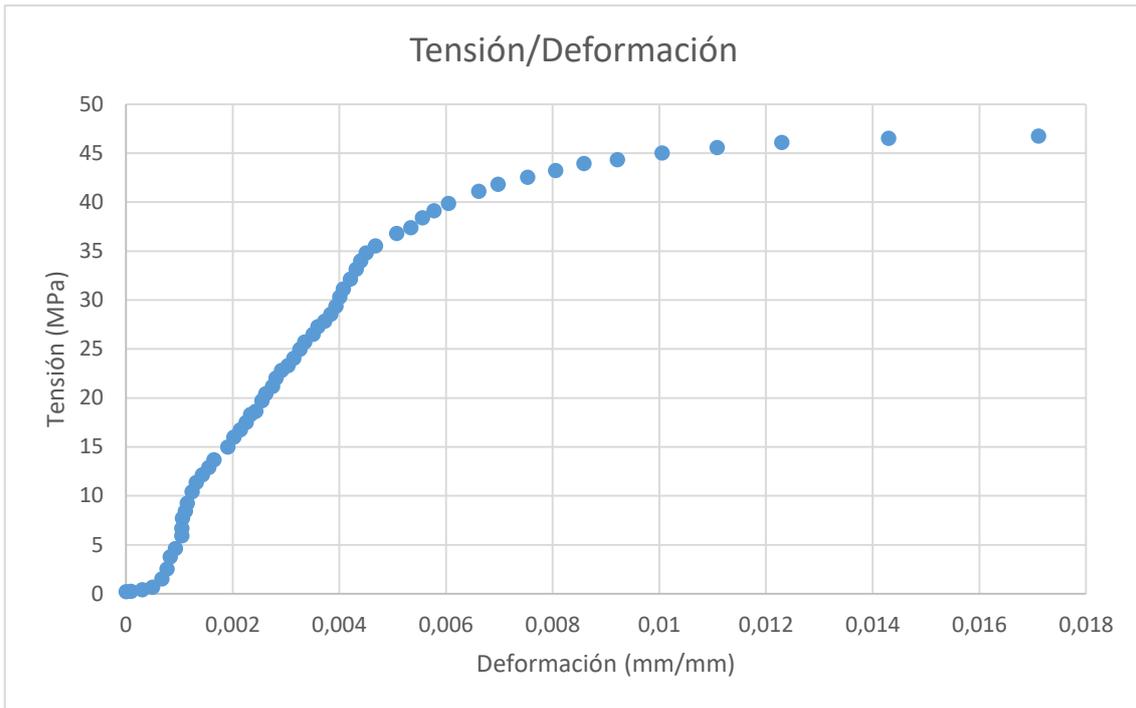
DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo A3		Duración (s)	14,4	
		Inicio (s)	18,5	
		Fin (s)	32,9	
Carga (kgf)	Tensión (MPa)	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
9,05	0,225	0,1	18,6	0,00000605
10,42	0,255	0,3	18,8	0,00009765
17,76	0,435	0,5	19	0,00030465
28,35	0,695	0,7	19,2	0,000499575
61,99	1,52	0,9	19,4	0,000677375
103,5	2,5375	1,1	19,6	0,00076945
153,54	3,765	1,3	19,8	0,000834575
189,23	4,64	1,5	20	0,00093125
241,83	5,93	1,9	20,4	0,001051475
273,08	6,695	2,1	20,6	0,0010504
305,7	7,7375	2,3	20,8	0,001058475
344,81	8,4525	2,5	21	0,001113875
377,43	9,2525	2,7	21,2	0,00115225
425,77	10,4375	3,1	21,6	0,00124375
464,53	11,39	3,3	21,8	0,0013208
496,64	12,175	3,5	22	0,0014363
527,21	12,925	3,7	22,2	0,001556375
558,12	13,6825	3,9	22,4	0,00165155
611,24	14,985	4,3	22,8	0,001912325
643,18	16,0025	4,5	23	0,00202585
683,48	16,7575	4,7	23,2	0,00214515
714,22	17,51	4,9	23,4	0,002255825
747,7	18,33	5,1	23,6	0,00234285
760,67	18,65	5,3	23,8	0,002437225
794,32	19,7125	5,5	24	0,002552925
834,28	20,455	5,7	24,2	0,0026259
865,02	21,2075	5,9	24,4	0,002748525
898,67	22,0325	6,1	24,6	0,002815775
930,61	22,815	6,3	24,8	0,0029218
951,44	23,325	6,5	25	0,003037525
981,84	24,0725	6,7	25,2	0,003148225
1018,56	24,9725	6,9	25,4	0,00326105
1049,13	25,72	7,1	25,6	0,0033516
1081,07	26,505	7,3	25,8	0,003511025
1113	27,2875	7,5	26	0,003598525
1135,38	27,835	7,7	26,2	0,003726675
1165,43	28,5725	7,9	26,4	0,0038404
1197,54	29,36	8,1	26,6	0,00394025

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

1227,77	30,335	8,3	26,8	0,004009625
1261,07	31,1525	8,5	27	0,0040785
1311,8	32,16	8,9	27,4	0,00421195
1342,2	33,17	9,1	27,6	0,00432125
1377,04	33,99	9,3	27,8	0,00440615
1406,92	34,8075	9,5	28	0,004504725
1449,45	35,535	9,7	28,2	0,0046783
1489,93	36,8	10,1	28,6	0,00508135
1525,96	37,4125	10,3	28,8	0,005344125
1555,51	38,4025	10,5	29	0,005561625
1595,64	39,12	10,7	29,2	0,005779025
1626,38	39,8725	10,9	29,4	0,006048925
1676,42	41,1	11,3	29,8	0,0066195
1706,31	41,8325	11,5	30	0,0069774
1735,86	42,5575	11,7	30,2	0,007531475
1763,35	43,2325	11,9	30,4	0,00805855
1793,07	43,96	12,1	30,6	0,00858895
1809,29	44,3575	12,3	30,8	0,009218775
1836,79	45,0325	12,5	31	0,0100539
1859,67	45,5925	12,7	31,2	0,0110849
1880,34	46,1	12,9	31,4	0,012300725
1898,27	46,54	13,1	31,6	0,01430015
1906,81	46,765	13,3	31,8	0,017111425
1906,98	46,7525	13,5	32	0,020847075
1896,91	46,505	13,7	32,2	0,02593365
1870,95	45,87	13,9	32,4	0,033085125
1813,22	44,455	14,1	32,6	0,0447315
1500,17	36,78	14,3	32,8	0,062136625

Tensión de rotura (MPa)	46,765
Módulo de Elasticidad (MPa)	7188,4



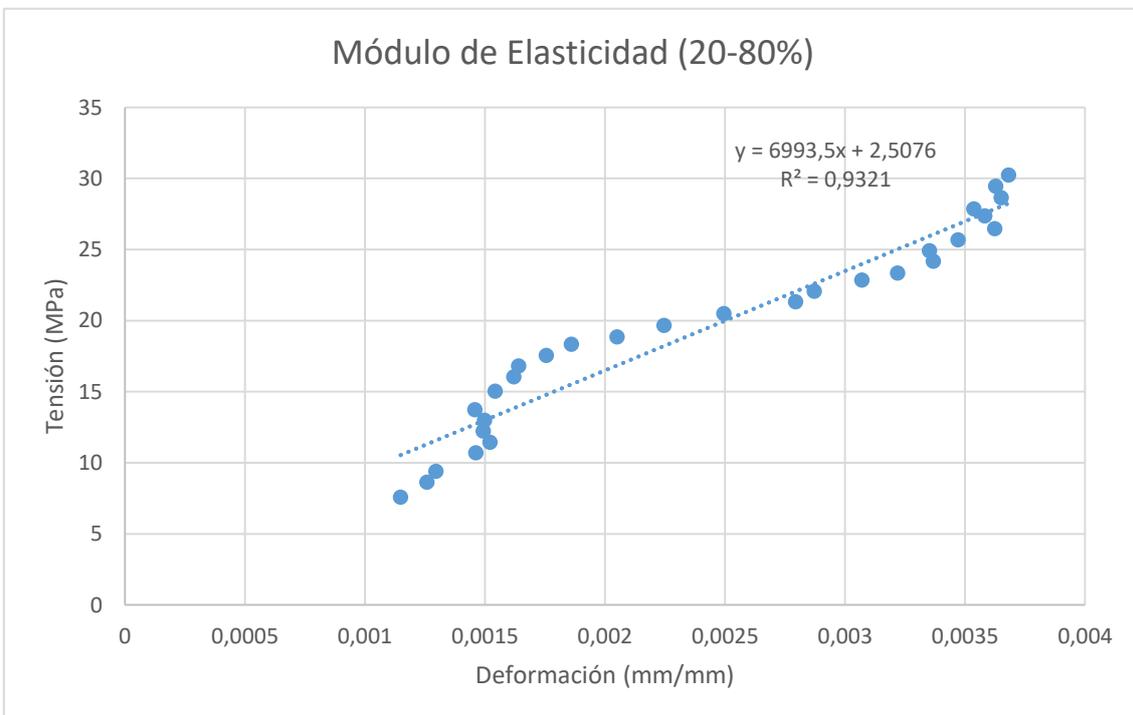
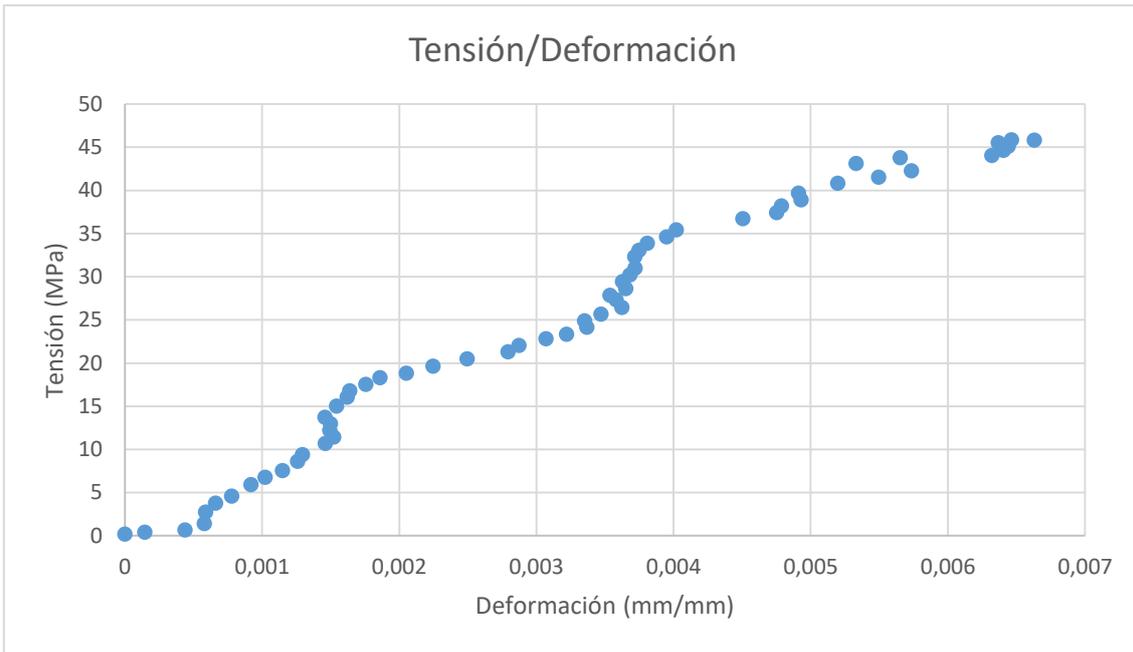
**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

<b>Ensayo A4</b>		Duración (s)	16,7	
		Inicio (s)	19,5	
		Fin (s)	36,2	
<b>Carga (kgf)</b>	<b>Tensión (MPa)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Tiempo video</b>	<b>Deformación (mm/mm)</b>
8,71	0,2125	0,1	19,6	6E-07
17,25	0,4225	0,5	20	0,000145425
27,15	0,665	0,7	20,2	0,00043955
57,73	1,415	0,9	20,4	0,000580075
112,55	2,76	1,1	20,6	0,000588375
154,39	3,785	1,3	20,8	0,0006612
187,18	4,59	1,5	21	0,000778125
241,49	5,92	1,9	21,4	0,000919875
276,16	6,77	2,1	21,6	0,001021525
308,61	7,565	2,3	21,8	0,001148725
339,35	8,6375	2,5	22	0,001258925
383,24	9,395	2,7	22,2	0,00129555
426,62	10,695	3,1	22,6	0,0014625
466,75	11,4425	3,3	22,8	0,001521525
498,86	12,23	3,5	23	0,001493825
529,6	12,985	3,7	23,2	0,001498025
560,17	13,7325	3,9	23,4	0,001458775
612,95	15,0275	4,3	23,8	0,0015423
645,05	16,05	4,5	24	0,001620975
685,36	16,8025	4,7	24,2	0,001640525
715,76	17,5475	4,9	24,4	0,0017561
747,7	18,33	5,1	24,6	0,001860075
768,53	18,8425	5,3	24,8	0,0020514
802	19,6625	5,5	25	0,002246325
835,65	20,4875	5,7	25,2	0,0024962
869,12	21,3075	5,9	25,4	0,0027946
899,52	22,0525	6,1	25,6	0,00287285
931,46	22,835	6,3	25,8	0,00307085
952,3	23,3475	6,5	26	0,00321995
985,6	24,1625	6,7	26,2	0,003368025
1015,66	24,9	6,9	26,4	0,0033528
1047,59	25,6825	7,1	26,6	0,003471975
1079,53	26,4675	7,3	26,8	0,003624425
1115,91	27,3575	7,5	27	0,00358295
1127,01	27,86	7,7	27,2	0,003537325
1168,34	28,6425	7,9	27,4	0,00365165
1201,47	29,455	8,1	27,6	0,003629025
1233,07	30,23	8,3	27,8	0,0036818

DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

1265	31,0125	8,5	28	0,00371945
1308,89	32,325	8,9	28,4	0,00371705
1348,52	33,06	9,1	28,6	0,003749025
1381,48	33,87	9,3	28,8	0,003810375
1412,73	34,635	9,5	29	0,0039496
1445,52	35,44	9,7	29,2	0,0040216
1486	36,7325	10,1	29,6	0,0045074
1527,5	37,45	10,3	29,8	0,004751525
1558,24	38,2025	10,5	30	0,004787475
1587,1	38,91	10,7	30,2	0,004930275
1618,7	39,685	10,9	30,4	0,004912225
1666	40,845	11,3	30,8	0,005198925
1694,87	41,5525	11,5	31	0,005497075
1724,58	42,28	11,7	31,2	0,005734425
1750,88	43,1275	11,9	31,4	0,0053313
1777,36	43,7975	12,1	31,6	0,0056531
1796,48	44,0425	12,3	31,8	0,006322575
1820,56	44,635	12,5	32	0,0064065
1840,72	45,1275	12,7	32,2	0,006442425
1856,6	45,5175	12,9	32,4	0,006368725
1866,33	45,82	13,1	32,6	0,00663235
1870,26	45,8525	13,3	32,8	0,00646475
1868,9	45,7475	13,5	33	0,006325075
1840,89	45,1325	13,7	33,2	0,00628825
1759,94	43,1475	13,9	33,4	0,00573355
1651,66	40,4925	14,1	33,6	0,005723825
1636,8	40,13	14,3	33,8	0,0060411
1661,05	40,7225	14,5	34	0,00669955
1672,66	41,0075	14,7	34,2	0,00676035
1684,62	41,3	14,9	34,4	0,00729245
1692,82	41,5025	15,1	34,6	0,007684325
1692,82	41,5025	15,3	34,8	0,007550975
1688,38	41,3925	15,5	35	0,008071275
1676,42	41,1	15,9	35,4	0,009443125
1658,32	40,6575	16,1	35,6	0,0100079
1624,67	39,8325	16,3	35,8	0,0108489
1554,48	38,11	16,5	36	0,009657125
1392,92	30,7125	16,7	36,2	0,008976075

Tensión de rotura (MPa)	45,8525
Módulo de Elasticidad (MPa)	6993,5



DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo A5		Duración (s)	18,7	
		Inicio (s)	18,32	
		Fin (s)	37,02	
Carga (kgf)	Tensión (MPa)	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
10,08	0,2475	0	18,32	0
11,95	0,2925	0,2	18,52	0,00001495
57,55	1,705	0,8	19,12	0,000323275
107,25	2,63	1	19,32	0,00043245
144,48	3,5425	1,2	19,52	0,000596575
180,01	4,665	1,4	19,72	0,000723775
222,02	5,4425	1,6	19,92	0,00083755
235,34	5,77	1,8	20,12	0,00095785
266,42	6,775	2	20,32	0,00102455
307,41	7,5375	2,2	20,52	0,0010846
340,2	8,34	2,4	20,72	0,0011926
370,77	9,09	2,6	20,92	0,001263025
401,51	10,0825	2,8	21,12	0,00133305
424,23	10,4	3	21,32	0,001422425
454,8	11,15	3,2	21,52	0,00151185
486,91	12,175	3,4	21,72	0,001562175
527,21	12,925	3,6	21,92	0,001680325
557,95	13,68	3,8	22,12	0,001795225
590,06	14,4675	4	22,32	0,00186245
610,73	14,9725	4,2	22,52	0,00198985
643	15,765	4,4	22,72	0,002064525
673,4	16,51	4,6	22,92	0,002156575
703,8	17,4925	4,8	23,12	0,002236
745,82	18,285	5	23,32	0,00236735
785,95	19,5825	5,4	23,72	0,00248855
821,3	20,135	5,6	23,92	0,002620975
853,24	21,19	5,8	24,12	0,002718925
896,45	21,9775	6	24,32	0,0027812
930,09	22,8025	6,2	24,52	0,0029376
979,79	24,02	6,6	24,92	0,0031035
1013,27	24,8425	6,8	25,12	0,00318975
1041,96	25,545	7	25,32	0,00332295
1073,89	26,3275	7,2	25,52	0,00334235
1106	27,35	7,4	25,72	0,0034655
1155,19	28,5925	7,8	26,12	0,003774075
1196,69	29,34	8	26,32	0,0038431
1228,45	30,1175	8,2	26,52	0,0038901
1258,85	30,8625	8,4	26,72	0,004033275

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

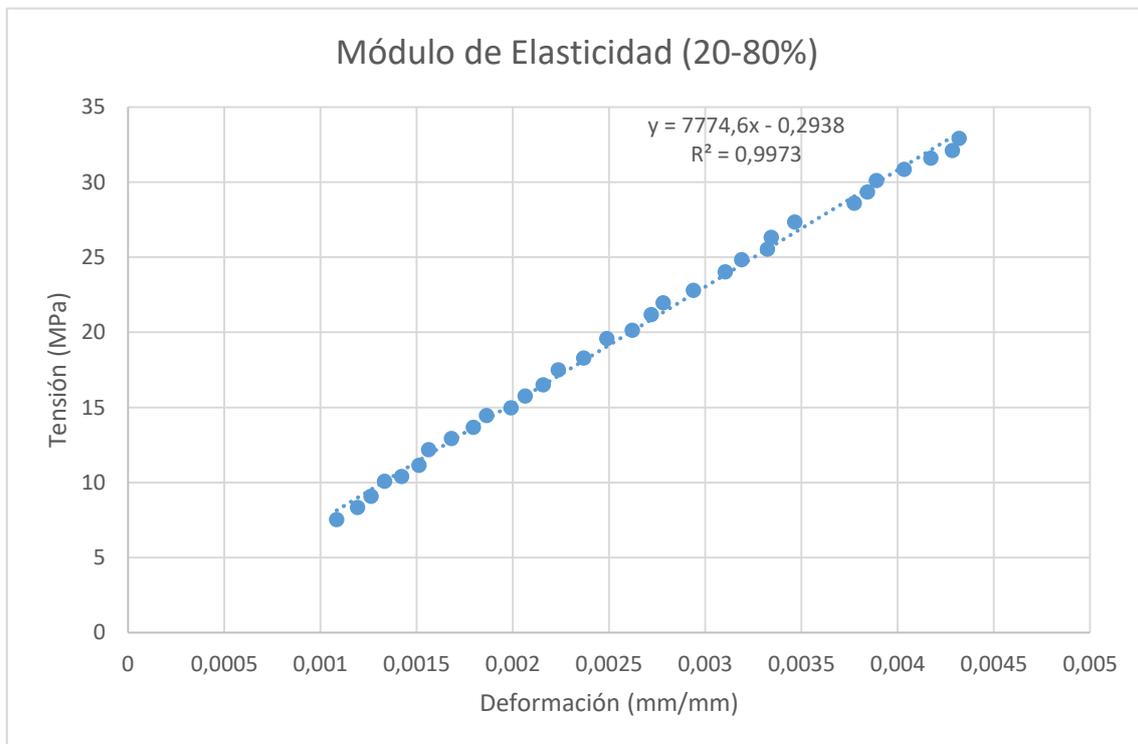
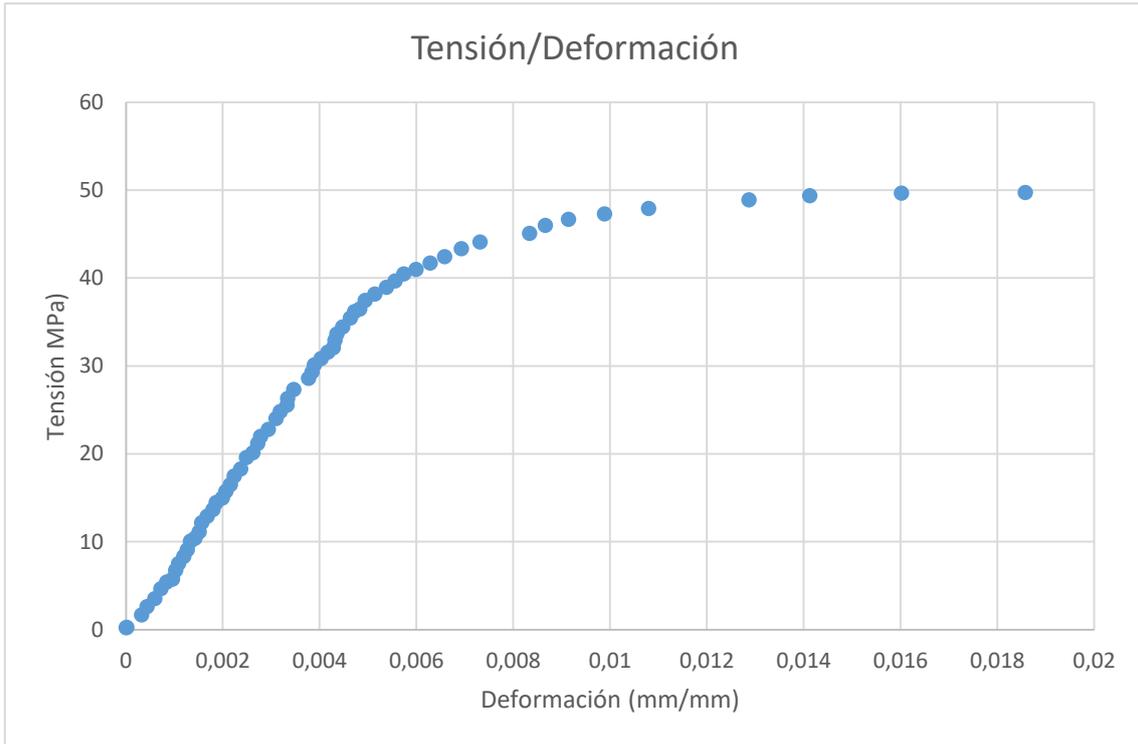
1288,91	31,6	8,6	26,92	0,00417185
1309,41	32,1025	8,8	27,12	0,004284975
1343,05	32,9275	9	27,32	0,004319075
1372,94	33,66	9,2	27,52	0,004353175
1404,53	34,435	9,4	27,72	0,0044729
1434,76	35,4775	9,6	27,92	0,0046367
1476,77	36,205	9,8	28,12	0,004719725
1487,71	36,4725	10	28,32	0,004831225
1519,13	37,475	10,2	28,52	0,00494285
1558,41	38,2075	10,4	28,72	0,005142875
1589,15	38,96	10,6	28,92	0,005380025
1618,53	39,68	10,8	29,12	0,005561575
1651,32	40,485	11	29,32	0,005738775
1671,3	40,975	11,2	29,52	0,005992275
1701,7	41,72	11,4	29,72	0,00628105
1730,9	42,435	11,6	29,92	0,00658455
1759,77	43,365	11,8	30,12	0,0069303
1798,7	44,0975	12	30,32	0,007315925
1839,86	45,1075	12,4	30,72	0,008336275
1868,9	45,99	12,6	30,92	0,008663125
1903,74	46,6725	12,8	31,12	0,00913875
1929,35	47,3025	13	31,32	0,00988295
1955,14	47,9325	13,2	31,52	0,010795375
1994,25	48,8925	13,6	31,92	0,01286955
2013,89	49,375	13,8	32,12	0,01412785
2026,36	49,68	14	32,32	0,016021375
2028,58	49,735	14,2	32,52	0,018578075
2015,6	49,415	14,4	32,72	0,021496075
1880	46,09	14,8	33,12	0,0255083
1688,04	40,4725	15	33,32	0,02587525
1633,38	40,045	15,2	33,52	0,02649875
1666,35	40,8525	15,4	33,72	0,0272675
1712,29	41,98	15,6	33,92	0,0282841
1723,56	42,255	15,8	34,12	0,02972495
1742,52	42,72	16	34,32	0,030796975
1748,15	42,8175	16,2	34,52	0,032696525
1734,15	42,515	16,4	34,72	0,034678825
1719,97	42,1675	16,6	34,92	0,037736375
1711,6	41,9625	16,8	35,12	0,041108
1708,36	41,8825	17	35,32	0,04496685
1693,16	41,305	17,2	36,52	-0,0139834
1662,42	40,7575	17,4	35,72	-0,0117324
1633,9	40,0575	17,6	35,92	-0,012215525

DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

---

1610,67	39,4875	17,8	36,12	-0,012731625
1587,96	38,7525	18	36,32	-0,0133111
1573,61	38,58	18,2	36,52	-0,0139834
1546,28	37,91	18,4	36,72	-0,01470005
1518,28	37,2225	18,6	36,92	-0,0152183

Tensión de rotura (MPa)	49,735
Módulo de Elasticidad (MPa)	7774,6



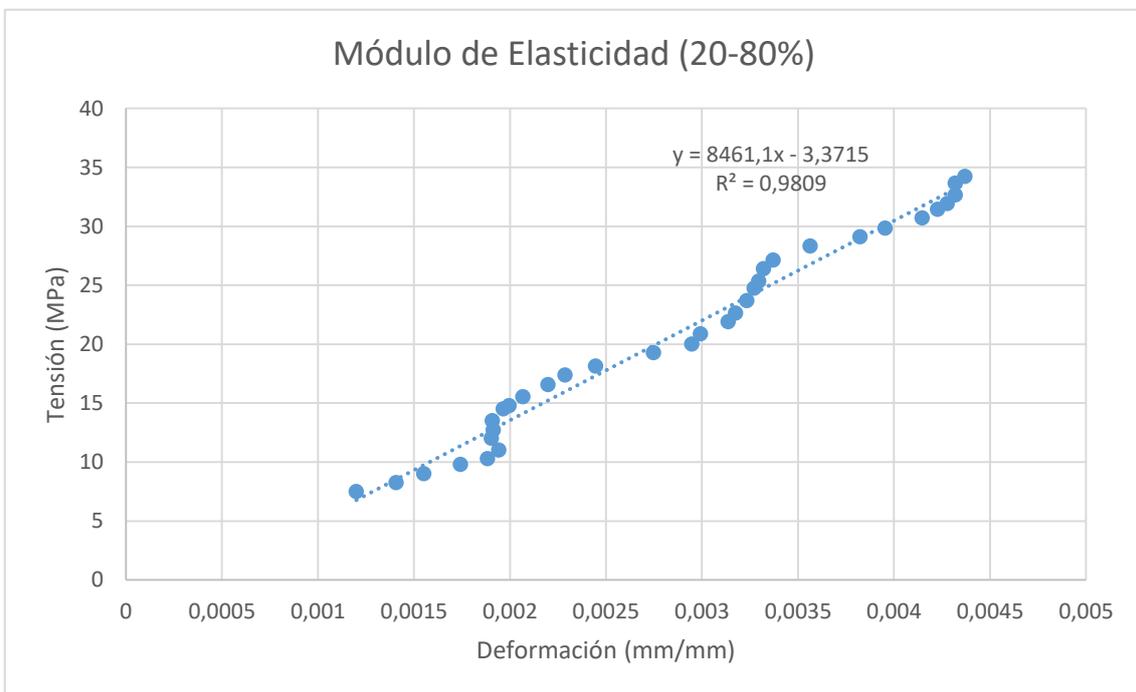
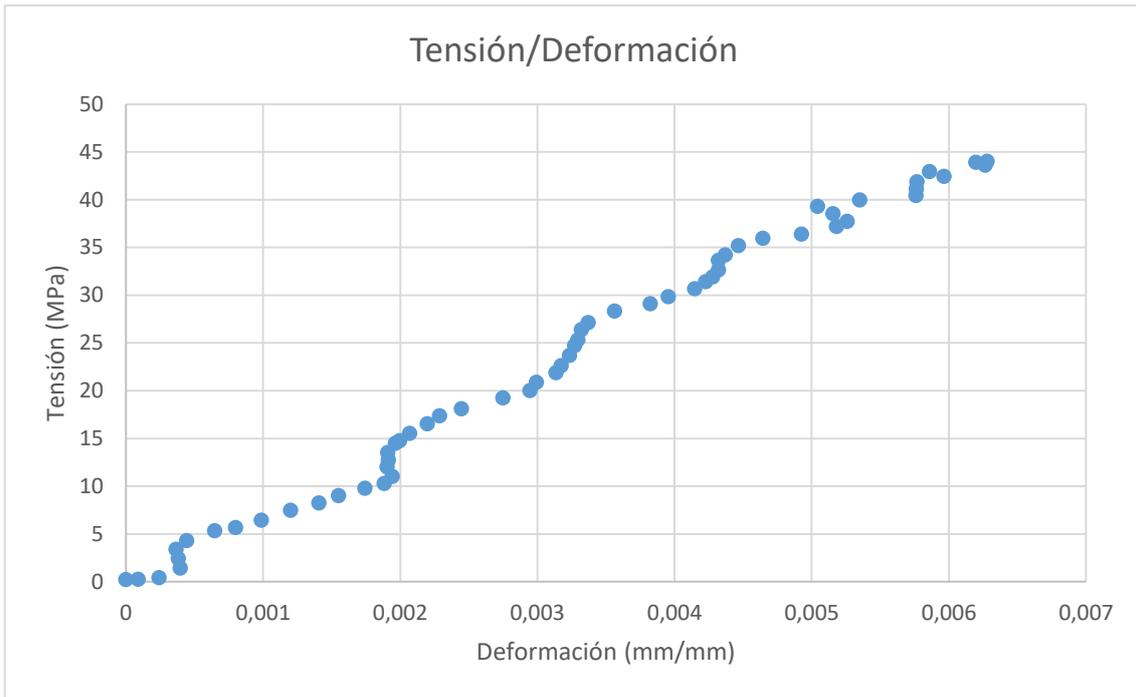
DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo A6		Duración (s)	15,6	
		Inicio (s)	17,92	
		Fin (s)	33,52	
Carga (kgf)	Tensión (MPa)	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
10,08	0,2475	0	17,92	0
11,44	0,28	0,2	18,12	0,0000894
18,27	0,4475	0,4	18,32	0,000242125
48,16	1,4525	0,8	18,72	0,000396625
100,08	2,4525	1	18,92	0,00038145
140,04	3,4325	1,2	19,12	0,000365525
176,93	4,3375	1,4	19,32	0,0004432
209,38	5,375	1,6	19,52	0,000646425
232,61	5,7025	1,8	19,72	0,00080055
263,69	6,465	2	19,92	0,000987075
296,65	7,5075	2,2	20,12	0,001199875
337,13	8,265	2,4	20,32	0,001407575
368,21	9,0275	2,6	20,52	0,0015514
400,32	9,815	2,8	20,72	0,001742775
419,79	10,2925	3	20,92	0,001883
450,53	11,045	3,2	21,12	0,00194255
481,1	12,0325	3,4	21,32	0,001904125
519,87	12,745	3,6	21,52	0,001913025
552,15	13,5375	3,8	21,72	0,00190915
582,72	14,525	4	21,92	0,0019662
603,72	14,8025	4,2	22,12	0,0019951
634,12	15,5475	4,4	22,32	0,00206815
664,52	16,5725	4,6	22,52	0,0021981
699,88	17,3975	4,8	22,72	0,002286325
740,01	18,1425	5	22,92	0,00244635
786,46	19,2825	5,4	23,32	0,002748325
817,03	20,03	5,6	23,52	0,002947
852,22	20,8925	5,8	23,72	0,00299335
884,15	21,91	6	23,92	0,003137075
924,12	22,655	6,2	24,12	0,003174525
966,98	23,7075	6,6	24,52	0,00323405
997,21	24,7625	6,8	24,72	0,003272275
1033,93	25,3475	7	24,92	0,003295625
1064,16	26,4025	7,2	25,12	0,003321325
1106,86	27,1375	7,4	25,32	0,003370875
1156,04	28,3425	7,8	25,72	0,0035643
1187,64	29,1175	8	25,92	0,003823275
1217,87	29,8575	8,2	26,12	0,00395475

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

1252,53	30,7075	8,4	26,32	0,0041474
1282,42	31,44	8,6	26,52	0,004227725
1303,09	31,9475	8,8	26,72	0,004278025
1332,8	32,675	9	26,92	0,004320375
1363,89	33,6675	9,2	27,12	0,00432015
1396,34	34,2325	9,4	27,32	0,00437015
1425,88	35,225	9,6	27,52	0,0044672
1467,55	35,98	9,8	27,72	0,00464545
1476,77	36,4275	10	27,92	0,00492555
1508,54	37,205	10,2	28,12	0,00518115
1540,14	37,76	10,4	28,32	0,005258525
1573,1	38,5675	10,6	28,52	0,005157025
1604,01	39,325	10,8	28,72	0,0050438
1631,16	39,99	11	28,92	0,0053517
1650,8	40,4725	11,2	29,12	0,0057601
1678,3	41,1475	11,4	29,32	0,0057634
1708,53	41,8875	11,6	29,52	0,005767125
1731,41	42,4475	11,8	29,72	0,0059665
1753,1	42,98	12	29,92	0,00585885
1779,75	43,6325	12,4	30,32	0,00626555
1791,87	43,93	12,6	30,52	0,006198675
1795,8	44,0275	12,8	30,72	0,006279775
1790,34	43,8925	13	30,92	0,0062999
1770,87	43,415	13,2	31,12	0,00656255
1736,54	42,3275	13,6	31,52	0,00620055
1674,54	41,055	13,8	31,72	0,00682325
1638,17	39,8475	14	31,92	0,007092175
1613,91	39,5675	14,2	32,12	0,0075867
1607,6	39,4125	14,4	32,32	0,008223475
1568,14	37,99	14,8	32,72	0,010139575
1506,15	36,1975	15	32,92	0,011390825
1423,49	34,9	15,2	33,12	0,012624575
1374,13	33,69	15,4	33,32	0,014474725
1288,74	31,595	15,6	33,52	0,01540855

Tensión de rotura (MPa)	44,0275
Módulo de Elasticidad (MPa)	8461,1



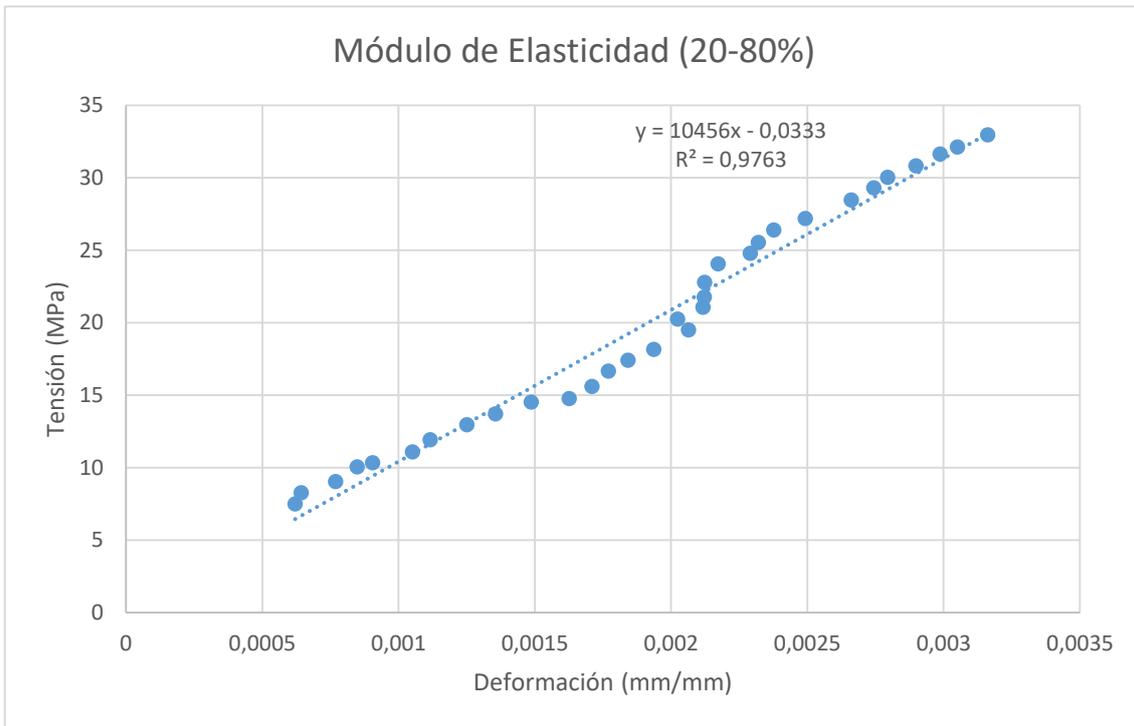
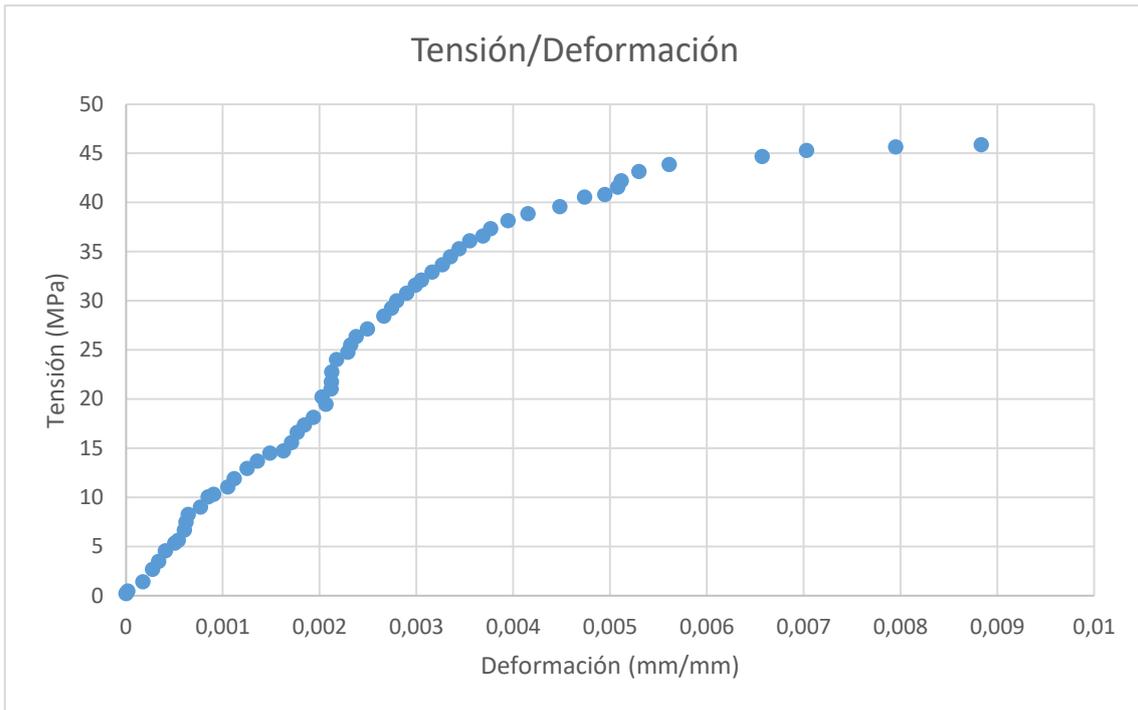
**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

<b>Ensayo A7</b>		Duración (s)	17	
		Inicio (s)	16,32	
		Fin (s)	33,32	
<b>Carga (kgf)</b>	<b>Tensión (MPa)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Tiempo video</b>	<b>Deformación (mm/mm)</b>
8,88	0,2175	0	16,32	0
16,22	0,4975	0,4	16,72	0,000016825
58,75	1,44	0,8	17,12	0,000173475
97,35	2,6875	1	17,32	0,0002744
143,8	3,525	1,2	17,52	0,00033595
176,08	4,5725	1,4	17,72	0,000407625
218,6	5,36	1,6	17,92	0,0005032
230,22	5,645	1,8	18,12	0,00053955
261,64	6,7	2	18,32	0,00060385
306,05	7,5025	2,2	18,52	0,0006205
337,3	8,27	2,4	18,72	0,00064285
368,21	9,0275	2,6	18,92	0,00077015
400,49	10,0575	2,8	19,12	0,000848975
421,5	10,3325	3	19,32	0,0009053
452,24	11,0875	3,2	19,52	0,00105115
486,22	11,92	3,4	19,72	0,001116825
518,5	12,9475	3,6	19,92	0,0012518
558,81	13,7	3,8	20,12	0,00135685
592,28	14,52	4	20,32	0,001487075
601,85	14,755	4,2	20,52	0,001626675
635,66	15,585	4,4	20,72	0,0017099
666,06	16,6475	4,6	20,92	0,0017701
709,44	17,3925	4,8	21,12	0,001843025
740,35	18,15	5	21,32	0,00193675
794,83	19,4875	5,4	21,72	0,002064725
825,57	20,24	5,6	21,92	0,0020239
859,05	21,06	5,8	22,12	0,002117575
887,74	21,765	6	22,32	0,0021227
919,68	22,7825	6,2	22,52	0,0021234
970,91	24,0425	6,6	22,92	0,002173175
1010,87	24,7825	6,8	23,12	0,002291525
1041,1	25,525	7	23,32	0,002320725
1076,28	26,3875	7,2	23,52	0,002376875
1108,22	27,17	7,4	23,72	0,00249325
1160,65	28,455	7,8	24,12	0,00266235
1194,3	29,28	8	24,32	0,0027442
1224,53	30,02	8,2	24,52	0,0027953
1289,59	31,6175	8,6	24,92	0,002987825

DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

1309,92	32,115	8,8	25,12	0,00305115
1343,39	32,935	9	25,32	0,003162525
1373,45	33,6725	9,2	25,52	0,00326665
1406,75	34,49	9,4	25,72	0,003352075
1439,54	35,2925	9,6	25,92	0,003441175
1472,68	36,105	9,8	26,12	0,003549725
1483,44	36,6	10	26,32	0,00368555
1523,91	37,36	10,2	26,52	0,00376735
1556,87	38,17	10,4	26,72	0,0039449
1586,08	38,885	10,6	26,92	0,004151725
1615,11	39,5975	10,8	27,12	0,004479875
1645,51	40,565	11	27,32	0,0047376
1665,15	40,825	11,2	27,52	0,00494505
1695,04	41,5575	11,4	27,72	0,005078125
1722,7	42,235	11,6	27,92	0,0051164
1752,76	43,18	11,8	28,12	0,005299425
1781,63	43,875	12	28,32	0,0056116
1822,78	44,6875	12,4	28,72	0,0065701
1842,94	45,32	12,6	28,92	0,00702905
1863,09	45,6775	12,8	29,12	0,007948725
1871,97	45,895	13	29,32	0,008834125
1865,65	45,74	13,2	29,52	0,010153575
1784,7	43,755	13,6	29,92	0,01393215
1584,37	38,8425	13,8	30,12	0,01431825
1461,58	35,8325	14	30,32	0,013919225
1431,69	35,1	14,2	30,52	0,01469855
1428,1	35,0125	14,4	30,72	0,01538375
1423,83	34,9075	14,8	31,12	0,017125275
1419,39	34,8075	15	31,32	0,093419925
1423,66	34,965	15,2	31,52	0,10096345
1431,69	35,1325	15,4	31,72	0,108521375
1435,27	35,205	15,6	31,92	0,116263975
1436,64	35,2225	15,8	32,12	0,12382015
1436,13	35,21	16	32,32	0,131135925
1433,05	35,1325	16,2	32,52	0,13843155
1428,61	34,9625	16,4	32,72	0,14579345
1418,88	34,665	16,6	32,92	0,1533057
1387,45	34,015	16,8	33,12	0,160790275
1328,19	32,5625	17	33,32	0,16467835

Tensión de rotura (MPa)	45,8475
Módulo de Elasticidad (MPa)	10456



DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo A8		Duración (s)	19	
		Inicio (s)	17,4	
		Fin (s)	36,4	
Carga (kgf)	Tensión (MPa)	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
9,22	0,225	0	17,4	0
10,42	0,255	0,2	17,6	0,000149575
17,42	0,5475	0,4	17,8	0,00029965
65,75	1,6125	0,8	18,2	0,000316325
104,52	2,8525	1	18,4	0,000357225
150,29	3,685	1,2	18,6	0,000416575
184,45	4,5225	1,4	18,8	0,00040175
219,12	5,3725	1,6	19	0,00036255
229,02	5,895	1,8	19,2	0,000385825
271,21	6,65	2	19,4	0,00037335
303,83	7,45	2,2	19,6	0,00041795
334,74	8,2075	2,4	19,8	0,0004121
367,36	9,245	2,6	20	0,00038245
399,81	10,0375	2,8	20,2	0,000406225
420,81	10,3175	3	20,4	0,0004665
451,38	11,0675	3,2	20,6	0,00047945
485,2	12,135	3,4	20,8	0,000473825
525,5	12,8825	3,6	21	0,000550675
559,32	13,7125	3,8	21,2	0,000620825
589,89	14,4625	4	21,4	0,0006523
602,7	14,775	4,2	21,6	0,000715275
633,1	15,84	4,4	21,8	0,000747725
676,48	16,585	4,6	22	0,0008071
706,71	17,325	4,8	22,2	0,0008803
738,81	18,1125	5	22,4	0,000941175
788,68	19,335	5,4	22,8	0,0010782
822,5	20,165	5,6	23	0,001106175
852,73	20,905	5,8	23,2	0,001195675
884,49	21,96	6	23,4	0,001265675
917,97	22,7825	6,2	23,6	0,001295725
969,03	23,7575	6,6	24	0,00137695
1002,51	24,5775	6,8	24,2	0,001451875
1034,61	25,6375	7	24,4	0,00145885
1077,82	26,425	7,2	24,6	0,001511775
1108,22	27,17	7,4	24,8	0,001553125
1157,58	28,38	7,8	25,2	0,0016594
1190,88	29,1975	8	25,4	0,001721625
1224,18	30,0125	8,2	25,6	0,001808575

