



OBJETIVO 4 – FUENTE DE VERIFICACIÓN 2  
INFORME DE RESULTADOS DE APLICACIÓN DE MÉTODOS DESTRUCTIVOS Y  
CORRELACIÓN ENTRE METODOLOGIAS.



## INTRODUCCIÓN

Para que la madera pueda ser utilizada en estructuras con seguridad es necesario caracterizarla y clasificarla. Debido a que es un material natural y heterogéneo sus propiedades dependen tanto de la especie de madera, de su procedencia (calidad de estación) como de las singularidades dentro de una misma especie.

Los procesos de clasificación y caracterización de la madera están regularizados por normativa y, de manera general, consisten en:

- Definición de un muestreo representativo de la población, considerando la especie y su procedencia (EN 384);
- Clasificación visual o mecánica de las muestras definidas: delimitación de características que se pueden medir en el material sin causar daño al mismo y que, posteriormente, serán asociadas a propiedades resistentes de la madera (EN 14081, UNE 56544, UNE 56546);
- **Caracterización física y mecánica del material: determinación de las propiedades resistentes medias de una población a través de ensayos destructivos en la muestra definida (EN 408, EN 384);**
- Asignación de una clase resistente: asociación de los resultados obtenidos mediante los procesos de clasificación (calidad visual o parámetros mecánicos) y de caracterización (EN 384, EN 338, EN 1912).

### *Caracterización de la madera*

La caracterización de la madera es el proceso por el cual se definen propiedades de resistencia medias para una población (especie) a través de ensayos de determinación de propiedades mecánicas en una muestra representativa del material. La determinación de las propiedades mecánicas se realiza mediante ensayos normalizados con probetas de madera de tamaño conocido o comercial. La norma EN 408 define los métodos de ensayo para la determinación de diferentes propiedades de interés estructural de la madera.

El proceso de caracterización es parte fundamental para la asignación de una clase resistente a una especie de madera que, según EN 384, involucra la determinación de tres valores característicos: la resistencia a flexión o a tracción, el módulo de elasticidad en flexión o en tracción paralela a la fibra y la densidad, partiendo de resultados de ensayos.

Las propiedades físicas y mecánicas de la madera varían en función del contenido de humedad del material. En general, cuanto mayor es el contenido de humedad en una pieza, menor será su resistencia y su módulo de elasticidad. Para la densidad se observa un comportamiento contrario: cuanto mayor es el contenido de humedad, mayor también será su densidad. Para un análisis estandarizado de los datos, las normativas establecen que los resultados de todos los parámetros de interés estructural deben ser calculados a una referencia de 12% de humedad. Por tanto, durante el proceso de caracterización de la madera, es fundamental también la determinación del contenido real de humedad de las piezas para que se pueda hacer una corrección de las propiedades (físicas y mecánicas) según las condiciones de referencia (12% de humedad).

### *Métodos no destructivos*

Los métodos no destructivos son utilizados en el proceso de clasificación mecánica de la madera, a partir de la asociación con los resultados obtenidos en ensayos mecánicos destructivos (flexión, tracción, compresión).

La norma EN 14081-2 (2019) establece los requisitos para la clasificación mecánica de la madera seca (12% de humedad) utilizando valores de propiedades indicadoras (IP), determinadas a partir de las aplicaciones de métodos no destructivos que se asocian a valores de densidad, resistencia y rigidez, obtenidos en los ensayos destructivos (flexión o tracción). Dicha norma se basa en procedimientos estadísticos que permiten controlar y ajustar los parámetros de los equipos empleados en los ensayos no destructivos, con el fin de mantener las propiedades de resistencia especificadas para cada clase resistente. Los requisitos incluidos en esta norma se aplican a equipos ya aprobados u homologados por el Comité Europeo de

Normalización, o bien a otros equipos no incluidos en norma, pero que deberán ser aprobados para su aplicación, siguiendo el procedimiento establecido en la norma 14081-2 para máquinas nuevas.

Dentro de los métodos no destructivos que se pueden utilizar para clasificar mecánicamente la madera, están aquellos basados en la propagación de ondas acústicas. Estos métodos son utilizados en la determinación de la velocidad de transmisión de ondas acústicas a través de piezas de madera que, posteriormente, es asociada a las propiedades resistentes de la madera para la asignación de clases. Los métodos acústicos se pueden dividir en diferentes técnicas, dentro de las cuales están las *Ondas de impacto* y el *Análisis de vibración natural*.