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

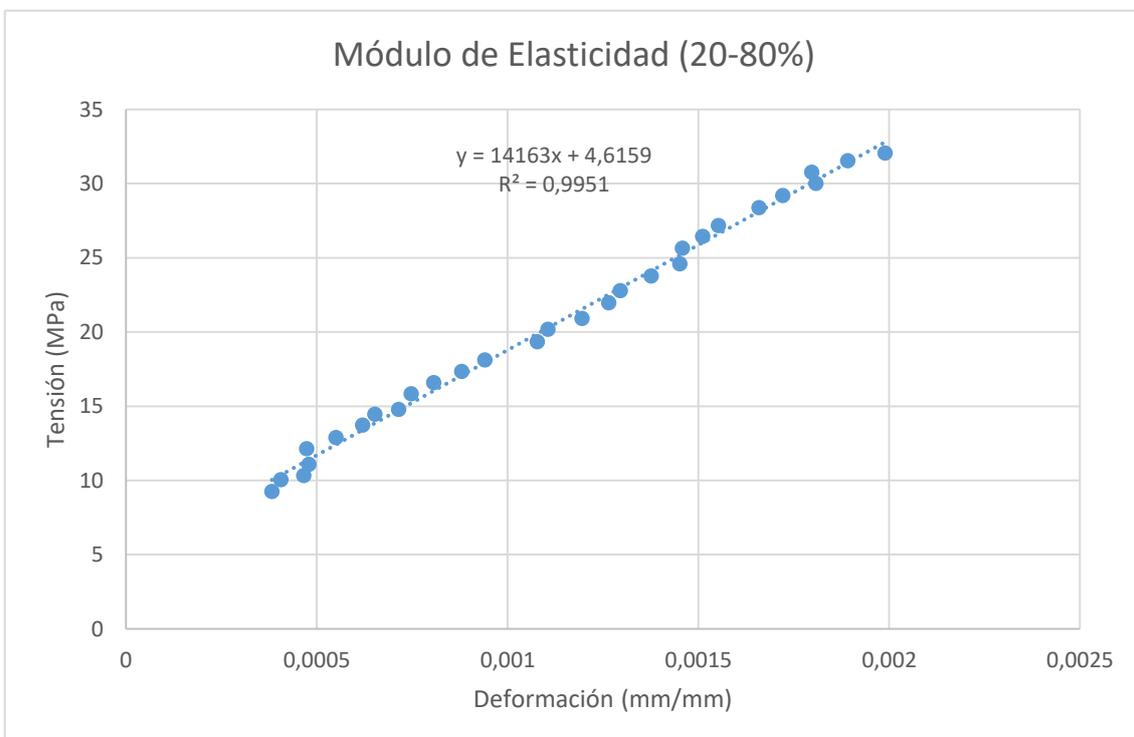
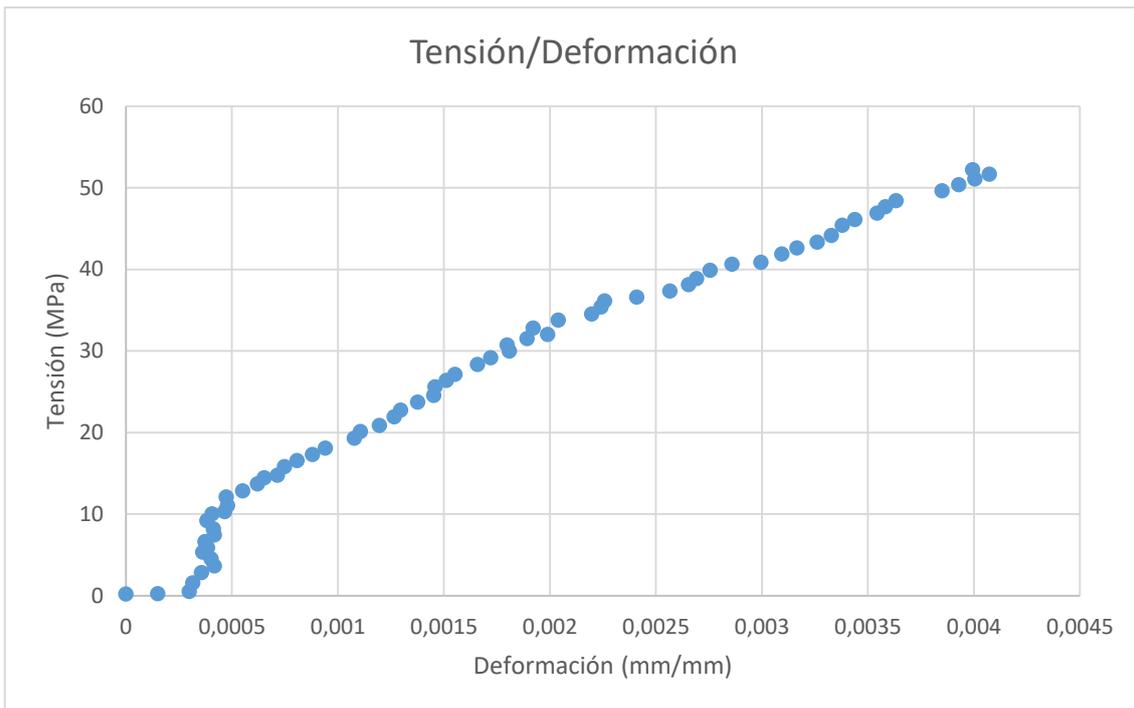
1254,75	30,7625	8,4	25,8	0,001797875
1286,52	31,54	8,6	26	0,0018924
1307,19	32,0475	8,8	26,2	0,001989675
1339,12	32,83	9	26,4	0,001921125
1369,01	33,8025	9,2	26,6	0,00204015
1408,8	34,54	9,4	26,8	0,002197675
1443,64	35,3925	9,6	27	0,0022415
1474,04	36,1375	9,8	27,2	0,00225845
1484,97	36,64	10	27,4	0,002410475
1524,59	37,3775	10,2	27,6	0,0025659
1556,19	38,1525	10,4	27,8	0,0026537
1586,25	38,89	10,6	28	0,002692675
1616,31	39,895	10,8	28,2	0,002755775
1658,83	40,67	11	28,4	0,002859225
1668,22	40,9	11,2	28,6	0,002996025
1699,82	41,9	11,4	28,8	0,0030944
1738,93	42,6325	11,6	29	0,00316625
1768,82	43,365	11,8	29,2	0,00326085
1801,27	44,16	12	29,4	0,00332885
1852,16	45,4075	12,4	29,8	0,00337945
1881,53	46,13	12,6	30	0,003438675
1913,81	46,92	12,8	30,2	0,0035433
1945,41	47,695	13	30,4	0,00358385
1975,3	48,4275	13,2	30,6	0,00363345
2025,16	49,65	13,6	31	0,0038496
2055,05	50,3825	13,8	31,2	0,00392875
2083,57	51,0825	14	31,4	0,004004575
2107,65	51,6725	14,2	31,6	0,004073825
2131,22	52,25	14,4	31,8	0,00399495
2156,33	52,865	14,8	32,2	0,003602175
2158,89	52,9275	15	32,4	0,0033521
2144,88	52,585	15,2	32,6	0,003413075
2105,09	51,61	15,4	32,8	0,0031797
2023,63	49,6125	15,6	33	0,003183975
1975,3	48,4275	15,8	33,2	0,003357375
1848,4	45,3175	16	33,4	0,00337775
1841,06	45,1375	16,2	33,6	0,0034339
1854,72	45,5975	16,4	33,8	0,0037689
1869,07	45,835	16,6	34	0,003908575
1859,84	45,5975	16,8	34,2	0,004014075
1852,67	45,4225	17	34,4	0,004051675
1833,54	44,9525	17,2	34,6	0,004253275
1811,34	44,4075	17,4	34,8	0,004492325

DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

---

1789,99	43,73	17,6	35	0,004727175
1765,06	43,2725	17,8	35,2	0,0051446
1738,08	42,6125	18	35,4	0,005581275
1729,88	42,41	18,2	35,6	0,0062141
1702,72	41,745	18,4	35,8	0,006695825
1672,84	40,6975	18,6	36	0,007205325
1640,39	40,2175	18,8	36,2	0,0076839
1612,04	39,5225	19	36,4	0,007702325

Tensión de rotura (MPa)	52,9325
Módulo de Elasticidad (MPa)	14163



DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo A9		Duración (s)	18,7	
		Inicio (s)	23,48	
		Fin (s)	42,18	
Carga (kgf)	Tensión (MPa)	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
13,49	0,33	0	23,48	0
15,54	0,38	0,2	23,68	0,000037
24,59	0,6025	0,4	23,88	0,00010825
67,46	1,655	0,8	24,28	0,00018775
102,98	2,525	1	24,48	0,000236675
142,43	3,4925	1,2	24,68	0,000349025
177,1	4,6025	1,4	24,88	0,0003922
235,17	5,765	1,8	25,28	0,00058905
267,96	6,57	2	25,48	0,000691875
297,34	7,565	2,2	25,68	0,00082225
339,69	8,3275	2,4	25,88	0,0008518
372,14	9,1225	2,6	26,08	0,00092135
403,05	9,8825	2,8	26,28	0,00105815
425,6	10,435	3	26,48	0,001064025
456,34	11,1875	3,2	26,68	0,001103725
486,74	11,9325	3,4	26,88	0,001153925
517,31	12,96	3,6	27,08	0,001146925
559,49	13,7175	3,8	27,28	0,00117595
593,31	14,545	4	27,48	0,00122425
603,04	14,785	4,2	27,68	0,001318925
636,69	15,61	4,4	27,88	0,0013723
667,08	16,6725	4,6	28,08	0,001457575
710,29	17,415	4,8	28,28	0,001609925
742,57	18,205	5	28,48	0,00177935
784,24	19,545	5,4	28,88	0,0019054
829,33	20,3325	5,6	29,08	0,002073075
861,44	21,12	5,8	29,28	0,002286075
891,84	21,865	6	29,48	0,0023229
923,94	22,6525	6,2	29,68	0,002371
976,72	23,945	6,6	30,08	0,00252715
1007,12	24,69	6,8	30,28	0,002623775
1037,52	25,4375	7	30,48	0,002635475
1074,24	26,3375	7,2	30,68	0,002632525
1104,64	27,0825	7,4	30,88	0,00264505
1158,94	28,4125	7,8	31,28	0,002728575
1190,71	29,1925	8	31,48	0,00269205
1220,94	30,205	8,2	31,68	0,002723225
1262,27	30,9475	8,4	31,88	0,0028268

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

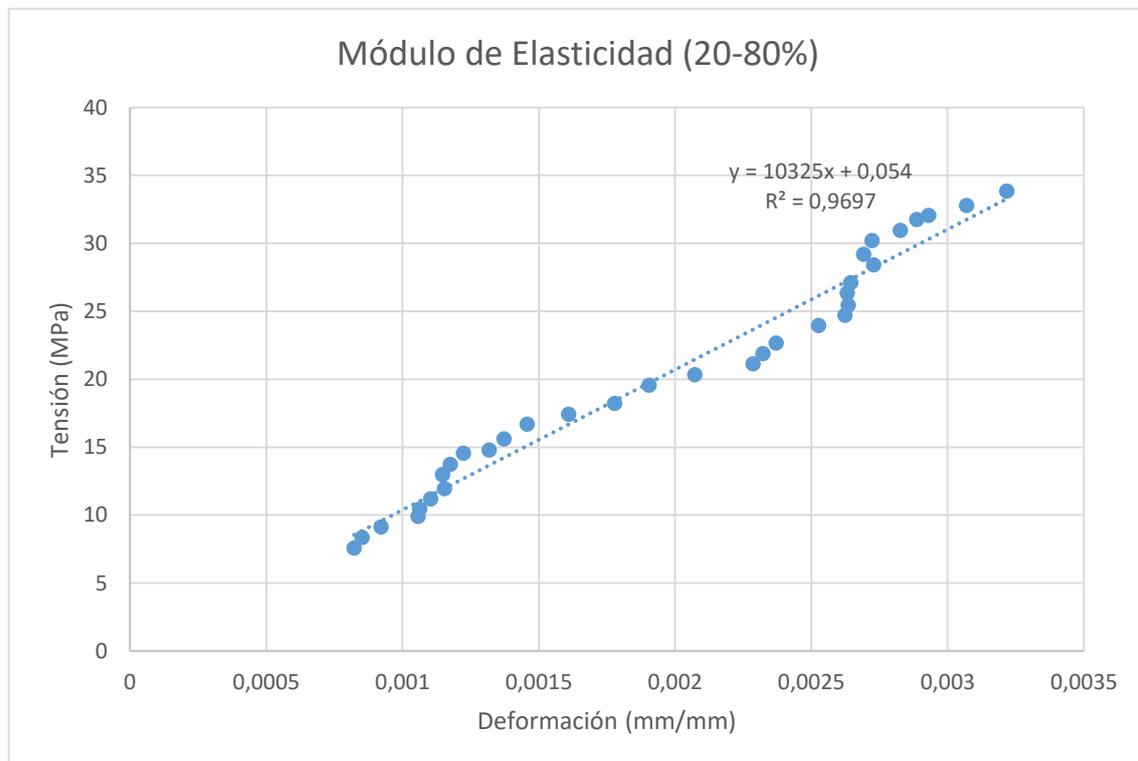
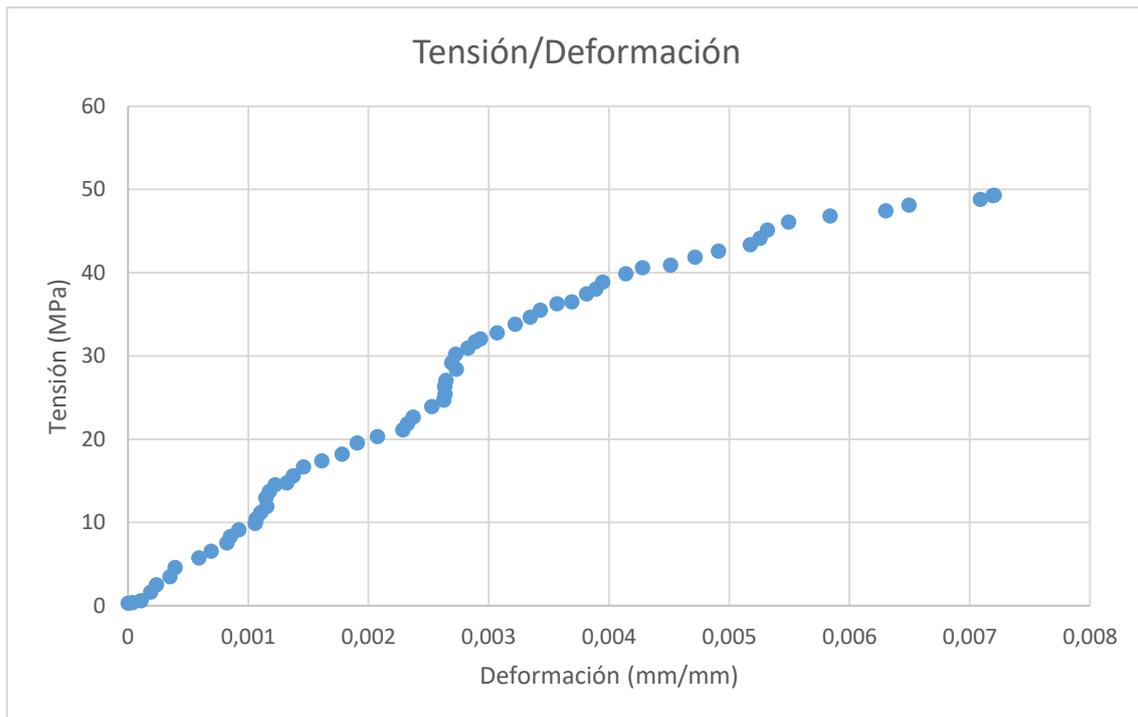
1294,38	31,735	8,6	32,08	0,002887825
1307,19	32,0475	8,8	32,28	0,0029305
1337,41	32,79	9	32,48	0,003070425
1370,89	33,845	9,2	32,68	0,0032183
1404,02	34,6525	9,4	32,88	0,003345725
1437,15	35,5075	9,6	33,08	0,003426525
1467,38	36,28	9,8	33,28	0,0035667
1489,24	36,51	10	33,48	0,003690125
1519,3	37,4775	10,2	33,68	0,003811625
1552,26	38,055	10,4	33,88	0,0038904
1586,76	38,9025	10,6	34,08	0,003945425
1618,01	39,8975	10,8	34,28	0,0041381
1657,12	40,6275	11	34,48	0,00427835
1669,59	40,9325	11,2	34,68	0,00451015
1698,97	41,875	11,4	34,88	0,0047139
1737,39	42,595	11,6	35,08	0,004910725
1769,33	43,3775	11,8	35,28	0,0051743
1800,92	44,1525	12	35,48	0,005254225
1841,06	45,1375	12,4	35,88	0,005317725
1871,63	46,095	12,6	36,08	0,0054939
1901,17	46,8125	12,8	36,28	0,005836875
1934,99	47,44	13	36,48	0,006302225
1953,95	48,1125	13,2	36,68	0,00649425
1991,52	48,825	13,6	37,08	0,007086425
2007,57	49,2975	13,8	37,28	0,00719065
2010,99	49,3025	14	37,48	0,00720235
1971,54	48,335	14,2	37,68	0,006776825
1846,69	45,275	14,4	37,88	0,006271425
1736,88	42,5825	14,8	38,28	0,006792875
1748,32	42,8625	15	38,48	0,006910925
1765,57	43,4075	15,2	38,68	0,007373775
1787,6	43,825	15,4	38,88	0,0077045
1802,29	44,185	15,6	39,08	0,00807895
1805,36	44,2625	15,8	39,28	0,00856785
1808,95	44,35	16	39,48	0,0091661
1808,27	44,3325	16,2	39,68	0,0096263
1801,95	44,1775	16,4	39,88	0,0100291
1791,53	43,9225	16,6	40,08	0,010407975
1778,04	43,5925	16,8	40,28	0,011070525
1767,28	43,3275	17	40,48	0,011852625
1743,71	42,75	17,2	40,68	0,012783525
1717,24	42,1	17,4	40,88	0,012945475
1635,43	40,095	17,8	41,28	0,0167768

## DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

---

1591,88	39,0275	18	41,48	0,014509775
1580,27	38,47	18,2	41,68	0,191390575
1536,04	37,6575	18,4	41,88	0,199180375
1494,19	36,6325	18,6	42,08	0,206935725

Tensión de rotura (MPa)	49,3475
Módulo de Elasticidad (MPa)	10325



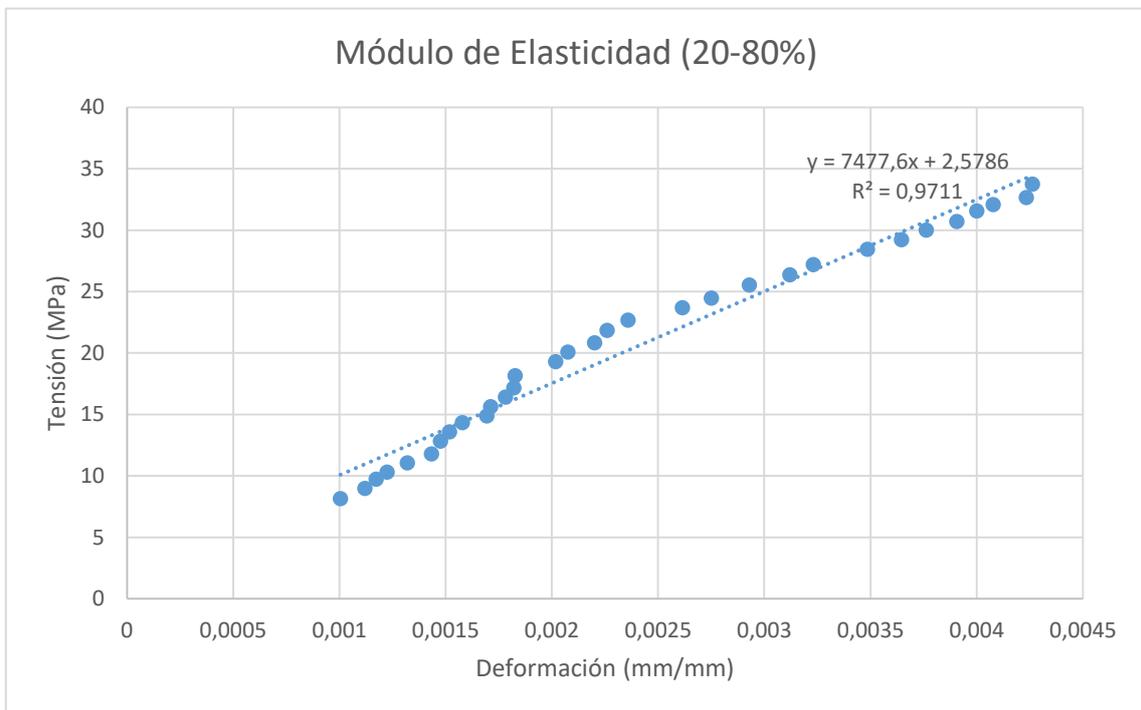
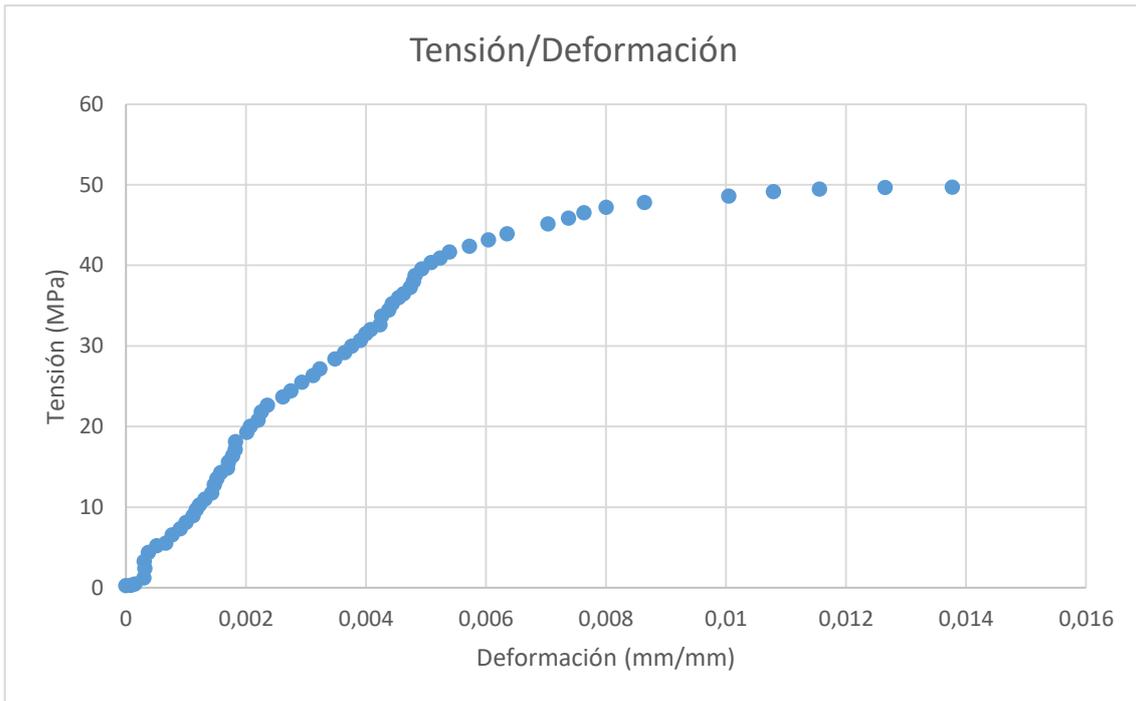
DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo A10		Duración (s)	15,3	
		Inicio (s)	26,92	
		Fin (s)	42,22	
Carga (kgf)	Tensión (MPa)	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
11,61	0,285	0	26,92	0
12,98	0,3175	0,2	27,12	0,000086825
17,08	0,4975	0,4	27,32	0,0001519
50,04	1,2275	0,8	27,72	0,000298525
85,9	2,4125	1	27,92	0,000315975
135,09	3,3125	1,2	28,12	0,000304525
169,42	4,4175	1,4	28,32	0,000374825
213,14	5,225	1,6	28,52	0,000516975
226,8	5,56	1,8	28,72	0,000664425
258,4	6,5725	2	28,92	0,0007725
299,56	7,345	2,2	29,12	0,0009084
332,01	8,14	2,4	29,32	0,001004925
365,99	8,9725	2,6	29,52	0,001119375
396,73	9,7275	2,8	29,72	0,0011724
419,62	10,2875	3	29,92	0,001225125
450,19	11,0375	3,2	30,12	0,0013192
480,59	11,7825	3,4	30,32	0,001434
513,04	12,8175	3,6	30,52	0,001476575
553,51	13,57	3,8	30,72	0,001518175
584,08	14,32	4	30,92	0,00157935
593,65	14,8675	4,2	31,12	0,00169465
636,86	15,6125	4,4	31,32	0,0017117
668,79	16,3975	4,6	31,52	0,001781
699,53	17,15	4,8	31,72	0,001821475
730,1	18,135	5	31,92	0,00182675
786,29	19,2775	5,4	32,32	0,002017875
818,4	20,065	5,6	32,52	0,00207585
848,97	20,815	5,8	32,72	0,0022017
881,08	21,835	6	32,92	0,0022598
914,55	22,66	6,2	33,12	0,002358325
965,96	23,6825	6,6	33,52	0,002614125
997,89	24,465	6,8	33,72	0,00275035
1030	25,5275	7	33,92	0,0029301
1063,65	26,35	7,2	34,12	0,003120175
1098,66	27,17	7,4	34,32	0,003231325
1147,84	28,4175	7,8	34,72	0,003486275
1191,05	29,2	8	34,92	0,003646625
1222,99	29,9825	8,2	35,12	0,0037621

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

1251,85	30,69	8,4	35,32	0,003906725
1286,86	31,55	8,6	35,52	0,00400075
1298,13	32,055	8,8	35,72	0,004077925
1331,44	32,6425	9	35,92	0,004234125
1364,57	33,735	9,2	36,12	0,004262825
1406,07	34,4725	9,4	36,32	0,004379725
1437,84	35,25	9,6	36,52	0,00444085
1469,43	36,025	9,8	36,72	0,00454595
1488,05	36,4825	10	36,92	0,0046279
1521,35	37,2975	10,2	37,12	0,00474025
1551,24	38,03	10,4	37,32	0,00479235
1580,95	38,76	10,6	37,52	0,004819575
1613,74	39,5625	10,8	37,72	0,004934925
1646,53	40,3675	11	37,92	0,0050907
1659	40,9375	11,2	38,12	0,0052404
1700,5	41,69	11,4	38,32	0,005394625
1729,54	42,4025	11,6	38,52	0,005726075
1761,3	43,18	11,8	38,72	0,006044475
1792,56	43,9475	12	38,92	0,0063558
1833,37	45,165	12,4	39,32	0,007034425
1863,6	45,895	12,6	39,52	0,0073798
1898,1	46,535	12,8	39,72	0,007634
1925,6	47,21	13	39,92	0,0080047
1951,21	47,8375	13,2	40,12	0,008643625
1982,81	48,6125	13,6	40,52	0,010047975
1999,89	49,1475	13,8	40,72	0,01079085
2017,65	49,465	14	40,92	0,0115612
2026,02	49,67	14,2	41,12	0,012655775
2028,07	49,7225	14,4	41,32	0,013776825
2017,48	49,4625	14,8	41,72	0,01560415
1956,34	47,9625	15	41,92	0,014663425
1612,55	39,535	15,2	42,12	0,014800525

Tensión de rotura (MPa)	49,7225
Módulo de Elasticidad (MPa)	7477,6



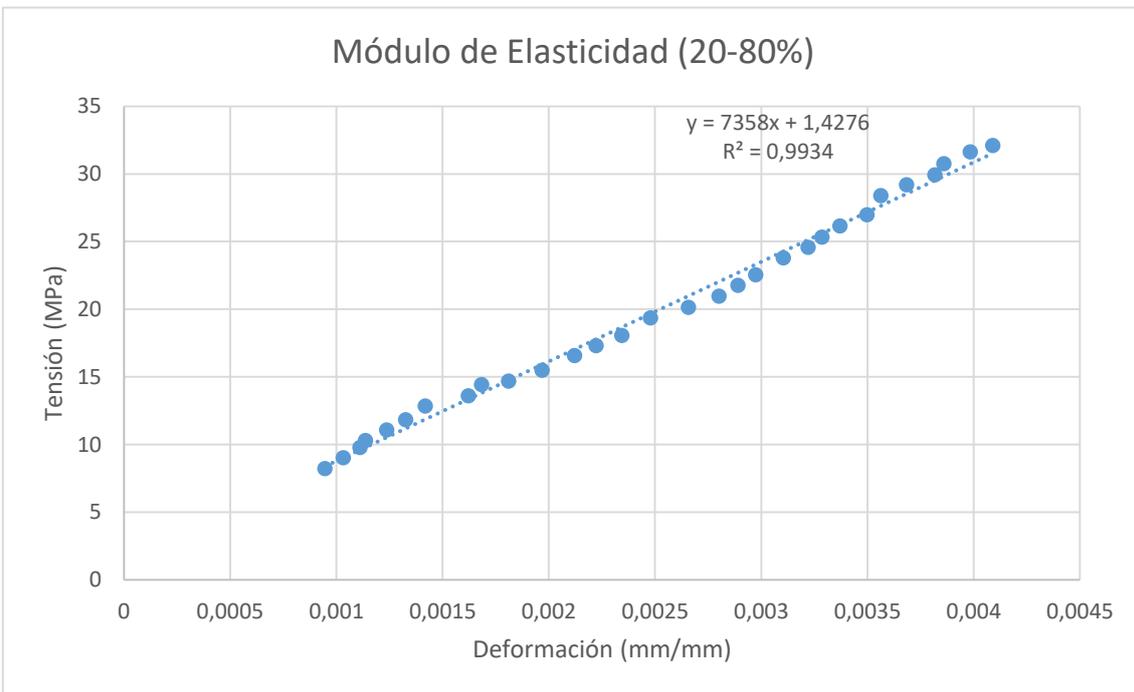
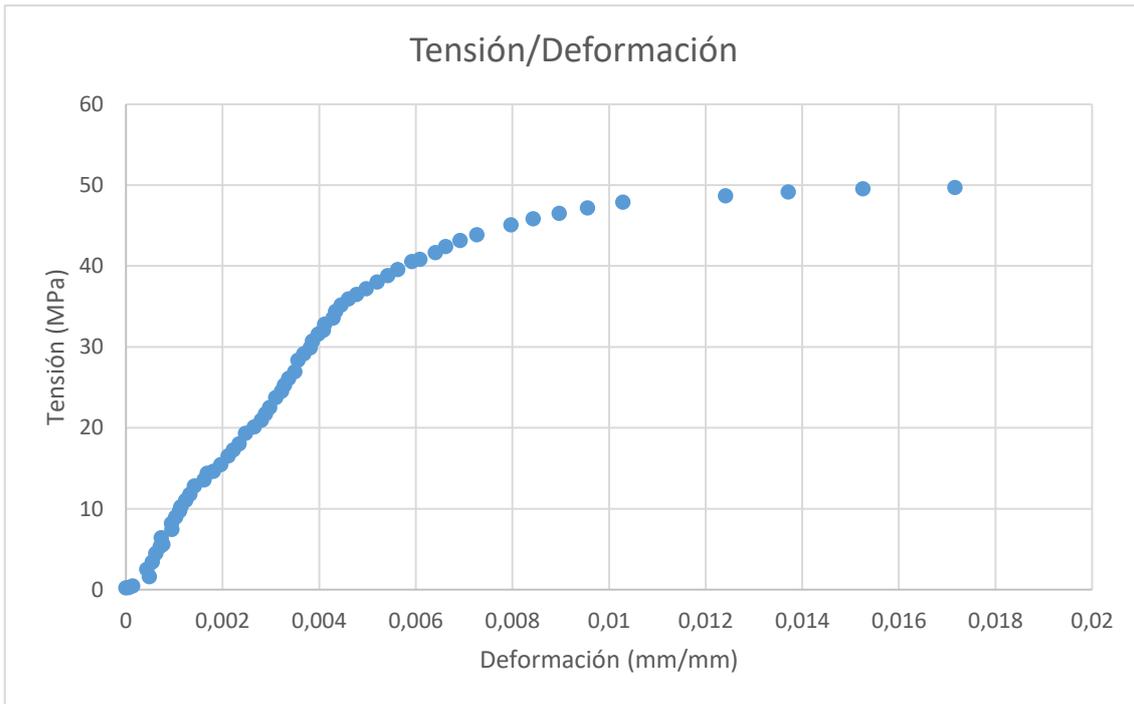
**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

<b>Ensayo B1</b>		Duración (s)	19,1	
		Inicio (s)	16,16	
		Fin (s)	35,26	
<b>Carga (kgf)</b>	<b>Tensión (MPa)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Tiempo video</b>	<b>Deformación (mm/mm)</b>
9,73	0,2375	0	16,16	0
11,1	0,2725	0,2	16,36	0,0000618
19,98	0,49	0,4	16,56	0,00014255
65,92	1,615	0,8	16,96	0,000488475
103,32	2,5325	1	17,16	0,000431925
140,56	3,445	1,2	17,36	0,000544
173,69	4,51	1,4	17,56	0,000621975
209,21	5,3725	1,6	17,76	0,000710375
229,02	5,615	1,8	17,96	0,0007639
263,18	6,4525	2	18,16	0,00072975
292,72	7,4525	2,2	18,36	0,0009531
334,91	8,21	2,4	18,56	0,0009457
367,53	9,01	2,6	18,76	0,001031625
398,27	9,765	2,8	18,96	0,0011099
419,28	10,28	3	19,16	0,001136125
451,38	11,0675	3,2	19,36	0,00123655
481,95	11,815	3,4	19,56	0,001325225
514,4	12,845	3,6	19,76	0,001418625
554,71	13,6	3,8	19,96	0,0016202
588,52	14,4275	4	20,16	0,001683075
598,26	14,6675	4,2	20,36	0,001810125
631,73	15,4875	4,4	20,56	0,00196765
662,13	16,5525	4,6	20,76	0,0021199
705,51	17,2975	4,8	20,96	0,002222725
736,25	18,05	5	21,16	0,002343275
789,03	19,345	5,4	21,56	0,002477775
821,13	20,1325	5,6	21,76	0,002656425
854,95	20,96	5,8	21,96	0,002801175
886,88	21,7425	6	22,16	0,002889325
918,99	22,53	6,2	22,36	0,002973875
970,06	23,7825	6,6	22,76	0,0031037
1001,82	24,5625	6,8	22,96	0,0032209
1032,56	25,315	7	23,16	0,0032859
1066,04	26,135	7,2	23,36	0,00337035
1099,51	26,9575	7,4	23,56	0,003496875
1157,24	28,3725	7,8	23,96	0,003562975
1190,54	29,1875	8	24,16	0,003683075
1220,6	29,925	8,2	24,36	0,00381685

DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

1254,41	30,755	8,4	24,56	0,0038598
1289,42	31,6125	8,6	24,76	0,003983275
1298,82	32,0775	8,8	24,96	0,00409005
1340,15	32,855	9	25,16	0,0041161
1370,38	33,5975	9,2	25,36	0,0042904
1403,68	34,4125	9,4	25,56	0,004341975
1436,81	35,225	9,6	25,76	0,00445855
1466,87	35,9625	9,8	25,96	0,004609525
1488,9	36,5025	10	26,16	0,004771875
1518,79	37,235	10,2	26,36	0,004976575
1551,75	38,0425	10,4	26,56	0,005203975
1584,54	38,8475	10,6	26,76	0,00542235
1614,26	39,575	10,8	26,96	0,0056248
1645,51	40,565	11	27,16	0,00591805
1665,49	40,8325	11,2	27,36	0,0060846
1699,48	41,665	11,4	27,56	0,006407325
1730,05	42,415	11,6	27,76	0,006622025
1761,64	43,19	11,8	27,96	0,006917625
1790,16	43,89	12	28,16	0,00726575
1840,38	45,12	12,4	28,56	0,00797045
1870,26	45,8525	12,6	28,76	0,00843435
1898,1	46,535	12,8	28,96	0,008971025
1924,57	47,185	13	29,16	0,009558825
1953,61	47,895	13,2	29,36	0,01029215
1985,54	48,68	13,6	29,76	0,012415775
2006,04	49,18	13,8	29,96	0,013713575
2021,58	49,5625	14	30,16	0,015256575
2028,41	49,735	14,2	30,36	0,017163575
2023,97	49,5075	14,4	30,56	0,019325775
1961,97	48,1	14,8	30,96	0,0232521
1817,15	42,8875	15	31,16	0,02342805
1594,27	38,145	15,2	31,36	0,022306125
1516,23	37,1725	15,4	31,56	-0,00625625
1534,33	37,6175	15,6	31,76	-0,005683575
1544,75	37,8725	15,8	31,96	-0,00520435
1578,05	38,6875	16	32,16	-0,004868275
1620,23	39,7225	16,2	32,36	-0,0046213
1640,39	40,3175	16,4	32,56	-0,00446685
1651,32	40,5475	16,6	31,76	-0,005683575
1657,98	40,6475	16,8	32,96	-0,00423565

Tensión de rotura (MPa)	49,735
Módulo de Elasticidad (MPa)	7358



DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo B2		Duración (s)	19,4	
		Inicio (s)	15,88	
		Fin (s)	35,28	
Carga (kgf)	Tensión (MPa)	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
10,25	0,25	0	15,88	0
11,61	0,2975	0,2	16,08	0,00008075
19,47	0,4775	0,4	16,28	0,0001271
62,34	1,5275	0,8	16,68	0,000188375
103,67	2,5425	1	16,88	0,00027925
140,38	3,4425	1,2	17,08	0,0003323
182,4	4,4725	1,4	17,28	0,000338925
213,99	5,2475	1,6	17,48	0,0004021
233,8	5,7325	1,8	17,68	0,000432625
266,42	6,5325	2	17,88	0,000432925
297,68	7,2975	2,2	18,08	0,000419475
328,59	8,055	2,4	18,28	0,0004311
361,04	9,1325	2,6	18,48	0,000438775
395,02	9,96	2,8	18,68	0,000436725
416,03	10,2	3	18,88	0,0004159
446,6	11,1875	3,2	19,08	0,00039235
488,61	11,98	3,4	19,28	0,0004218
519,19	12,7275	3,6	19,48	0,000402075
551,29	13,515	3,8	19,68	0,000417075
583,57	14,3075	4	19,88	0,00041105
606,11	14,86	4,2	20,08	0,00046275
636,69	15,61	4,4	20,28	0,0004983
670,33	16,435	4,6	20,48	0,00044985
702,61	17,225	4,8	20,68	0,0005424
733,18	18,2475	5	20,88	0,00060455
787,66	19,31	5,4	21,28	0,000643325
821,64	20,145	5,6	21,48	0,0006529
852,04	20,89	5,8	21,68	0,000682625
888,93	21,7925	6	21,88	0,000753425
919,33	22,54	6,2	22,08	0,000797125
972,28	23,8375	6,6	22,48	0,000985625
1007,63	24,7025	6,8	22,68	0,0010658
1039,74	25,49	7	22,88	0,001164775
1073,21	26,3125	7,2	23,08	0,001246075
1106,68	27,1325	7,4	23,28	0,001266525
1151,6	28,4675	7,8	23,68	0,001404075
1191,39	29,21	8	23,88	0,001444975
1225,04	30,035	8,2	24,08	0,001463175

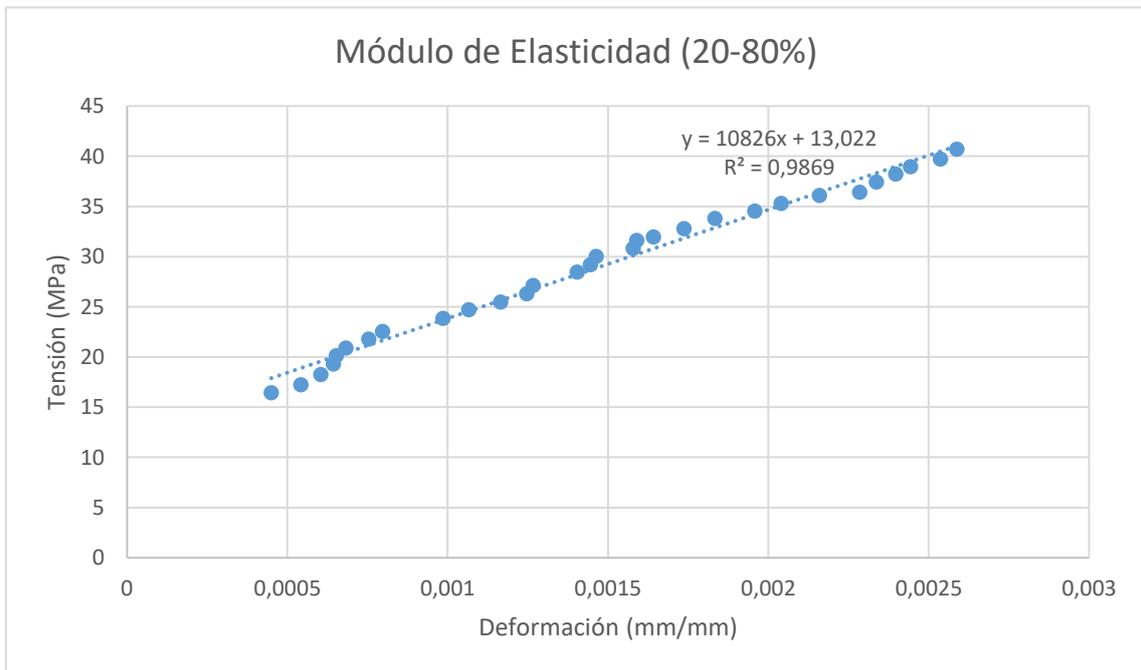
**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

1257,32	30,825	8,4	24,28	0,00157895
1289,25	31,6075	8,6	24,48	0,00158975
1303,6	31,96	8,8	24,68	0,00164225
1337,07	32,78	9	24,88	0,00173705
1369,01	33,7975	9,2	25,08	0,00183335
1408,97	34,5425	9,4	25,28	0,001957825
1439,54	35,2925	9,6	25,48	0,00203965
1472,85	36,11	9,8	25,68	0,002159125
1485,48	36,42	10	25,88	0,002284475
1515,71	37,4325	10,2	26,08	0,00233675
1558,92	38,22	10,4	26,28	0,00239745
1589,15	38,96	10,6	26,48	0,002443825
1620,75	39,735	10,8	26,68	0,0025368
1651,32	40,715	11	26,88	0,00258755
1673,52	41,03	11,2	27,08	0,002599575
1705,11	41,8025	11,4	27,28	0,00269845
1736,88	42,5825	11,6	27,48	0,00275555
1770,18	43,4	11,8	27,68	0,002782475
1803,66	44,22	12	27,88	0,002800375
1852,5	45,4175	12,4	28,28	0,00287475
1885,63	46,23	12,6	28,48	0,002940025
1915,69	46,9675	12,8	28,68	0,002957325
1950,19	47,8125	13	28,88	0,00299395
1982,98	48,615	13,2	29,08	0,003042575
2034,22	49,8725	13,6	29,48	0,0031519
2063,76	50,5975	13,8	29,68	0,003262
2096,21	51,3925	14	29,88	0,00338715
2126,78	52,1425	14,2	30,08	0,003618475
2158,38	52,915	14,4	30,28	0,003777775
2206,2	54,0875	14,8	30,68	0,0041712
2235,4	55,0525	15	30,88	0,00432025
2265,46	55,5425	15,2	31,08	0,00455535
2291,76	56,445	15,4	31,28	0,00491145
2319,08	57,07	15,6	31,48	0,005291225
2334,97	57,245	15,8	31,68	0,0056227
2358,19	57,815	16	31,88	0,005882375
2374,59	58,2175	16,2	32,08	0,0061814
2375,1	58,05	16,4	32,28	0,006747
2308,33	56,5925	16,6	32,48	0,0072706
2215,08	54,305	16,8	32,68	0,00739395
2180,75	53,465	17	32,88	0,0073846
2140,27	52,4725	17,2	33,08	0,00757375
2144,03	52,565	17,4	33,28	0,00786925

DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

2154,62	52,825	17,6	33,48	0,007816
2156,84	52,8775	17,8	33,68	0,007844975
2145,57	52,6025	18	33,88	0,00797135
2138,22	52,4225	18,2	34,08	0,00824355
2127,12	52,15	18,4	34,28	0,00823285
2099,46	51,4725	18,6	34,48	0,007973275
2027,9	49,7175	18,8	34,68	0,0079113
1899,81	46,5775	19	34,88	0,007629325
1785,38	43,7725	19,2	35,08	0,006710825
1759,77	43,1425	19,4	35,28	0,005485825

Tensión de rotura (MPa)	58,285
Módulo de Elasticidad (MPa)	10826



DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo B3		Duración (s)	22,4	
		Inicio (s)	22,24	
		Fin (s)	44,64	
Carga (kgf)	Tensión (MPa)	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
13,49	0,33	0	22,24	0
16,05	0,3925	0,2	22,44	0,0000636
22,37	0,675	0,4	22,64	0,000198225
73,61	1,805	0,8	23,04	0,00014305
111,01	2,7225	1	23,24	0,00014145
144,65	3,5475	1,2	23,44	0,000132325
178,64	4,38	1,4	23,64	0,00026815
210,41	5,44	1,6	23,84	0,000399825
231,58	5,6775	1,8	24,04	0,00036935
262,84	6,725	2	24,24	0,000236075
305,36	7,4875	2,2	24,44	0,000358475
336,45	8,2475	2,4	24,64	0,000280975
369,24	9,0525	2,6	24,84	0,000215825
396,73	10,045	2,8	25,04	0,0002847
419,62	10,2875	3	25,24	0,000209575
450,19	11,28	3,2	25,44	0,00018765
635,66	15,8225	4,4	26,64	0,000442675
676,14	16,5775	4,6	26,84	0,000338325
708,07	17,36	4,8	27,04	0,000519
738,47	18,105	5	27,24	0,00079685
791,59	19,4075	5,4	27,64	0,001424075
825,57	20,24	5,6	27,84	0,00150265
856,14	20,99	5,8	28,04	0,00152275
886,54	21,97	6	28,24	0,001730725
928,04	22,7525	6,2	28,44	0,0018659
971,25	24,0475	6,6	28,84	0,001977
1011,22	24,7925	6,8	29,04	0,0020436
1041,96	25,545	7	29,24	0,002137575
1074,06	26,3325	7,2	29,44	0,00207615
1107,71	27,1575	7,4	29,64	0,002077375
1159,12	28,4175	7,8	30,04	0,002082775
1190,88	29,1975	8	30,24	0,0019936
1221,11	30,1725	8,2	30,44	0,0020485
1262,95	30,9625	8,4	30,64	0,0020033
1293,52	31,7125	8,6	30,84	0,002115725
1303,09	32,215	8,8	31,04	0,0020456
1346,12	33,0025	9	31,24	0,002124775
1380,11	33,835	9,2	31,44	0,002160925