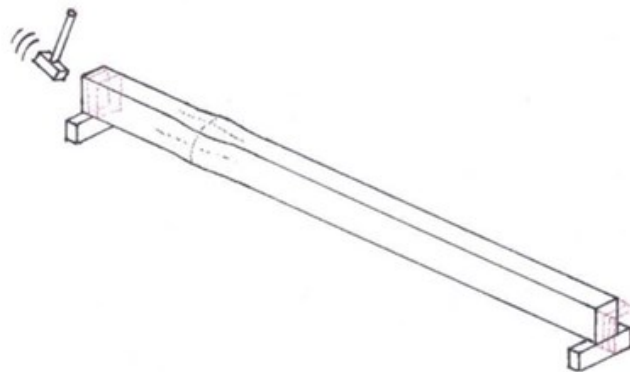
*Ondas de impacto.*

Se denominan métodos de ondas de impacto a aquellos en los que se evalúa la velocidad de onda sónica, generada mediante el impacto, por ejemplo, de un martillo sobre el material objeto de estudio (Íñiguez González, 2007). Este método permite el análisis de elementos estructurales consiguiendo una valoración global de sus propiedades elásticas.

El objetivo del ensayo es la medición del tiempo que tarda una onda en recorrer la distancia entre dos puntos conocidos, emisor y receptor. Con el tiempo asociado a la distancia de medición se calcula la velocidad de propagación de las ondas acústicas. Finalmente, asociando la velocidad y la densidad de cada pieza, se calcula la propiedad indicadora (IP), parámetro que se correlaciona con las propiedades de interés estructural, principalmente el módulo de elasticidad.

*Análisis de vibración natural.*

Las propiedades elásticas de un material están ligadas a su frecuencia natural de vibración. El método de análisis de vibraciones consiste en medir la frecuencia natural de vibración longitudinal de una pieza de madera y, a partir de ella, estimar sus propiedades resistentes (Vega Cueto, 2013) - Figura 1.



**Figura 1.** Detalle de vibración longitudinal del material. Fuente: (Íñiguez González, 2007).

Mediante un golpe aplicado directamente sobre una de las testas de la pieza, se produce una vibración natural del material (Figura 1). Con un analizador de espectro se obtiene la frecuencia de vibración de la pieza que se asocia a su longitud para el cálculo de la velocidad de vibración. Finalmente, asociando la velocidad y la densidad de cada pieza, se calcula la propiedad indicadora (IP), que es el parámetro utilizado en la determinación de las propiedades resistentes.

### **Objetivo**

Teniendo en cuenta lo que se presentó anteriormente, el presente Informe referente a la Fuente de Verificación 2 del Objetivo 4 del Grupo Operativo ACREMA tiene como objetivo presentar los resultados de aplicación de métodos destructivos y correlación entre los resultados de las diferentes metodologías (ensayos de flexión y técnicas no destructivas) utilizados para la evaluación de las propiedades resistente de las tablas de *Pinus pinaster* procedentes de pies resinados y pies testigos.

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se ensayaron un total de 238 piezas, separadas en dos submuestras procedentes de pies resinados y pies testigos, como definido a continuación (Tabla 1). Previamente a los ensayos de flexión, las tablas se

acondicionaron en un ambiente con temperatura y humedad controlados hasta alcanzar la humedad de equilibrio (12%).

Tabla 1. Muestreo

Procedencia	Nº de Piezas
Pies Resinados	118
Pies Testigos	120
Total	238

Los ensayos no destructivos y de flexión se realizaron en probetas de sección rectangular, con dimensión nominal de 40x110x2500 mm, según los procedimientos especificados a continuación.

Para los ensayos no destructivos se utilizaron dos técnicas: propagación de ondas de tensión – MicrosecondTimer - MST (Fakopp, Hungría); y vibración de ondas – con el equipo *Timber Grader* MTG (Brookhuis, Países Bajos).

Con el equipo MST se midió el tiempo de propagación de las ondas de ultrasonido en sentido longitudinal de la madera. Con la relación del tiempo y la longitud de las piezas se calculó la velocidad de propagación de ondas de impacto:

$$V = \frac{L}{t}$$

Donde:

- L es la longitud de las tablas.
- t es el tiempo de propagación de ondas obtenido a partir de las mediciones con el equipo.

Con el equipo **MTG** se midió la frecuencia natural de vibración de la madera. Con la relación de la frecuencia con la longitud de las piezas se calculó la velocidad de vibración.

$$V = 2 \times f \times L$$

Donde:

- L es la longitud de las tablas.
- f es la frecuencia natural de la madera obtenida a partir de las mediciones con el equipo.