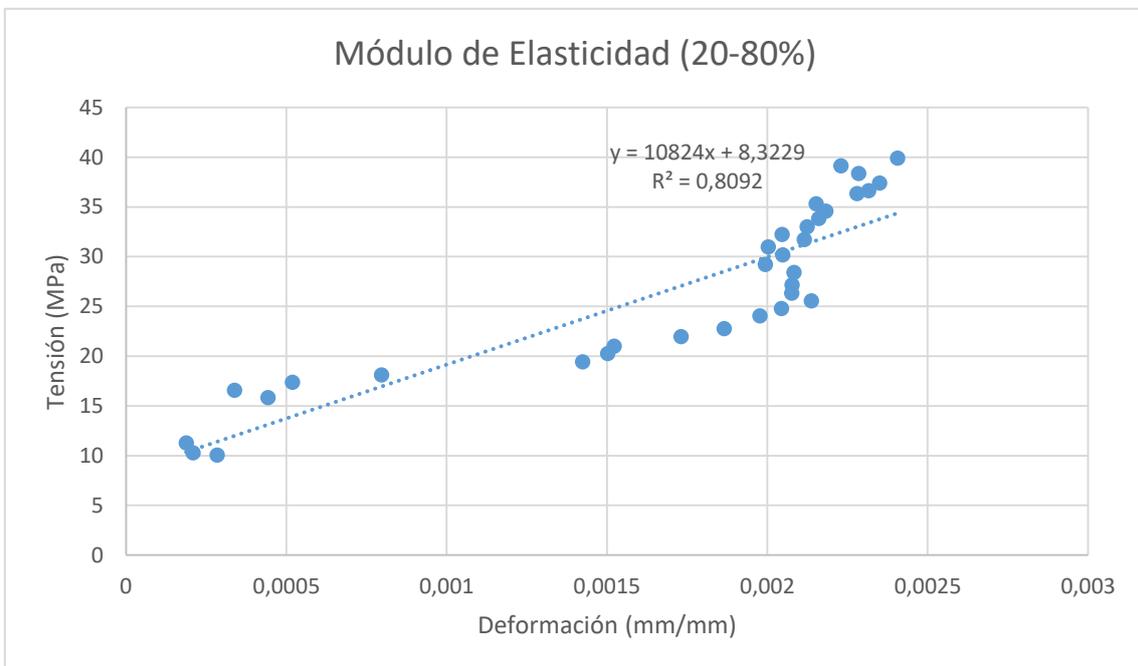
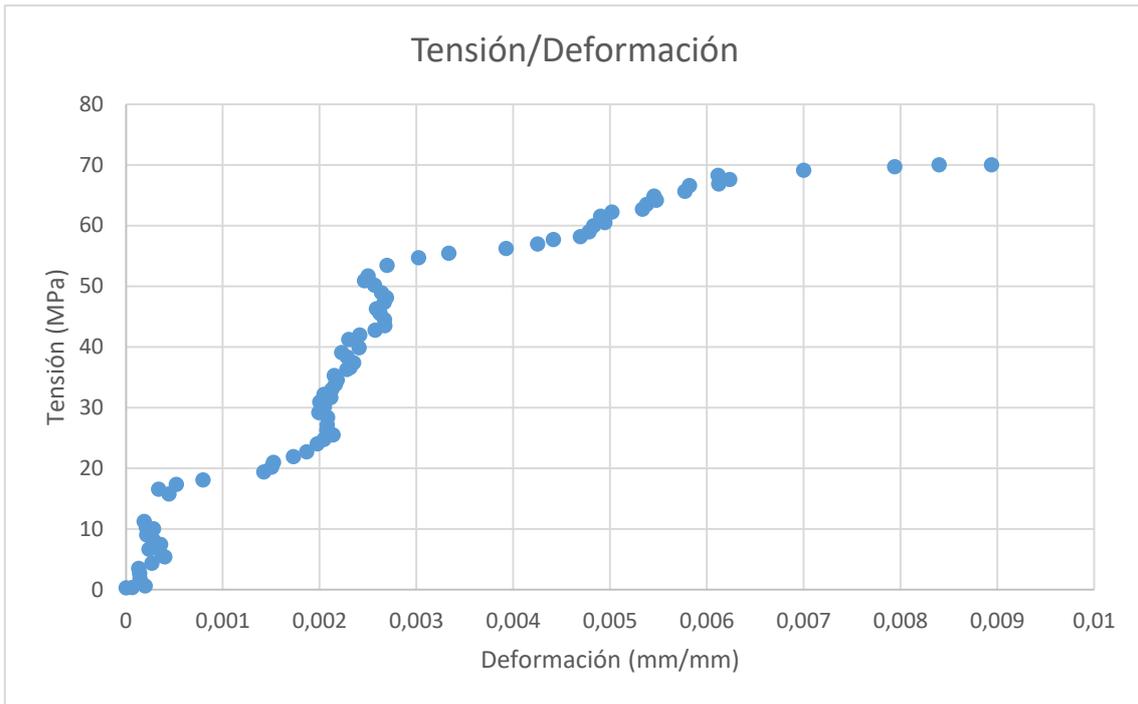
**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

1410,34	34,5775	9,4	31,64	0,002182475
1440,57	35,3175	9,6	31,84	0,0021527
1472,68	36,34	9,8	32,04	0,0022798
1493,34	36,6125	10	32,24	0,002315875
1525,45	37,4	10,2	32,44	0,002349625
1555,51	38,37	10,4	32,64	0,00228485
1595,64	39,12	10,6	32,84	0,00222935
1627,58	39,9025	10,8	33,04	0,00240615
1670,62	41,235	11,2	33,44	0,00230185
1712,46	41,9825	11,4	33,64	0,00241385
1744,39	42,7675	11,6	33,84	0,002572025
1774,79	43,5125	11,8	34,04	0,002672425
1806,56	44,53	12	34,24	0,0026698
1857,8	45,5475	12,4	34,64	0,002622325
1889,73	46,33	12,6	34,84	0,002588175
1920,13	47,385	12,8	35,04	0,002666075
1963,17	48,13	13	35,24	0,002690525
1996,98	48,96	13,2	35,44	0,002640125
2047,54	50,1975	13,6	35,84	0,002567175
2077,94	50,945	13,8	36,04	0,002462275
2109,7	51,7225	14	36,24	0,0024997
2169,99	53,4725	14,4	36,64	0,002695775
2222,42	54,7175	14,8	37,04	0,003021125
2262,21	55,4625	15	37,24	0,003334725
2293,81	56,2375	15,2	37,44	0,0039245
2323,7	56,97	15,4	37,64	0,004250625
2355,12	57,74	15,6	37,84	0,0044159
2373,91	58,2	15,8	38,04	0,004692125
2405,5	58,975	16	38,24	0,00478255
2435,56	59,98	16,2	38,44	0,0048283
2468,52	60,52	16,4	38,64	0,004946625
2497,9	61,545	16,6	38,84	0,00490185
2539,74	62,265	16,8	39,04	0,005018125
2548,96	62,7225	17	39,24	0,005334825
2589,44	63,485	17,2	39,44	0,005379825
2618,47	64,195	17,4	39,64	0,005478875
2647,33	64,9025	17,6	39,84	0,0054543
2677,56	65,645	17,8	40,04	0,005772075
2706,08	66,6325	18	40,24	0,005821125
2728,11	66,885	18,2	40,44	0,006121675
2758,51	67,63	18,4	40,64	0,0062351
2785,16	68,2825	18,6	40,84	0,006115175
2811,46	69,1125	18,8	41,04	0,00699955

DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

2836,39	69,6925	19	41,24	0,00794175
2856,54	70,0325	19,2	41,44	0,008941275
2857,23	70,05	19,4	41,64	0,008397825
2791,3	66,575	19,6	41,84	0,00768695
2488,16	59,095	19,8	42,04	-0,007867475
2355,29	57,9625	20	42,24	-0,0072019
2404,65	59,3525	20,2	42,44	-0,006849325
2475,69	60,695	20,6	42,84	-0,005994225
2496,53	61,2075	20,8	43,04	-0,0055819
2497,73	61,235	21	43,24	-0,00507635
2470,4	60,565	21,2	43,44	-0,00471835
2438,29	59,7775	21,4	43,64	-0,0043566
2387,06	58,5225	21,8	44,04	-0,003662075
2326,09	57,0275	22	44,24	-0,0032825
2243,09	54,9925	22,2	44,44	-0,00255865
2138,39	52,425	22,4	44,64	-0,001538725

Tensión de rotura (MPa)	70,05
Módulo de Elasticidad (MPa)	10824



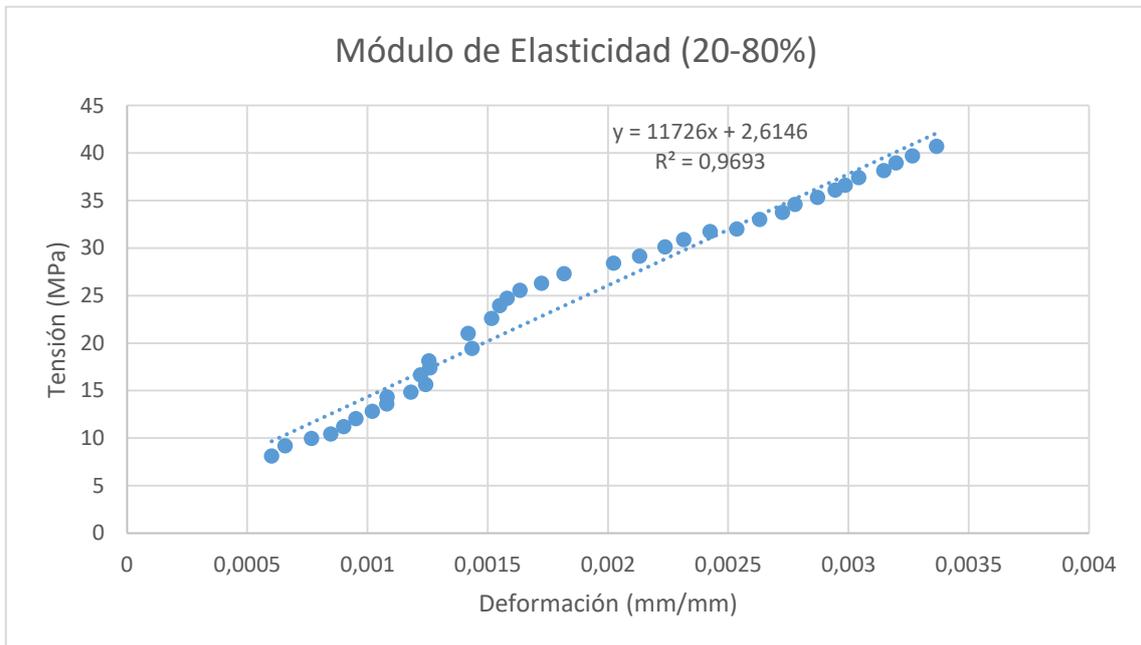
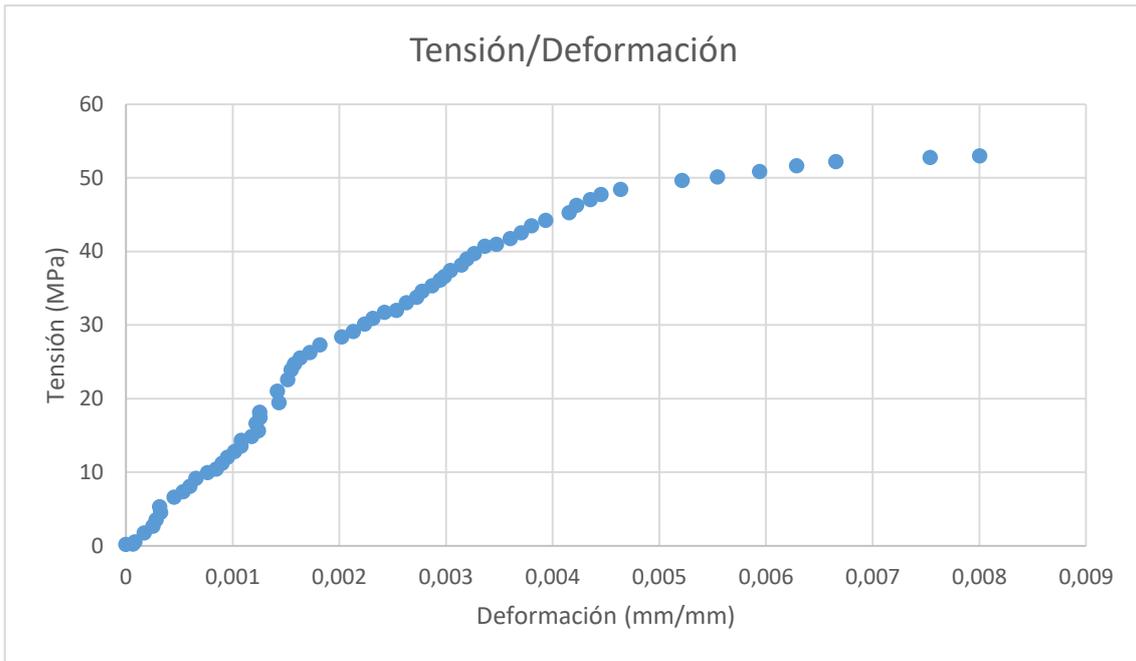
DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo B4		Duración (s)	16,2	
		Inicio (s)	13,88	
		Fin (s)	30,08	
Carga (kgf)	Tensión (MPa)	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
9,05	0,2225	0	13,88	0
10,76	0,265	0,2	14,08	0,0000675
18,1	0,5775	0,4	14,28	0,0000856
73,1	1,7925	0,8	14,68	0,000173225
110,33	2,705	1	14,88	0,000254175
144,14	3,535	1,2	15,08	0,00028255
186,33	4,5675	1,4	15,28	0,0003248
217,41	5,33	1,6	15,48	0,0003176
269,84	6,615	2	15,88	0,000452625
300,58	7,37	2,2	16,08	0,0005362
331,32	8,1225	2,4	16,28	0,000601425
363,6	9,195	2,6	16,48	0,000657725
407,49	9,99	2,8	16,68	0,000767425
415,69	10,43	3	16,88	0,0008472
457,53	11,2175	3,2	17,08	0,000900875
491,52	12,05	3,4	17,28	0,000951675
523,63	12,8375	3,6	17,48	0,0010195
554,2	13,5875	3,8	17,68	0,00108005
584,77	14,3375	4	17,88	0,001082125
605,77	14,8525	4,2	18,08	0,001180375
637,88	15,6375	4,4	18,28	0,001242175
668,28	16,665	4,6	18,48	0,00122105
710,12	17,41	4,8	18,68	0,001259
740,35	18,15	5	18,88	0,0012552
793,81	19,4625	5,4	19,28	0,001434075
857,85	21,0325	5,8	19,68	0,001418975
921,9	22,6025	6,2	20,08	0,001516225
976,38	23,9375	6,6	20,48	0,001550275
1008,48	24,725	6,8	20,68	0,001580125
1042,13	25,55	7	20,88	0,001633925
1072,7	26,3	7,2	21,08	0,0017242
1102,93	27,3125	7,4	21,28	0,001817325
1158,6	28,405	7,8	21,68	0,002022875
1189,17	29,155	8	21,88	0,002131025
1221,11	30,135	8,2	22,08	0,00223785
1260,9	30,9125	8,4	22,28	0,002314725
1294,55	31,7375	8,6	22,48	0,0024239
1305,65	32,01	8,8	22,68	0,002535925

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

1337,59	33,0275	9	22,88	0,002630975
1377,38	33,7675	9,2	23,08	0,002724925
1410,85	34,59	9,4	23,28	0,0027782
1440,91	35,3275	9,6	23,48	0,00287065
1472,85	36,11	9,8	23,68	0,002945125
1493,17	36,6075	10	23,88	0,00298575
1526,47	37,425	10,2	24,08	0,0030422
1556,7	38,165	10,4	24,28	0,003147075
1589,83	38,9775	10,6	24,48	0,00319725
1619,55	39,705	10,8	24,68	0,00326535
1651,15	40,71	11	24,88	0,003365875
1671,64	40,9825	11,2	25,08	0,00347355
1703,06	41,7525	11,4	25,28	0,003603925
1736,03	42,5625	11,6	25,48	0,00370545
1765,57	43,515	11,8	25,68	0,003803025
1804,51	44,24	12	25,88	0,003934475
1846,01	45,2575	12,4	26,28	0,004155575
1876,58	46,2675	12,6	26,48	0,004226225
1908,18	47,0425	12,8	26,68	0,004353975
1947,29	47,74	13	26,88	0,004453875
1976,49	48,4575	13,2	27,08	0,00463765
2015,26	49,645	13,6	27,48	0,005215975
2045,49	50,1475	13,8	27,68	0,005546125
2074,69	50,865	14	27,88	0,005942025
2098,43	51,6525	14,2	28,08	0,0062898
2123,19	52,205	14,4	28,28	0,006654875
2153,08	52,7875	14,8	28,68	0,007540025
2162,13	53,0075	15	28,88	0,008004625
2161,11	52,9825	15,2	29,08	0,0089964
2147,28	52,645	15,4	29,28	0,00995225
2111,41	51,765	15,6	29,48	0,01112845
2062,91	50,575	15,8	29,68	0,0123502
1857,28	45,535	16	29,88	0,0121838
1595,47	39,115	16,2	30,08	0,010895425

Tensión de rotura (MPa)	53,03
Módulo de Elasticidad (MPa)	11726



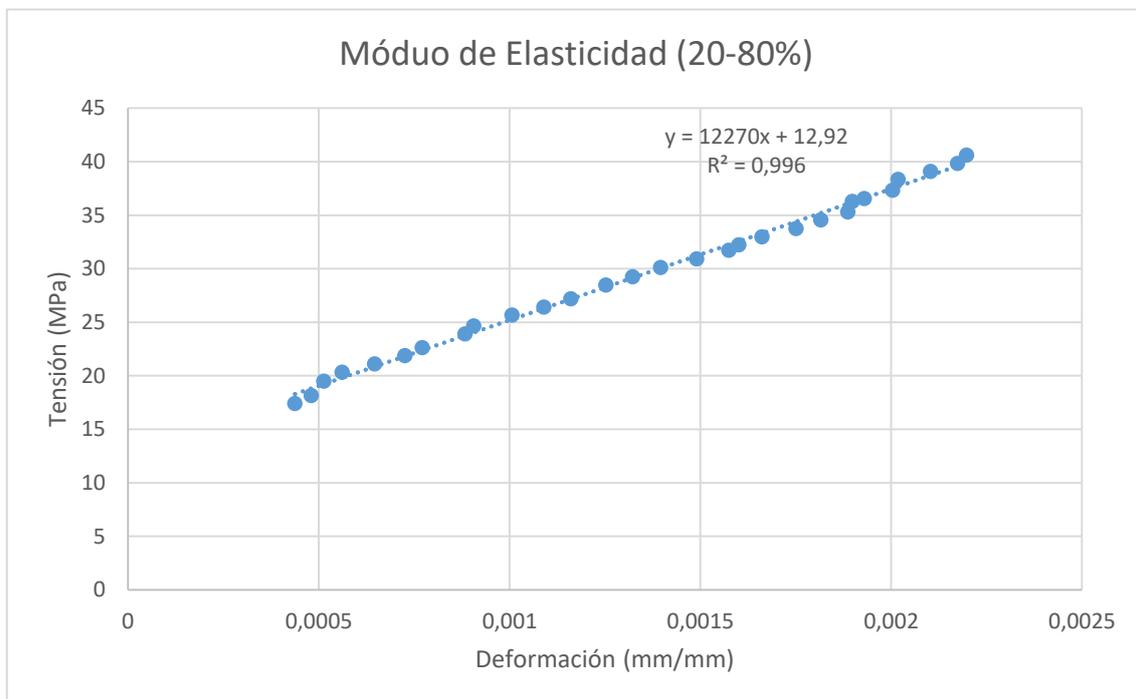
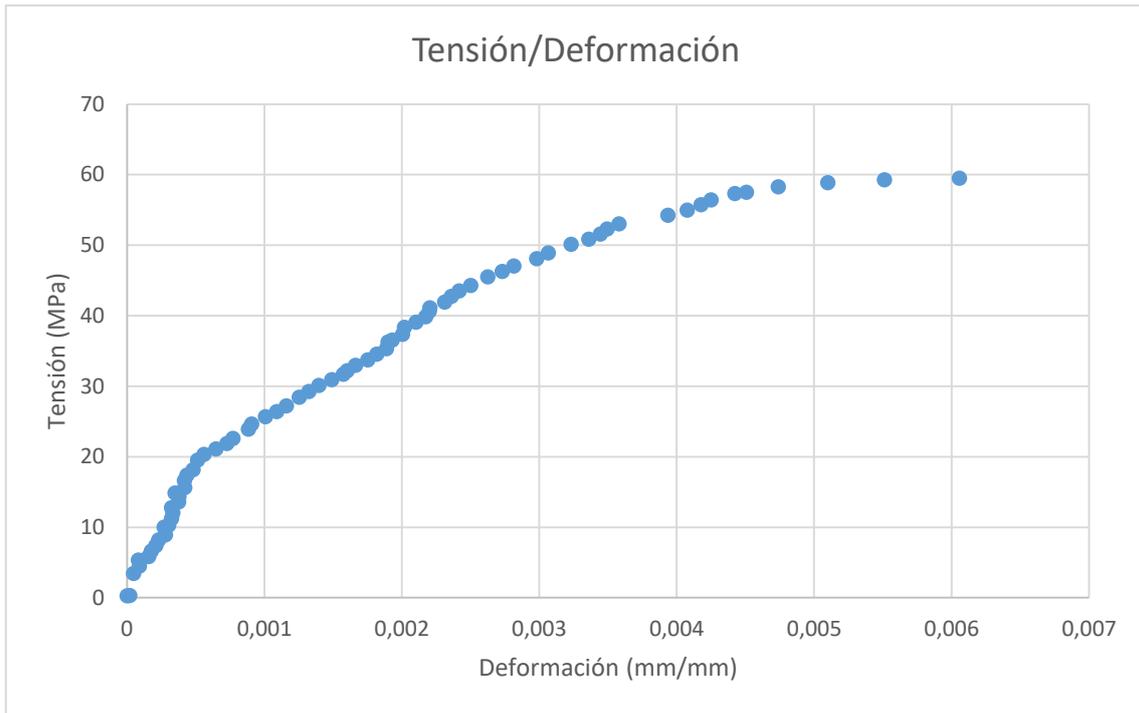
**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

<b>Ensayo B5</b>		Duración (s)	18,5	
		Inicio (s)	19,28	
		Fin (s)	37,78	
<b>Carga (kgf)</b>	<b>Tensión (MPa)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Tiempo video</b>	<b>Deformación (mm/mm)</b>
11,1	0,2725	0	19,28	0
12,98	0,335	0,2	19,48	0,000019275
140,73	3,45	1,2	20,48	4,6775E-05
218,43	5,355	1,6	20,88	0,0000829
228,51	5,85	1,8	21,08	0,000156925
270,01	6,62	2	21,28	0,00017585
334,57	8,2025	2,4	21,68	0,000230475
365,48	8,96	2,6	21,88	0,000280225
419,28	10,28	3	22,28	0,000303925
449,85	11,2675	3,2	22,48	0,00032485
491,86	12,0575	3,4	22,68	0,000333175
522,43	12,8075	3,6	22,88	0,000323975
554,71	13,6	3,8	23,08	0,000375875
585,45	14,3525	4	23,28	0,000377975
606,29	14,865	4,2	23,48	0,000349975
638,39	15,65	4,4	23,68	0,000420475
668,79	16,635	4,6	23,88	0,00041765
710,63	17,4225	4,8	24,08	0,000437475
741,03	18,1675	5	24,28	0,000480775
786,29	19,5125	5,4	24,68	0,0005133
820,28	20,34	5,6	24,88	0,000561625
861,78	21,1275	5,8	25,08	0,00064695
892,35	21,8775	6	25,28	0,000726275
922,75	22,6225	6,2	25,48	0,000771475
975,35	23,9125	6,6	25,88	0,0008836
1005,75	24,6575	6,8	26,08	0,000906575
1038,2	25,6825	7	26,28	0,001006725
1077,99	26,4275	7,2	26,48	0,0010904
1110,1	27,215	7,4	26,68	0,00116085
1161,34	28,4725	7,8	27,08	0,001253325
1193,1	29,25	8	27,28	0,00132255
1228,45	30,1175	8,2	27,48	0,0013963
1262,1	30,9425	8,4	27,68	0,001490275
1294,04	31,725	8,6	27,88	0,00157525
1303,43	32,2275	8,8	28,08	0,0016012
1345,1	32,9775	9	28,28	0,001662025
1377,04	33,76	9,2	28,48	0,0017516
1410,34	34,5775	9,4	28,68	0,001816475

DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

1440,74	35,3225	9,6	28,88	0,0018868
1471,31	36,305	9,8	29,08	0,001898925
1491,97	36,5775	10	29,28	0,0019297
1523,74	37,3575	10,2	29,48	0,00200375
1553,97	38,37	10,4	29,68	0,0020188
1595,13	39,1075	10,6	29,88	0,002104025
1625,53	39,8525	10,8	30,08	0,00217435
1657,47	40,635	11	30,28	0,00219835
1678,13	41,1425	11,2	30,48	0,002203975
1711,43	41,9575	11,4	30,68	0,00231265
1744,74	42,775	11,6	30,88	0,0023605
1774,79	43,5125	11,8	31,08	0,00241665
1806,39	44,2875	12	31,28	0,002500575
1857,45	45,5375	12,4	31,68	0,0026249
1889,05	46,3125	12,6	31,88	0,0027297
1918,94	47,045	12,8	32,08	0,002814675
1950,7	48,0925	13	32,28	0,002980175
1983,66	48,905	13,2	32,48	0,003065475
2033,7	50,1275	13,6	32,88	0,003232025
2064,96	50,89	13,8	33,08	0,0033605
2105,09	51,61	14	33,28	0,00344365
2134,3	52,325	14,2	33,48	0,0034928
2163,16	53,0325	14,4	33,68	0,0035804
2213,2	54,26	14,8	34,08	0,00393595
2242,91	54,9875	15	34,28	0,004076175
2302,35	56,445	15,4	34,68	0,00424985
2328,48	57,345	15,6	34,88	0,00442415
2346,92	57,5375	15,8	35,08	0,004507625
2371	58,31	16	35,28	0,004739825
2393,03	58,875	16,2	35,48	0,005099475
2414,9	59,31	16,4	35,68	0,005511825
2427,53	59,515	16,6	35,88	0,006056275
2423,26	59,41	16,8	36,08	0,00652905
2417,12	59,075	17	36,28	0,00730415
2337,19	56,96	17,4	36,68	0,00840525
2289,2	55,785	17,6	36,88	0,009438925
2071,79	50,7925	18	37,28	0,010901475
1809,46	44,3625	18,4	37,68	0,011273475

Tensión de rotura (MPa)	59,52
Módulo de Elasticidad (MPa)	12270



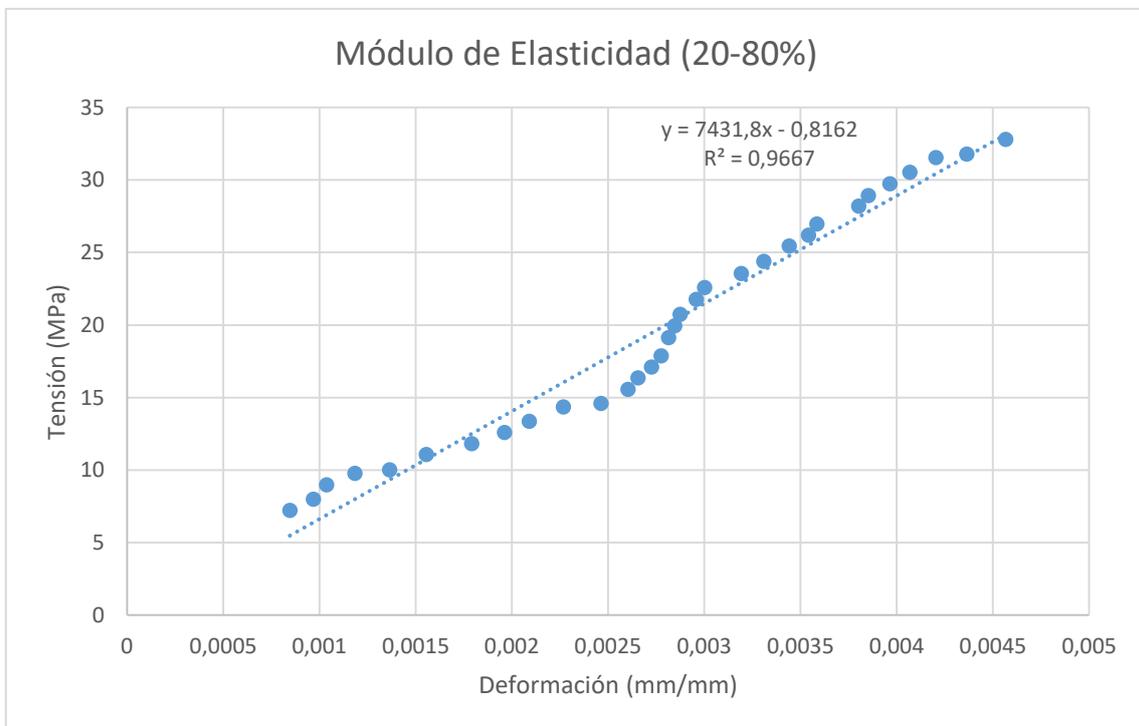
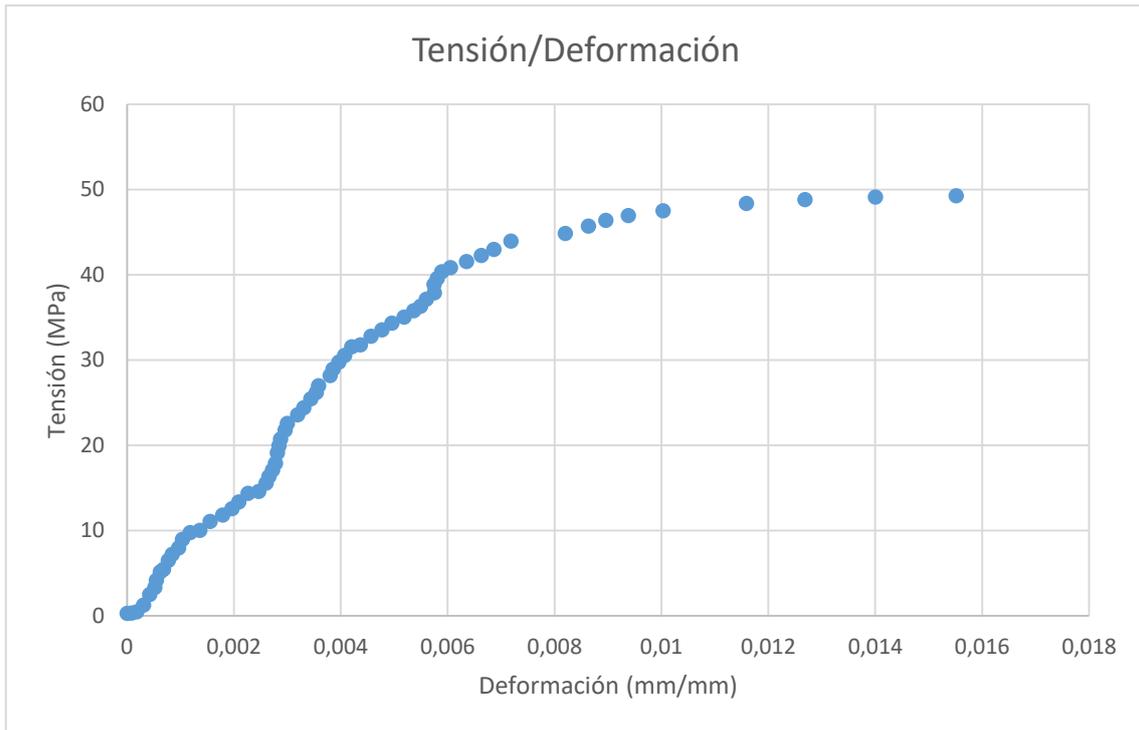
DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

<b>Ensayo B6</b>		Duración (s)	15,1	
		Inicio (s)	16,2	
		Fin (s)	31,3	
<b>Carga (kgf)</b>	<b>Tensión (MPa)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Tiempo video</b>	<b>Deformación (mm/mm)</b>
11,44	0,28	0	16,2	0
12,98	0,3175	0,2	16,4	0,000089675
16,74	0,49	0,4	16,6	0,0001823
51,24	1,255	0,8	17	0,0003096
89,15	2,4875	1	17,2	0,00042655
135,77	3,3275	1,2	17,4	0,000523175
169,76	4,1625	1,4	17,6	0,000553175
210,41	5,1575	1,6	17,8	0,00062335
221,85	5,44	1,8	18	0,00068415
254,98	6,49	2	18,2	0,00077555
294,43	7,2175	2,2	18,4	0,00084625
325,52	7,98	2,4	18,6	0,000968925
356,43	8,9825	2,6	18,8	0,0010383
398,61	9,7725	2,8	19	0,001185075
408,35	10,0125	3	19,2	0,00136465
440,62	11,0825	3,2	19,4	0,0015563
482,47	11,8275	3,4	19,6	0,00179175
513,38	12,5875	3,6	19,8	0,0019628
545,49	13,3725	3,8	20	0,002091
576,06	14,3625	4	20,2	0,002268575
595,53	14,6	4,2	20,4	0,00246405
627,29	15,575	4,4	20,6	0,00260375
667,6	16,3675	4,6	20,8	0,002655625
698	17,1125	4,8	21	0,002725675
728,91	17,87	5	21,2	0,0027763
780,14	19,1275	5,4	21,6	0,002815375
813,96	19,955	5,6	21,8	0,00284675
846,24	20,7475	5,8	22	0,0028747
876,47	21,765	6	22,2	0,002958725
911,82	22,585	6,2	22,4	0,0030026
961,18	23,565	6,6	22,8	0,003193225
994,99	24,395	6,8	23	0,00330975
1025,22	25,4525	7	23,2	0,003441725
1068,6	26,1975	7,2	23,4	0,0035423
1100,37	26,9775	7,4	23,6	0,0035854
1149,89	28,1925	7,8	24	0,0038025
1180,12	28,9325	8	24,2	0,003853975
1213,6	29,7525	8,2	24,4	0,003965475

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

1245,7	30,54	8,4	24,6	0,00406905
1275,93	31,5525	8,6	24,8	0,00420375
1296,77	31,7925	8,8	25	0,004364775
1328,36	32,8025	9	25,2	0,00456695
1368,16	33,5425	9,2	25,4	0,00476885
1399,75	34,3175	9,4	25,6	0,004957525
1429,98	35,0575	9,6	25,8	0,005183775
1460,04	35,795	9,8	26	0,005368275
1481,9	36,33	10	26,2	0,005490125
1514,86	37,14	10,2	26,4	0,00560015
1544,58	37,8675	10,4	26,6	0,005750375
1574,29	38,865	10,6	26,8	0,00574595
1614,77	39,5875	10,8	27	0,005805175
1645,85	40,35	11	27,2	0,005891875
1656,44	40,8375	11,2	27,4	0,00605195
1694,7	41,5475	11,4	27,6	0,0063512
1723,73	42,26	11,6	27,8	0,0066314
1753,79	42,9975	11,8	28	0,00686705
1781,8	43,935	12	28,2	0,007183675
1829,62	44,855	12,4	28,6	0,008198875
1856,26	45,715	12,6	28,8	0,0086362
1891,44	46,3725	12,8	29	0,0089627
1915,52	46,9625	13	29,2	0,009379525
1938,41	47,5225	13,2	29,4	0,010032975
1973,42	48,3825	13,6	29,8	0,011592825
1990,84	48,8075	13,8	30	0,0126878
2003,13	49,11	14	30,2	0,014003575
2009,11	49,265	14,2	30,4	0,01551645
2005,18	49,06	14,4	30,6	0,0174918
1924,91	47,1925	14,8	31	0,019159625
1603,67	39,3175	15	31,2	0,017916875

Tensión de rotura (MPa)	49,265
Módulo de Elasticidad (MPa)	7431,8



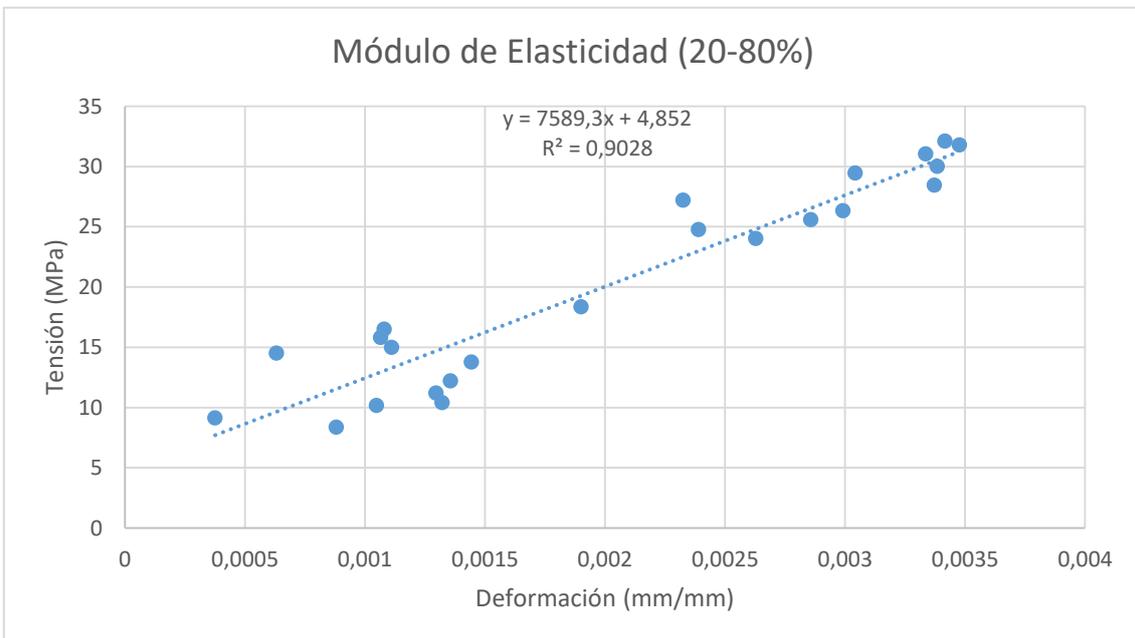
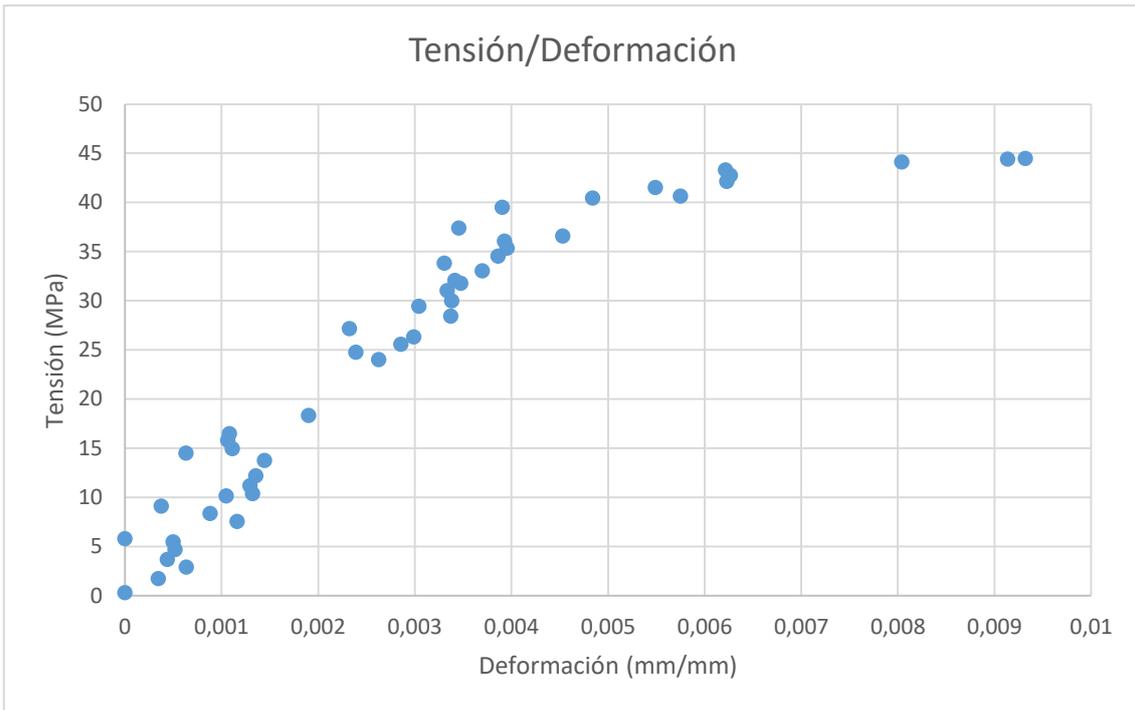
**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

<b>Ensayo B7</b>		Duración (s)	14	
		Inicio (s)	17,64	
		Fin (s)	31,64	
<b>Carga (kgf)</b>	<b>Tensión (MPa)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Tiempo video</b>	<b>Deformación (mm/mm)</b>
13,66	0,335	0	17,64	0
72,24	1,77	0,8	18,44	0,00034535
107,77	2,915	1	18,64	0,000636275
150,8	3,6975	1,2	18,84	0,0004387
181,71	4,7075	1,4	19,04	0,0005197
223,56	5,48	1,6	19,24	0,000499175
237,05	5,8125	1,8	19,44	1,125E-06
309,12	7,5775	2,2	19,84	0,00116305
341,74	8,3775	2,4	20,04	0,00088105
372,65	9,135	2,6	20,24	0,000375825
404,93	10,165	2,8	20,44	0,001047575
424,4	10,405	3	20,64	0,00132135
456,68	11,195	3,2	20,84	0,0012956
487,08	12,2225	3,4	21,04	0,001356675
561,54	13,7675	3,8	21,44	0,001444225
591,94	14,5125	4	21,64	0,000630925
611,07	14,9825	4,2	21,84	0,0011116
644,88	15,81	4,4	22,04	0,001065125
673,75	16,5175	4,6	22,24	0,001080625
739,33	18,365	5	22,64	0,001900625
980,13	24,03	6,6	24,24	0,002628125
1010,36	24,77	6,8	24,44	0,002390225
1043,84	25,5925	7	24,64	0,0028573
1074,41	26,34	7,2	24,84	0,0029914
1109,42	27,2	7,4	25,04	0,002325525
1160,31	28,4475	7,8	25,44	0,003373175
1190,71	29,4675	8	25,64	0,003043375
1224,18	30,0125	8,2	25,84	0,00338415
1255,95	31,055	8,4	26,04	0,003336025
1296,94	31,7975	8,6	26,24	0,0034767
1309,41	32,1025	8,8	26,44	0,003416375
1339,29	33,065	9	26,64	0,00369925
1380,28	33,84	9,2	26,84	0,00330705
1410	34,5675	9,4	27,04	0,003861075
1442,45	35,365	9,6	27,24	0,003955275
1472,16	36,0925	9,8	27,44	0,00392805
1493,51	36,615	10	27,64	0,0045321
1525,79	37,4075	10,2	27,84	0,00345555

DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

1612,72	39,5375	10,8	28,44	0,00390485
1650,29	40,46	11	28,64	0,0048413
1658,66	40,665	11,2	28,84	0,005750775
1686,67	41,5525	11,4	29,04	0,005491175
1719,97	42,1675	11,6	29,24	0,006229975
1745,25	42,7875	11,8	29,44	0,0062653
1767,28	43,3275	12	29,64	0,0062157
1799,73	44,1225	12,4	30,04	0,00804335
1812,03	44,425	12,6	30,24	0,009138325
1815,1	44,5	12,8	30,44	0,009322075
1805,36	44,2625	13	30,64	0,011179425
1775,82	43,5375	13,2	30,84	0,013070375
1697,26	40,7725	13,6	31,24	0,017812125
1499,83	36,77	13,8	31,44	0,0189259
1321,53	32,4	14	31,64	0,017329925

Tensión de rotura (MPa)	44,5
Módulo de Elasticidad (MPa)	7584,3



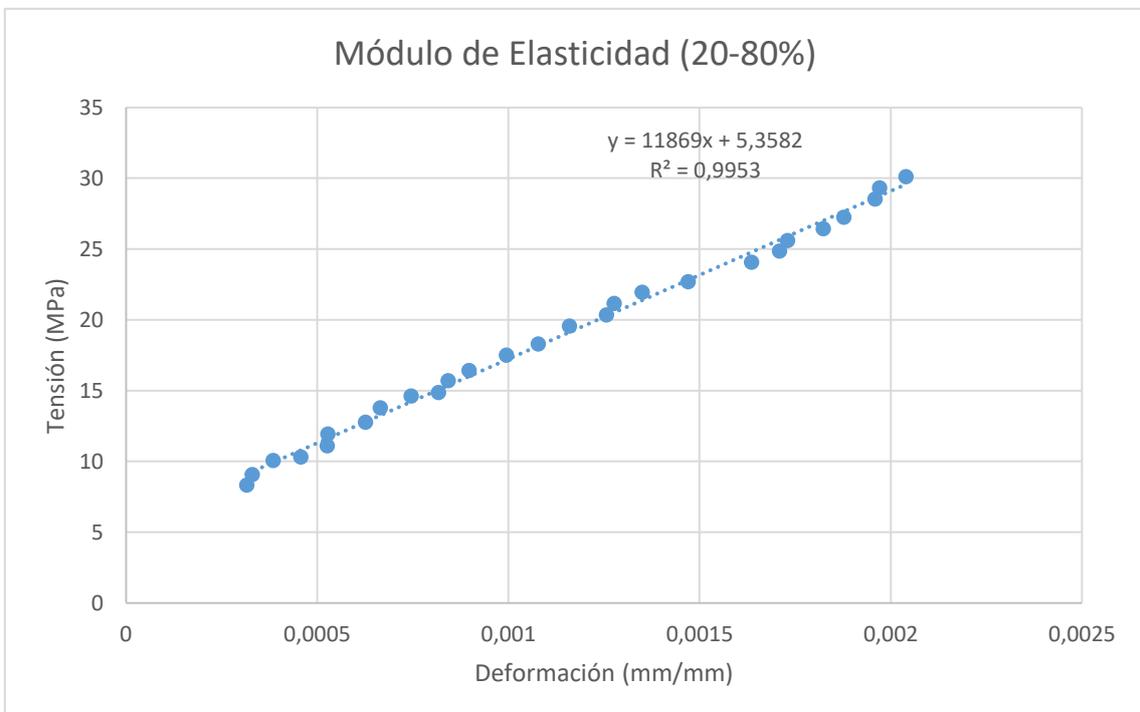
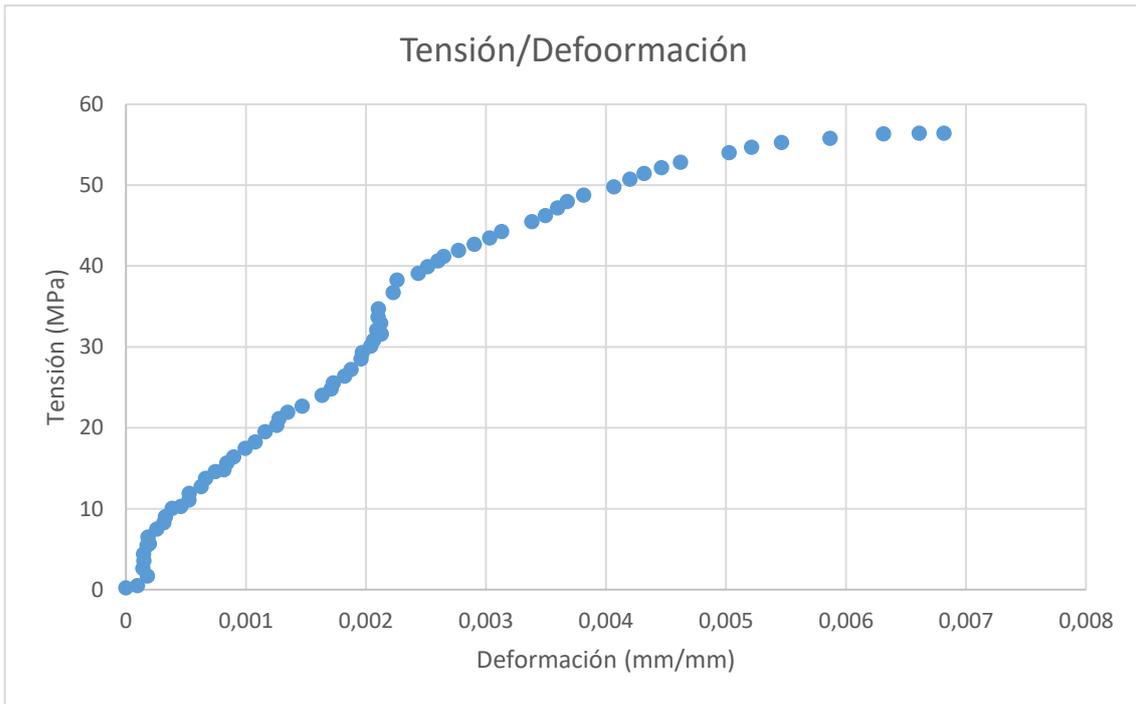
DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