Las velocidades calculadas con los datos de ambos equipos se asocian con valores de densidad del material para el cálculo de la propiedad indicadora (EN 14081-2), que será utilizada en los procedimientos estadísticos para la propuesta de clasificación de la especie.

$$IP = \frac{V^2 \times \rho}{1 - 0,01 \times (u - 12)} \times 10^{-6}$$

Donde:

- V es la velocidad de propagación de ondas de ultrasonidos/vibración de la madera, en m/s;
- $\rho$  es la densidad básica de la madera, obtenida para cada pieza, en kg/m<sup>3</sup>;
- u es el contenido de humedad de la madera, en %.

Los ensayos destructivos se realizaron según los procedimientos definidos en la UNE-EN 408 (2011). Para determinación de las propiedades de resistencia y módulo de elasticidad a flexión paralela a la fibra, se seleccionó la zona crítica en cada pieza, es decir, el entorno en el que se prevía el origen del fallo que, en la medida de lo posible, se localizó en la zona interna entre los puntos de aplicación de carga. El canto ensayado a tracción (canto inferior) se eligió de forma aleatoria.

En ambos lados de la tabla se colocaron dos clavos situados a la mitad su espesor y cada uno de ellos a una distancia del centro de la zona crítica de acuerdo con las dimensiones de la tabla. A continuación, se colocaron escuadras centralizadas en ambos lados de la tabla, que daban soporte a las perchas y a los captadores de desplazamiento laterales utilizados durante los ensayos (Figura 2).

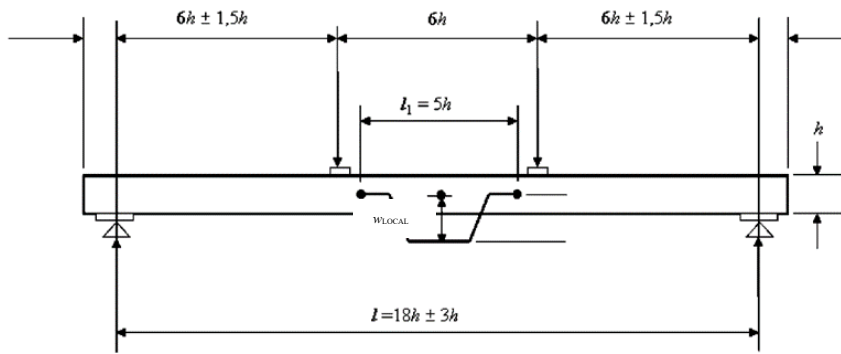


Figura 2. Configuración de dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad local en flexión.

Además de los captores de desplazamiento laterales, se utilizó un captador de desplazamiento en el centro de la luz de ensayo en el centro del borde traccionado de las probetas (Figura 3).

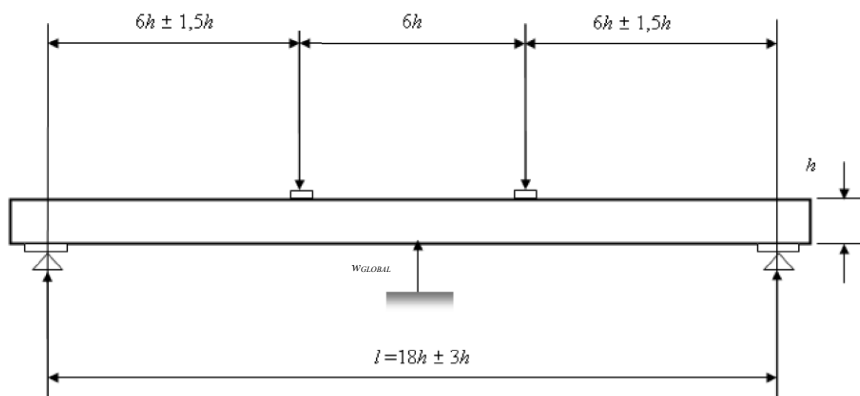


Figura 3. Configuración de dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión.

Las probetas (Figura 4), simplemente apoyadas sobre dos apoyos, se cargaron en flexión sobre dos puntos simétricos con una luz igual a 18 veces a la altura nominal. La carga se aplicó con una velocidad constante de avance no superior a los (0,003 h) mm/s. El dispositivo de carga utilizado debe permitió la medición de la fuerza con una precisión del 1% de la carga aplicada a la probeta.



Figura 4. Ensayo de flexión en tabla de *Pinus pinaster*.

Para cada ensayo, se trazó el gráfico de carga/deformación (local y global) utilizando los datos obtenidos del ensayo (Figura 5).



Figura 5. Ejemplo de adquisición de datos durante un ensayo de flexión en tabla de Pinus pinaster.