<b>Ensayo B8</b>		Duración (s)	18,2	
		Inicio (s)	19	
		Fin (s)	37,2	
<b>Carga (kgf)</b>	<b>Tensión (MPa)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Tiempo video</b>	<b>Deformación (mm/mm)</b>
10,76	0,265	0	19	0
18,27	0,5475	0,4	19,4	0,000096725
57,55	1,7075	0,8	19,8	0,000178575
147,39	3,6125	1,2	20,2	0,000150575
180,69	4,43	1,4	20,4	0,000146275
214,51	5,5025	1,6	20,6	0,000176875
232,78	5,7075	1,8	20,8	0,000194775
265,57	6,51	2	21	0,000184525
306,05	7,5025	2,2	21,2	0,000258375
338,84	8,3075	2,4	21,4	0,000315925
369,58	9,06	2,6	21,6	0,00033005
400,32	10,0575	2,8	21,8	0,0003851
419,96	10,295	3	22	0,0004573
452,24	11,0875	3,2	22,2	0,0005266
486,22	11,92	3,4	22,4	0,00052805
520,21	12,755	3,6	22,6	0,00062655
550,95	13,78	3,8	22,8	0,00066475
586,47	14,6175	4	23	0,000745675
605,77	14,8525	4,2	23,2	0,0008178
639,59	15,68	4,4	23,4	0,00084275
669,82	16,4225	4,6	23,6	0,0008974
701,92	17,49	4,8	23,8	0,000994825
745,48	18,2775	5	24	0,0010782
789,03	19,54	5,4	24,4	0,00115995
829,16	20,3275	5,6	24,6	0,001256925
862,97	21,1575	5,8	24,8	0,001276475
894,91	21,94	6	25	0,0013496
925,31	22,685	6,2	25,2	0,001470325
971,42	24,055	6,6	25,6	0,001636125
1013,27	24,8425	6,8	25,8	0,001709275
1044,01	25,595	7	26	0,00173025
1077,48	26,415	7,2	26,2	0,001824075
1111,12	27,24	7,4	26,4	0,00187775
1163,56	28,5275	7,8	26,8	0,001958925
1195,66	29,3125	8	27	0,00197055
1227,77	30,1	8,2	27,2	0,002039675
1258,17	30,845	8,4	27,4	0,002064575
1310,77	32,135	8,8	27,8	0,002092375

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

1344,25	32,9575	9	28	0,00212365
1374,47	33,6975	9,2	28,2	0,00210165
1406,24	34,715	9,4	28,4	0,002103125
1488,9	36,7375	10	29	0,00222835
1562,17	38,3	10,4	29,4	0,00225875
1595,3	39,1125	10,6	29,6	0,00243585
1628,43	39,9225	10,8	29,8	0,002513775
1658,66	40,665	11	30	0,0026011
1671,3	41,21	11,2	30,2	0,002648125
1710,92	41,945	11,4	30,4	0,002771225
1740,98	42,6825	11,6	30,6	0,0029028
1774,11	43,495	11,8	30,8	0,0030315
1805,36	44,2625	12	31	0,003130225
1855,75	45,4975	12,4	31,4	0,0033836
1887,17	46,2675	12,6	31,6	0,003495225
1916,72	47,2175	12,8	31,8	0,003598975
1957,02	47,98	13	32	0,003679
1989,47	48,775	13,2	32,2	0,003815725
2030,8	49,7875	13,6	32,6	0,0040662
2059,32	50,7475	13,8	32,8	0,004202025
2099,63	51,475	14	33	0,004319225
2127,64	52,1625	14,2	33,2	0,004464875
2155,13	52,8375	14,4	33,4	0,004622975
2204,15	54,0375	14,8	33,8	0,005025375
2230,45	54,6825	15	34	0,0052135
2255,21	55,29	15,2	34,2	0,0054632
2276,56	55,8125	15,4	34,4	0,005869275
2293,98	56,3375	15,6	34,6	0,006313775
2301,32	56,42	15,8	34,8	0,006611425
2302,01	56,4375	16	35	0,006817525
2263,07	55,4825	16,2	35,2	0,0073012
2043,44	50,0975	16,4	35,4	0,007365325
1851,48	45,3925	16,6	35,6	0,008235675
1808,1	44,3275	16,8	35,8	0,010006575
1795,29	44,015	17	36	0,012144675
1759,59	43,14	17,4	36,4	0,0151581
1755,32	43,035	17,6	36,6	0,01638105
1751,91	42,95	17,8	36,8	0,017865825
1682,74	41,255	18,2	37,2	0,0187394

Tensión de rotura (MPa)	56,48
Módulo de Elasticidad (MPa)	11869



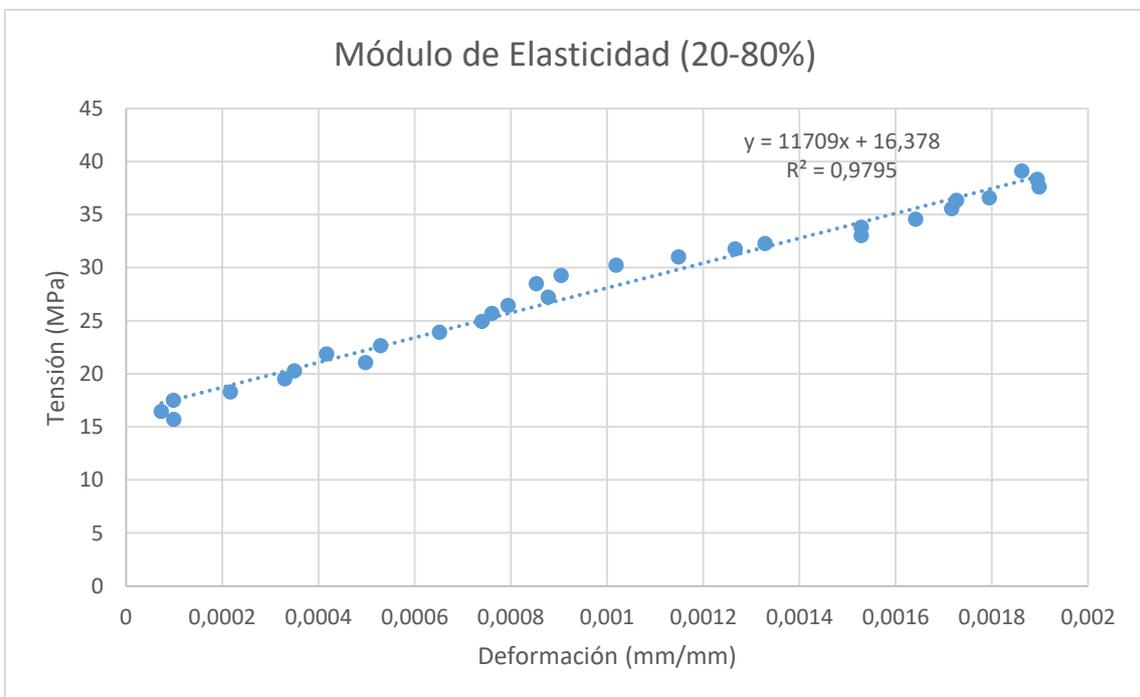
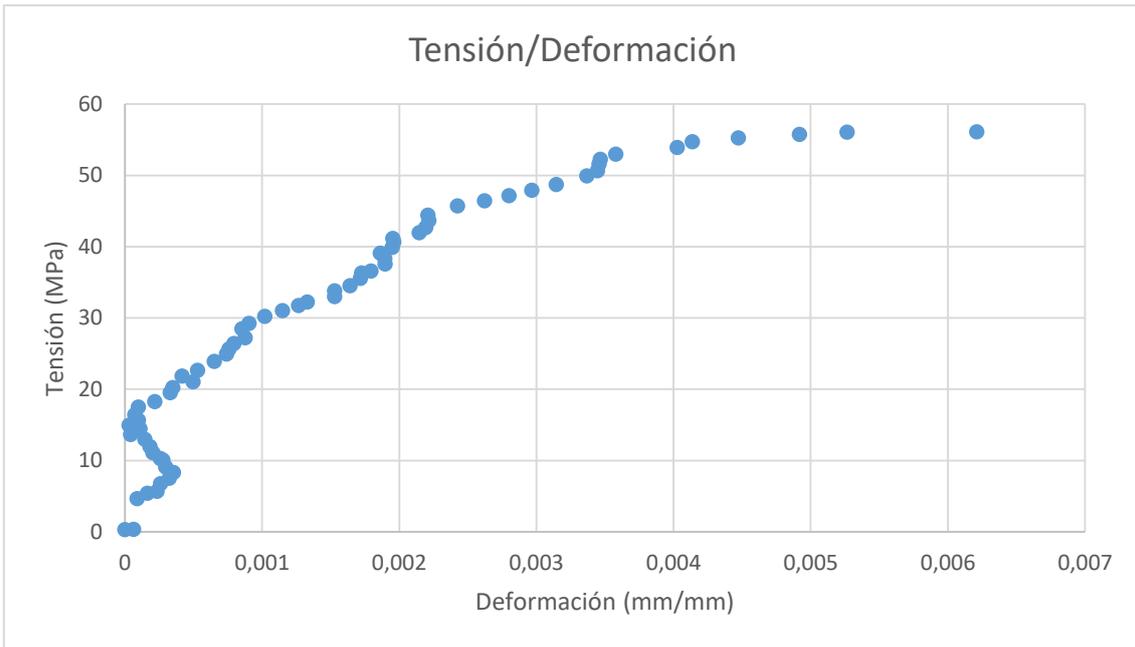
**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

<b>Ensayo B9</b>		Duración (s)	17,4	
		Inicio (s)	17,92	
		Fin (s)	35,32	
<b>Carga (kgf)</b>	<b>Tensión (MPa)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Tiempo video</b>	<b>Deformación (mm/mm)</b>
11,95	0,2925	0	17,92	0
13,83	0,34	0,2	18,12	0,000063425
179,49	4,6525	1,4	19,32	8,865E-05
221,34	5,4275	1,6	19,52	0,000164425
231,24	5,67	1,8	19,72	0,000235
262,5	6,7625	2	19,92	0,00025935
306,73	7,52	2,2	20,12	0,000324275
339,52	8,325	2,4	20,32	0,00035515
370,43	9,0825	2,6	20,52	0,000297775
401	10,075	2,8	20,72	0,00027775
420,47	10,3075	3	20,92	0,000259
452,75	11,1	3,2	21,12	0,0002042
486,91	11,9375	3,4	21,32	0,00018405
517,65	12,9625	3,6	21,52	0,000145775
557,78	13,675	3,8	21,72	4,2175E-05
590,06	14,4675	4	21,92	0,000110575
609,36	14,94	4,2	22,12	0,0000312
639,93	15,69	4,4	22,32	9,9125E-05
670,33	16,435	4,6	22,52	0,000073525
702,61	17,5025	4,8	22,72	0,000098525
745,82	18,285	5	22,92	0,0002171
795,69	19,5075	5,4	23,32	0,00033025
826,26	20,2575	5,6	23,52	0,000350225
858,53	21,0475	5,8	23,72	0,000497625
892,18	21,8725	6	23,92	0,00041675
923,95	22,6525	6,2	24,12	0,000529425
975,52	23,9175	6,6	24,52	0,00065155
1005,92	24,9375	6,8	24,72	0,000740025
1047,42	25,68	7	24,92	0,000760875
1077,82	26,425	7,2	25,12	0,000794125
1109,93	27,2125	7,4	25,32	0,000877825
1161,16	28,4675	7,8	25,72	0,00085305
1193,27	29,255	8	25,92	0,000904325
1223,67	30,235	8,2	26,12	0,001019275
1265,17	31,0175	8,4	26,32	0,0011487
1295,4	31,76	8,6	26,52	0,001266125
1306,5	32,265	8,8	26,72	0,00132895
1346,3	33,0075	9	26,92	0,00152855

DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

1378,57	33,7975	9,2	27,12	0,00152875
1408,8	34,54	9,4	27,32	0,0016418
1440,57	35,5525	9,6	27,52	0,0017165
1482,24	36,34	9,8	27,72	0,001726825
1491,63	36,57	10	27,92	0,00179505
1523,4	37,58	10,2	28,12	0,001898275
1563,36	38,3275	10,4	28,32	0,0018945
1595,13	39,1075	10,6	28,52	0,0018625
1626,89	39,885	10,8	28,72	0,001948675
1658,66	40,665	11	28,92	0,001960425
1679,33	41,1725	11,2	29,12	0,001953075
1711,09	41,95	11,4	29,32	0,002146
1741,32	42,6925	11,6	29,52	0,002193025
1771,38	43,6575	11,8	29,72	0,002217775
1812,54	44,4375	12	29,92	0,002210575
1854,89	45,71	12,4	30,32	0,0024258
1894	46,435	12,6	30,52	0,00262185
1923,55	47,16	12,8	30,72	0,0028014
1954,8	47,925	13	30,92	0,0029668
1987,59	48,73	13,2	31,12	0,0031457
2036,44	49,9275	13,6	31,52	0,003367725
2066,49	50,6625	13,8	31,72	0,003445975
2094,84	51,58	14	31,92	0,0034576
2131,39	52,255	14,2	32,12	0,003466075
2161,45	52,9925	14,4	32,32	0,003580525
2199,88	53,9325	14,8	32,72	0,004028575
2225,49	54,745	15	32,92	0,00413775
2254,53	55,2725	15,2	33,12	0,00447265
2274,68	55,7675	15,4	33,32	0,00491995
2287,32	56,0775	15,6	33,52	0,005267125
2289,54	56,1325	15,8	33,72	0,006211325
2287,32	56,0775	16	33,92	0,00615285
2262,9	55,4775	16,2	34,12	0,007018325
2209,44	53,6825	16,4	34,32	0,00779495
2112,26	51,785	16,6	34,52	0,00874755
2002,62	49,0975	16,8	34,72	0,01036955
1963,85	48,1475	17	34,92	0,014811775
1601,11	39,2525	17,4	35,32	0,0732618

Tensión de rotura (MPa)	56,14
Módulo de Elasticidad (MPa)	11709



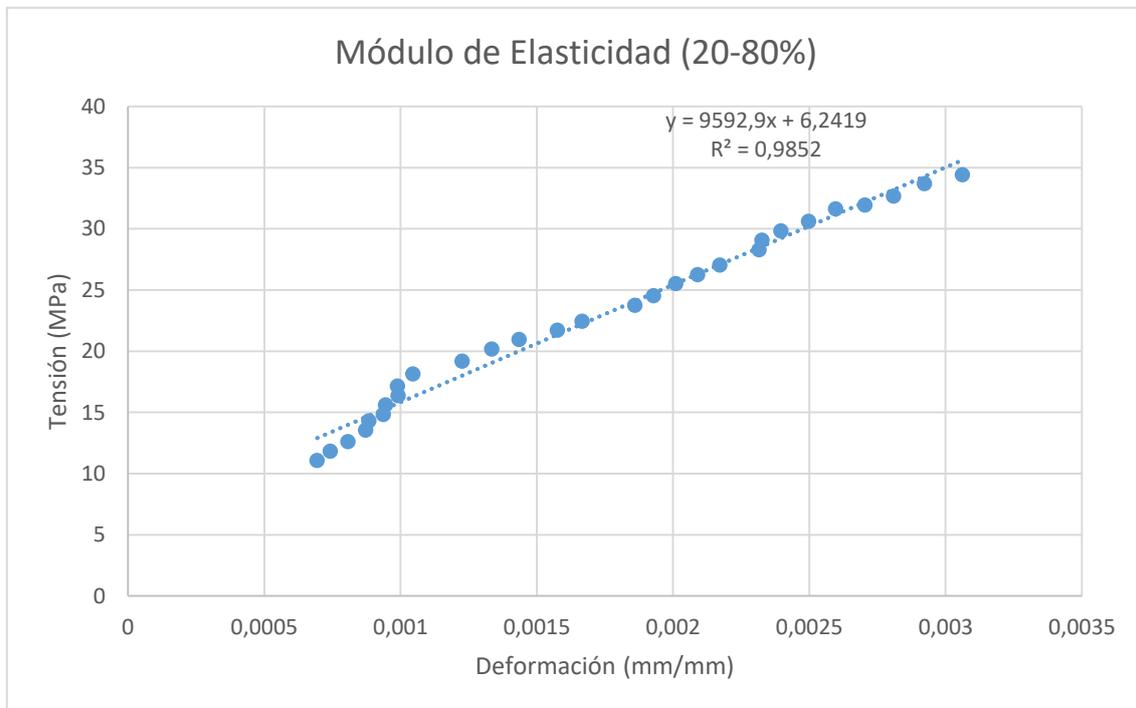
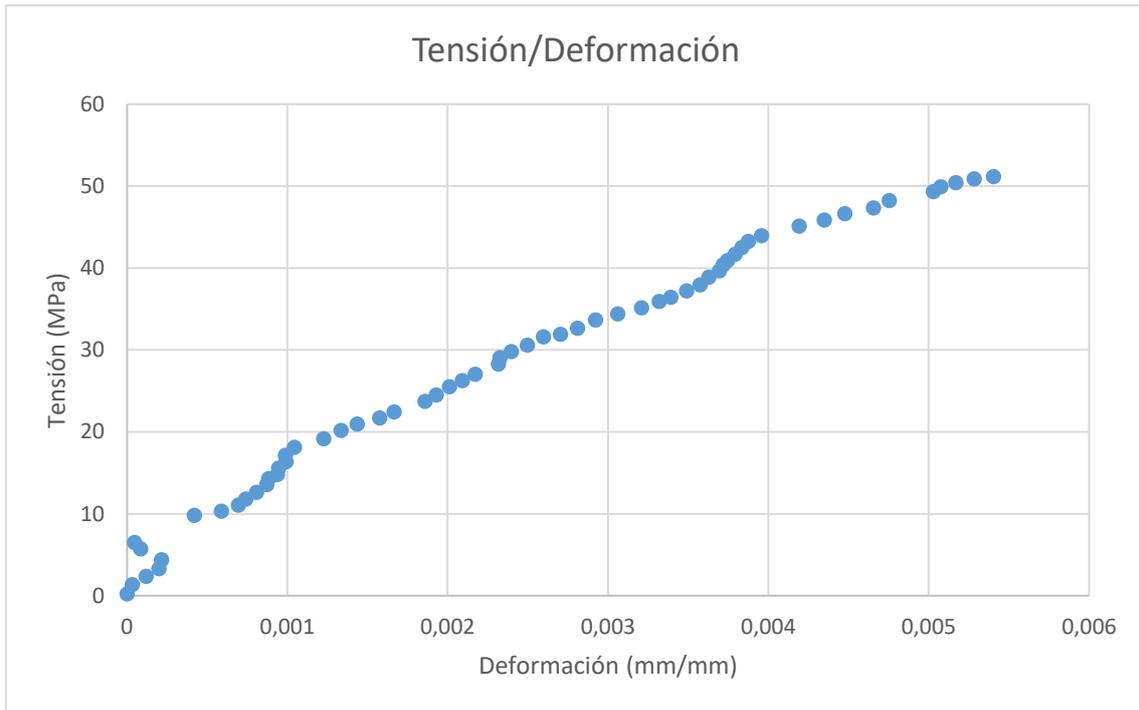
DATOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo B10		Duración (s)	17,9	
		Inicio (s)	18,64	
		Fin (s)	36,54	
Carga (kgf)	Tensión (MPa)	Tiempo (s)	Tiempo video	Deformación (mm/mm)
9,73	0,2375	0	18,64	0
55,51	1,36	0,8	19,44	0,000032475
96,83	2,375	1	19,64	0,0001189
135,43	3,32	1,2	19,84	0,0002001
168,39	4,4225	1,4	20,04	0,00021475
223,9	5,7325	1,8	20,44	8,5925E-05
264,89	6,495	2	20,64	4,7775E-05
401,51	9,845	2,8	21,44	0,00042095
411,25	10,3175	3	21,64	0,000589525
451,38	11,0675	3,2	21,84	0,000694575
482,13	11,82	3,4	22,04	0,0007421
514,4	12,6125	3,6	22,24	0,0008069
553	13,5575	3,8	22,44	0,000872625
583,57	14,3075	4	22,64	0,000883975
594,84	14,8225	4,2	22,84	0,000937125
636,69	15,61	4,4	23,04	0,00094575
667,08	16,355	4,6	23,24	0,0009912
699,02	17,1375	4,8	23,44	0,0009889
729,76	18,13	5	23,64	0,0010453
782,71	19,19	5,4	24,04	0,001226325
813,28	20,1775	5,6	24,24	0,00133505
854,95	20,96	5,8	24,44	0,00143565
885,35	21,705	6	24,64	0,001575425
915,75	22,45	6,2	24,84	0,0016665
968,52	23,745	6,6	25,24	0,00185995
1000,46	24,5275	6,8	25,44	0,001928725
1031,03	25,5125	7	25,64	0,0020108
1070,99	26,2575	7,2	25,84	0,0020908
1102,93	27,04	7,4	26,04	0,002171525
1153,99	28,2925	7,8	26,44	0,0023158
1185,93	29,075	8	26,64	0,002326275
1216,33	29,82	8,2	26,84	0,00239665
1248,26	30,6025	8,4	27,04	0,0024974
1280,2	31,625	8,6	27,24	0,002596525
1302,57	31,935	8,8	27,44	0,0027044
1332,8	32,675	9	27,64	0,00280915
1364,4	33,69	9,2	27,84	0,002922775
1404,02	34,4225	9,4	28,04	0,00306165

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO CARRASCO (*PINUS HALEPENSIS*) A PARTIR DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN Y LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

1434,42	35,1675	9,6	28,24	0,00321005
1465,84	35,9375	9,8	28,44	0,003319475
1486,17	36,435	10	28,64	0,003391825
1517,93	37,215	10,2	28,84	0,003489775
1547,99	37,9525	10,4	29,04	0,0035752
1577,71	38,915	10,6	29,24	0,0036291
1618,53	39,68	10,8	29,44	0,00369465
1648,41	40,4125	11	29,64	0,003718675
1657,81	40,9075	11,2	29,84	0,00374565
1690,6	41,715	11,4	30,04	0,003793725
1723,05	42,5075	11,6	30,24	0,003835375
1764,55	43,26	11,8	30,44	0,003874675
1793,58	43,9725	12	30,64	0,003957225
1840,89	45,1325	12,4	31,04	0,0041916
1871,29	45,8775	12,6	31,24	0,004349175
1902,54	46,645	12,8	31,44	0,004477625
1931,57	47,355	13	31,64	0,00465655
1958,9	48,2675	13,2	31,84	0,0047546
2002,79	49,3225	13,6	32,24	0,005029675
2035,75	49,91	13,8	32,44	0,005074825
2057,27	50,4375	14	32,64	0,0051698
2075,89	50,895	14,2	32,84	0,0052838
2087,33	51,175	14,4	33,04	0,005404275
2077,25	50,9275	14,8	33,44	0,005854025
1988,96	48,7625	15	33,64	0,006216575
1754,47	43,0125	15,2	33,84	0,0065038
1653,2	40,53	15,4	34,04	0,006800875
1665,49	40,8325	15,6	34,24	0,0072125
1686,16	41,34	15,8	34,44	0,008040525
1722,53	42,23	16	34,64	0,0086073
1736,2	42,565	16,2	34,84	0,009331525
1738,59	42,625	16,6	35,24	0,0117146
1731,93	42,46	16,8	35,44	0,011480125
1720,31	42,1775	17	35,64	0,011257425
1696,57	41,595	17,2	35,84	0,011462725
1643,97	40,02	17,6	36,24	-0,01418135
1524,25	37,37	17,8	36,44	-0,01398325

Tensión de rotura (MPa)	51,2325
Módulo de Elasticidad (MPa)	9592,9





## ANEJO 2: DATOS DESCARTADOS

A partir de los resultados mostrados en el anejo anterior se realizará un análisis descriptivo para determinar la normalidad de los mismos. Se descartarán aquellos valores que puedan presentar errores, detectando las causas que puedan haber llevado a dichos fallos y definiendo posibles soluciones.

Principalmente se analizará el Módulo de Elasticidad y su forma de obtención. Por un lado se tendrá en cuenta el valor del cuadrado del coeficiente de la recta de regresión lineal ( $R^2$ ) (ver tabla 2.1) tomada para el cálculo de la pendiente que proporciona el valor de E. Además, se analizará el intervalo tomado para dicha recta con respecto al resto de la gráfica para determinar si se trata de un fallo puntual o de un error global en toda la medición.

Por su parte la Resistencia Máxima es un valor obtenido directamente de la ejecución del ensayo sin necesidad de cálculos auxiliares. Por ello las variaciones producidas de unas probetas a otras no van más allá de las propiedades intrínsecas del tipo de madera y la variabilidad que éste pueda tener dentro de su misma especie.