Para el cálculo del módulo de elasticidad local ( $MOE_{LOCAL}$ ) se tomó como deformación  $w_{LOCAL}$  la media de las mediciones en ambas caras en el eje neutro, y se midió en el punto medio de un segmento de longitud igual a cinco veces la altura de la probeta.

$$MOE_{LOCAL} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16l(w_2 - w_1)}$$

Donde:

$F_2 - F_1$  es el incremento de carga, en Newtons, en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor;

$w_2 - w_1$  es el incremento de deformación en milímetros correspondiente a  $F_2 - F_1$ .

Para el cálculo del módulo de elasticidad global ( $MOE_{GLOBAL}$ ) se tomó como deformación  $w_{GLOBAL}$  en el centro de luz del ensayo, según la ecuación a continuación.

$$MOE_{GLOBAL} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2ba^3 \left( 2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb^2h} \right)}$$

$F_2 - F_1$  es el incremento de carga, en Newtons, en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor;

$w_2 - w_1$  es el incremento de deformación en milímetros correspondiente a  $F_2 - F_1$ .

$a$  es la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo, en mm;

$G$  es el módulo de elasticidad transversal determinado de la madera, que se consideró como infinito (EN 384);

$b$  es la menor dimensión de la sección transversal, en mm;

$h$  es la mayor dimensión de la sección transversal, en mm.

Se calculó la resistencia a flexión ( $MOR$ ) según la ecuación:

$$MOR = \frac{3Fa}{bh^2}$$

Donde

- a** es la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo, en mm;
- F** es la máxima carga, en N;
- b** es la menor dimensión de la sección transversal, en mm;
- h** es la mayor dimensión de la sección transversal, en mm.

Una vez finalizados los ensayos de flexión, se determinó la densidad y la humedad de las probetas sobre una rebanada (Figura 6) extraída de cada una de ellas. Cada una de las rebanadas se ha tomado de la sección completa, sin incluir singularidades tales como nudos, corteza o bolsas de resina. Las rebanadas fueron pesadas inmediatamente después de haberlas tomado y a continuación se introdujeron en la estufa a una temperatura de  $(103\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Se mantuvieron en la estufa, realizando pesadas, hasta que la diferencia de masa entre dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 2 horas fuera menor del 0,1% (Norma UNE 13183-1).



**Figura 6.** Extracción de rebanadas de las tablas de *Pinus pinaster* para la determinación de la densidad del material.

Los datos de humedad de cada probeta se utilizaron para corregir los parámetros de propiedad indicadora, módulo de elasticidad y densidad según la humedad de referencia (12%) definida por normativa.

Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente a través de *software*. Para la correlación entre las metodologías utilizadas, se obtuvieron modelos de regresión lineales entre las propiedades indicadoras y los parámetros de flexión (módulos de elasticidad y resistencia).

## RESULTADOS

La

Tabla 2 presenta los valores de estadística descriptiva (media, desviación estándar y coeficiente de variación) y de normalidad (Asimetría y Curtosis) de los datos de Propiedad Indicadora (IP), obtenidos en ensayos de con técnicas no destructivas (MST y MTG); de resistencia (MOR) y módulos de elasticidades ( $MOE_{GLOBAL}$  y  $MOE_{LOCAL}$ ), obtenidos en los ensayos de flexión; y de densidad de las tablas procedentes de los pies resinados. Los valores de Asimetría y Curtosis dentro del rango de -2 y +2 indican que los datos de las variable analizadas presentan distribución normal y validan la utilización de testes estadísticos panaméricos para análisis de los resultados.



**Tabla 2.** Valores estadísticos de media, desviación estándar, coeficiente de variación, asimetría y curtosis para los datos de flexión ( $MOE_{GLOBAL}$ ,  $MOE_{LOCAL}$ , MOR), de densidad y de Propiedad Indicadora (IP) obtenidas por ensayos con tecnología de vibración de ondas ( $IP_{MTG}$ ) y de ondas de tensión ( $IP_{MST}$ ) en tablas procedentes de los pies resinados.