Probeta	$R^2$	Probeta	$R^2$
A1	0,993	B1	0,993
A2	0,957	B2	0,987
A3	0,998	B3	0,809
A4	0,932	B4	0,969
A5	0,997	B5	0,996
A6	0,981	B6	0,967
A7	0,976	B7	0,903
A8	0,995	B8	0,995
A9	0,970	B9	0,980
A10	0,971	B10	0,985

Tabla 2-1: Coeficiente de regresión lineal de la línea de tendencia para obtener E

El valor límite para determinar la validez de la línea de tendencia empleada es  $R^2 \geq 0,95$ . De esta forma, aquellos ensayos cuyo valor de  $R^2$  sea superior serán aceptados para el cálculo estadístico final. Por el contrario, los ensayos cuyo valor de  $R^2$  sea inferior serán analizados individualmente. En el caso de que se trate de un error puntual, podrá determinarse el Módulo de Elasticidad mediante otro intervalo. Sin embargo, si se trata de un error en todo el ensayo que impida la obtención de un valor válido, estos resultados no serán tenidos en cuenta.

Vistos los datos obtenidos en la tabla 4.3, se presentan tres resultados con un coeficiente  $R^2$  inferior a 0,95 correspondientes a los ensayos A4, B3 y B7. A continuación se analizará individualmente cada uno de ellos.

## 2.1. Ensayo A4

A continuación en la figura 2.1 se muestra la gráfica completa tensión/deformación del ensayo A4 en la que se pueden apreciar diversas irregularidades a lo largo de toda la curva.

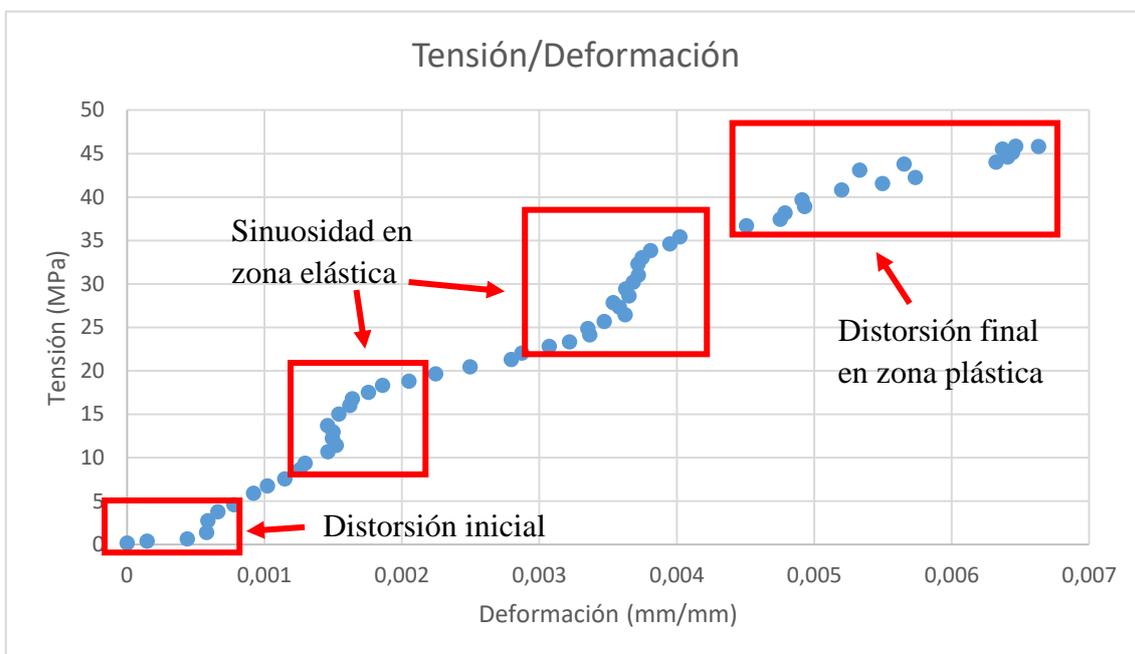


Figura 2.1: Gráfica tensión/deformación ensayo A4

En la parte inicial puede verse un elevado aumento de las deformaciones con la aplicación de una mínima tensión. Se trata de una distorsión inicial que puede deberse a las causas explicadas anteriormente de irregularidades en la superficie de la probeta hasta que se produce un reparto uniforme de las cargas.

En la parte final no se distingue la zona elasto-plástica y plástica, siendo en este caso una continuación de la zona anterior que no llega a ser elástica total. Además, en el tramo que debería corresponder a la zona elástica puede apreciarse una elevada sinuosidad que impide la adecuación de una regresión lineal.

Como consecuencia de lo anterior se obtiene un coeficiente de regresión lineal  $R^2$  de 0,932. A pesar de que en el conjunto de la gráfica existen indicios de una línea recta, dicha sinuosidad disminuye el coeficiente  $R^2$  impidiendo la aceptación de los resultados.

Observando la evolución del ensayo de compresión y los desplazamientos producidos en cada uno de los instantes pueden encontrarse las razones principales de estas alteraciones en la gráfica.

En la figura 2.2 puede verse que el ensayo presenta errores en cuanto a la rotura de la probeta. Puede apreciarse en la imagen que existe un aplastamiento en la parte superior de la misma y a su vez una rotura en la parte inferior. El aplastamiento superior se ha originado con anterioridad a la rotura, lo que ha ocasionado un giro en la probeta con

respecto a su posición inicial. En este caso los ejes, situados en el centro de la probeta, permiten ver el desvío que ha sufrido ésta.

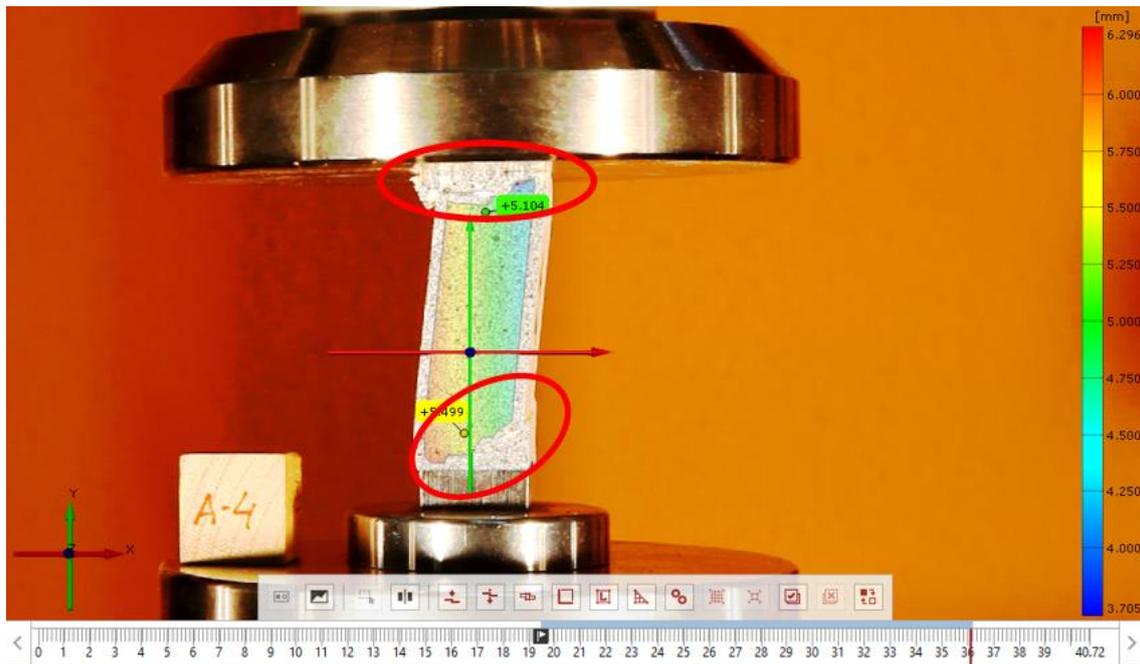


Figura 2.2: Aplastamiento en la parte superior y rotura en la parte inferior. Probeta A4

De esta forma, las deformaciones se han visto alteradas por el giro sufrido por la probeta impidiendo una medición adecuada. El resultado de estas mediciones erróneas es una gráfica que presenta sinuosidad y no permite distinguir las diferentes zonas que debería presentar la probeta en el proceso de carga.

Por lo tanto y debido a los errores presentados en este ensayo, los resultados obtenidos en la probeta A4 serán descartados para el cálculo final de los valores característicos de Módulo de Elasticidad y Resistencia Máxima.

## 2.2. Ensayo B3

A continuación en la figura 2.3 se muestra la gráfica completa tensión/deformación del ensayo B3, en la que se pueden apreciar diversas irregularidades a lo largo de toda la curva.

En la parte inicial puede verse que para los primeros valores de tensión se produce una mínima deformación. Se trata de una distorsión inicial que ocurre también en otros ensayos pero no es considerada para el cálculo del Módulo de Elasticidad como se ha comentado anteriormente.

En este caso la parte final sí presenta una distinción entre las diferentes zonas teóricas, distinguiéndose tanto la zona elasto-plástica de los 60 a los 70MPa aproximadamente como la zona plástica a partir de este punto.

Sin embargo, la zona anterior que teóricamente debería estar constituida por una línea recta, al formar parte de la fase elástica, no puede apreciarse con claridad, existiendo nuevamente en este caso una elevada sinuosidad en este tramo. De esta manera la gráfica presenta reducidas deformaciones con un elevado aumento de las tensiones en algunos casos y elevadas deformaciones con mínimo aumento de las tensiones para otros.

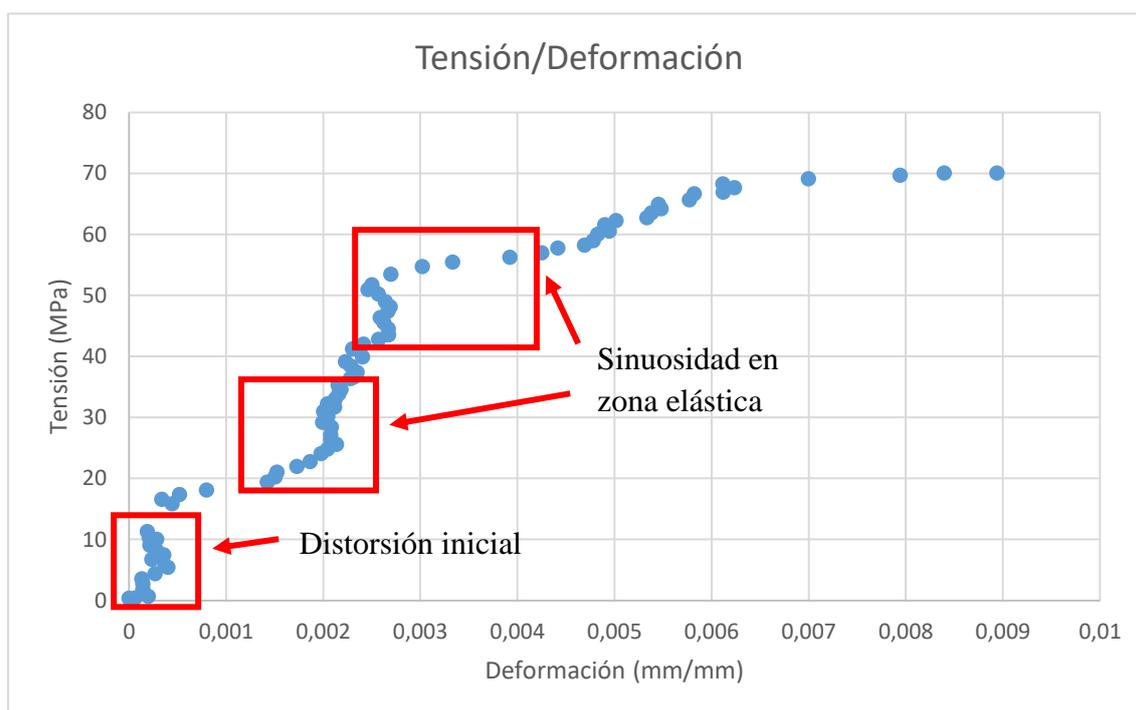


Figura 2.3: Gráfica tensión/deformación ensayo B3

Como consecuencia de la elevada sinuosidad que presenta la gráfica en el tramo teóricamente elástico (tomado para el cálculo del Módulo de Elasticidad), se obtiene un bajo coeficiente de regresión lineal  $R^2$  de 0,809. El reducido coeficiente  $R^2$  impide la aceptación de los resultados.

Analizando la evolución del ensayo mediante la Correlación Digital de Imágenes como se muestra en la figura 2.4 pueden verse las siguientes irregularidades:

- Los puntos  $P_1$  y  $P_2$  presentan irregularidades en cuanto a sus desplazamientos a lo largo de todo el proceso de carga. En el diagrama puede verse como la línea de color rojo (correspondiente a la evolución de los desplazamientos del punto inferior  $P_2$ ) presenta grandes oscilaciones en determinados tramos como el intervalo desde los 24 a los 27 segundos o el de los 40 a los 42 segundos. Sin embargo, la línea verde (correspondiente a la evolución de los desplazamientos del punto superior  $P_1$ ) sí presenta regularidad.
- Si se analiza el mapa de desplazamientos de la probeta, puede verse que la superficie presenta determinadas zonas en las que los desplazamientos son inferiores. Estas pequeñas zonas anómalas que presenta la superficie de la probeta en cuanto a los desplazamientos hacen indicar la existencia de defectos o anomalías en la parte inferior de la misma. Además cabe destacar que la rotura se produce en la parte inferior de la probeta.
- Una de estas zonas en las que se presentan anomalías se sitúa aproximadamente a la altura del punto inferior  $P_2$  tomado para obtener los desplazamientos. El hecho de que la rotura se produzca también en la parte inferior provoca que a partir del segundo 42 no existan datos de este punto, pues la probeta presenta una discontinuidad que impide obtener datos de este punto mediante la Correlación Digital de Imágenes. Los valores anómalos de desplazamientos obtenidos en el diagrama están influenciados por la presencia de estas zonas irregulares en la parte inferior de la probeta, de modo que provoca distorsiones a la hora de obtener las deformaciones. Sin embargo, el punto  $P_1$  se encuentra en la zona superior libre de defectos en todo momento, lo que permite que presente valores regulares.

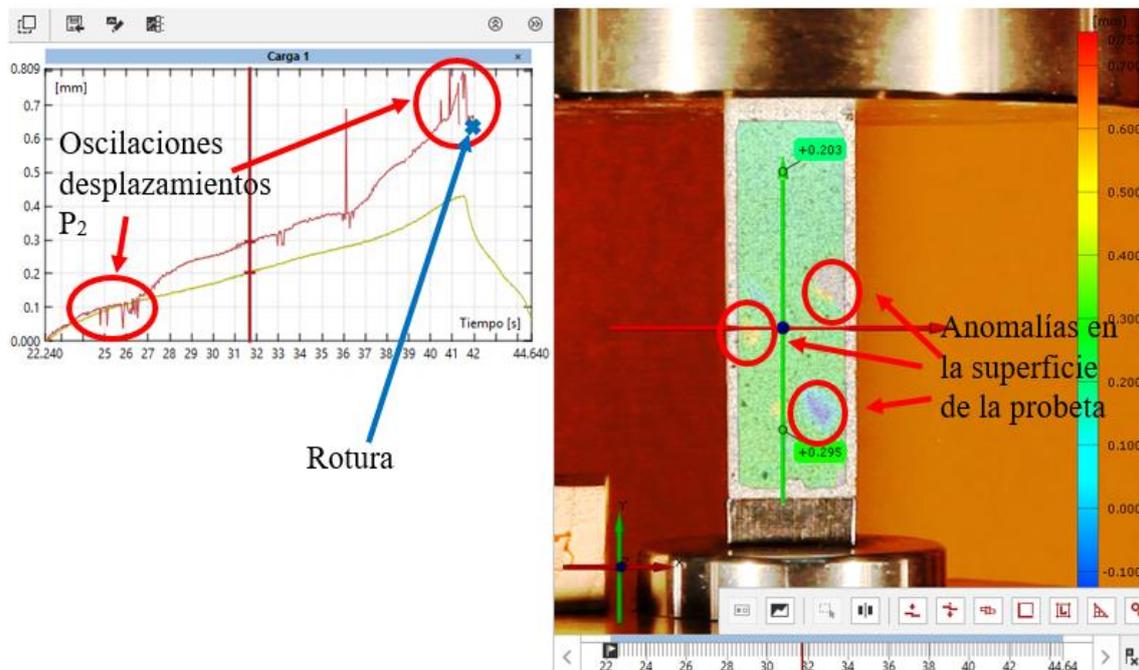


Figura 2.4: Anomalías de los desplazamientos en la superficie. Probeta B3

Por otra parte, cabe destacar el valor obtenido en este caso de Resistencia Máxima de 70,05MPa. El resto de ensayos presentan valores que se sitúan entre los 40 y los 60MPa, mientras que en este caso puede encontrarse una resistencia considerablemente elevada. La existencia de las irregularidades anteriormente mencionadas para la superficie de la probeta puede tratarse de irregularidades también hacia el interior de ésta. De este modo podría explicarse un aumento de la Resistencia Máxima y una alteración en las deformaciones producidas.

Debido a las irregularidades que presenta la probeta se ha considerado que los datos obtenidos para el cálculo del Módulo de Elasticidad no son válidos. Por ello se han descartado tanto estos resultados como los valores de Resistencia Máxima para el cálculo final de los valores característicos.

## 2.3. Ensayo B7

A continuación se muestra en la figura 2.5 la gráfica completa tensión/deformación correspondiente al ensayo B7, en la que se pueden apreciar diversas irregularidades a lo largo de toda la curva.

Atendiendo al global de la gráfica es complejo llegar a distinguir los tres tramos que habrían de componer la curva. Sí parece apreciarse una tendencia elástica en la primera zona y una plástica en la parte final. Sin embargo, en este caso la gráfica presenta una marcada dispersión de los datos de forma que no existe una única línea sino que puede encontrarse una nube de puntos alrededor de ésta.

Como consecuencia de esta nube de puntos, a pesar de existir una tendencia lineal en este primer tramo, el coeficiente de regresión  $R^2$  se ve reducido presentando un valor de 0,903 por la dispersión de los puntos.

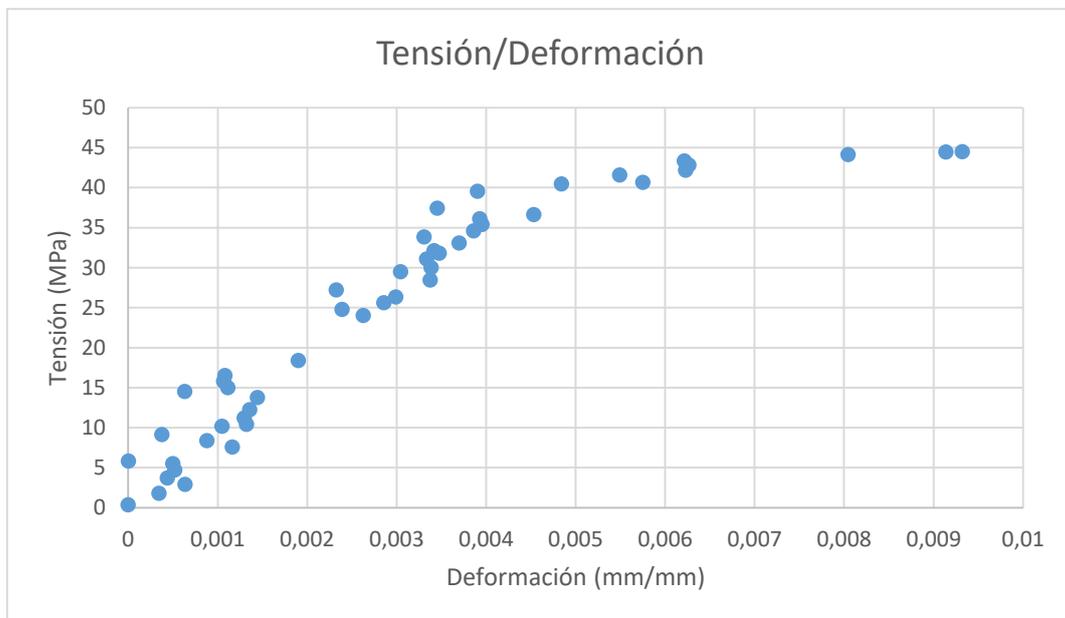


Figura 2.5: Gráfica tensión/deformación ensayo B7

Analizando la evolución del ensayo mediante la Correlación Digital de Imágenes como se muestra en la figura 2.6 pueden verse las siguientes irregularidades:

- Los puntos  $P_1$  y  $P_2$  presentan irregularidades en cuanto a sus desplazamientos a lo largo de todo el proceso de carga. En el diagrama puede verse como la línea de color azul (correspondiente a la evolución de los desplazamientos del punto inferior  $P_2$ ) presenta grandes oscilaciones principalmente desde el inicio hasta los 26 segundos y en el intervalo desde los 28 a los 29 segundos. Sin embargo, la línea negra (correspondiente a la evolución de los desplazamientos del punto superior  $P_1$ ) sí presenta regularidad.
- Si se analiza el mapa de desplazamientos de la probeta, puede verse que la superficie presenta determinadas zonas en las que los desplazamientos son inferiores como ocurría en el caso anterior. Estas pequeñas zonas anómalas que

presenta la superficie de la probeta en cuanto a los desplazamientos hacen indicar la existencia de defectos o anomalías.

- c) Una de estas zonas en las que se presentan anomalías se sitúa aproximadamente a la altura del punto inferior  $P_2$  tomado para obtener los desplazamientos. Los valores anómalos de desplazamientos obtenidos en el diagrama están influenciados por la presencia de estas zonas irregulares en la parte inferior de la probeta, de modo que provoca distorsiones a la hora de obtener las deformaciones. Sin embargo, el punto  $P_1$  se encuentra en la zona superior libre de defectos en todo momento, lo que permite que presente valores regulares. De igual forma que en el caso anterior, algunos valores de las deformaciones son válidos, pero estas anomalías provocan que otros valores se encuentren alterados. Dicha alteración en la medición de cada fotograma ocasiona que en vez de encontrar una línea en la gráfica se origine una nube de puntos.

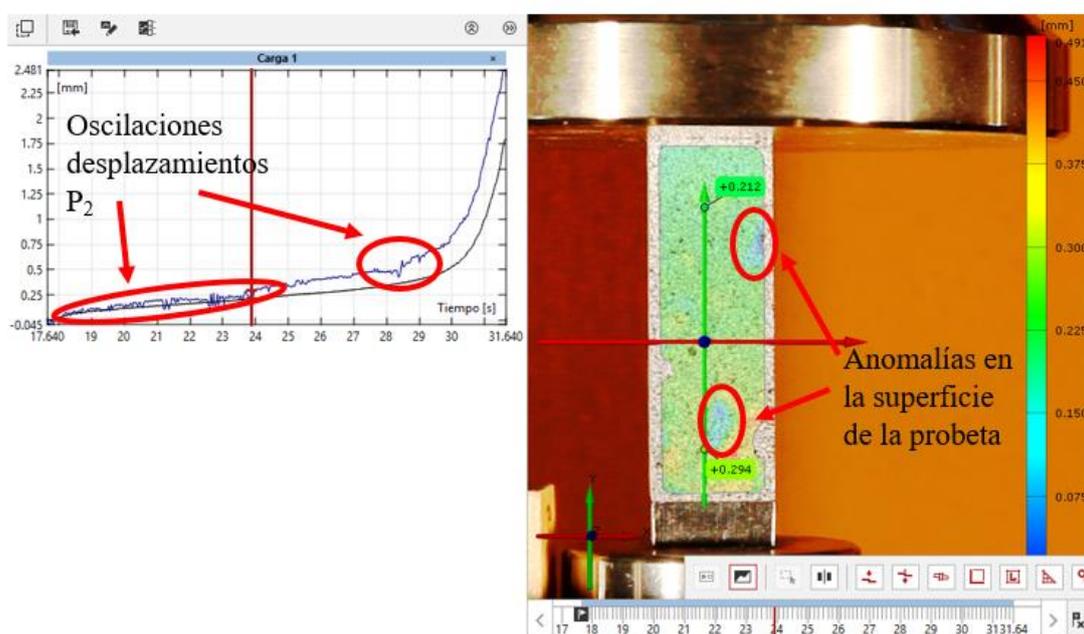


Figura 2.6: Anomalías de los desplazamientos en la superficie. Probeta B7

Por estas causas se ha considerado que los datos obtenidos para el cálculo del Módulo de Elasticidad no son válidos. Por ello se han descartado tanto estos resultados como los valores de Resistencia Máxima para el cálculo final de los valores característicos.