	$IP_{MST}$	$IP_{MTG}$	$MOE_{GLOBAL}$	$MOE_{LOCAL}$	MOR	densidad
<b>Media</b>	12780	11069	9776	10400	46	558
<b>Desviación Estándar</b>	2148	2100	1930	2249	13	30
<b>C.V.</b>	17%	19%	20%	22%	28%	5%
<b>Asimetría</b>	-0,47	0,50	1,05	-0,04	-0,01	-0,60
<b>Curtosis</b>	-1,16	-0,85	-1,38	-0,92	-1,08	0,84

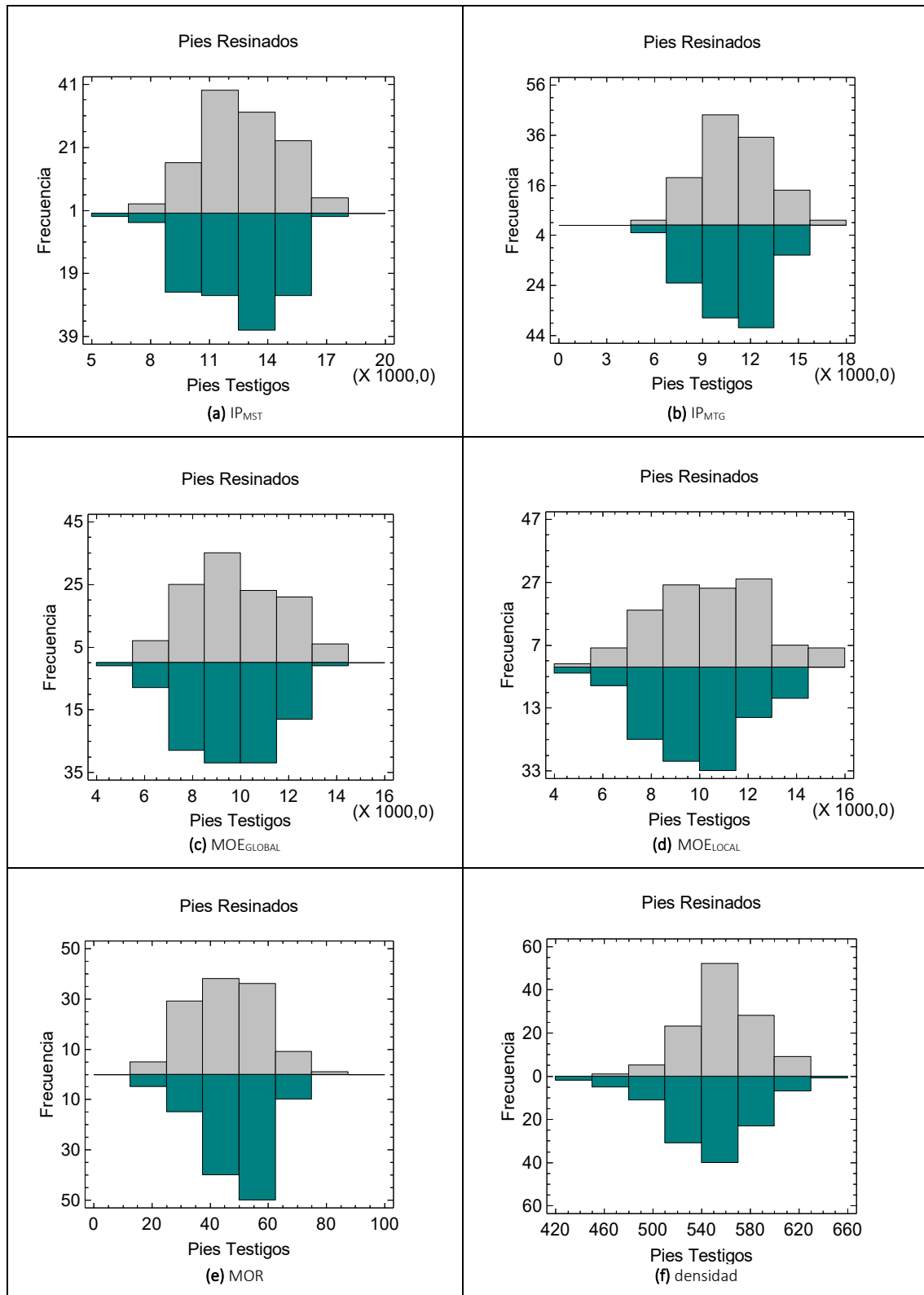
La Tabla 3 presenta los valores de estadística descriptiva (media, desviación estándar y coeficiente de variación) y de normalidad (Asimetría y Curtosis) de los datos de Propiedad Indicadora (IP), obtenidos en ensayos de con técnicas no destructivas (MST y MTG); de resistencia (MOR) y módulos de elasticidades ( $MOE_{GLOBAL}$  y  $MOE_{LOCAL}$ ), obtenidos en los ensayos de flexión; y de densidad de las tablas procedentes de los pies testigos. Los valores de Asimetría y Curtosis dentro del rango de -2 y +2 indican que los datos de de  $IP_{MST}$ ,  $IP_{MTG}$ ,  $MOE_{GLOBAL}$ ,  $MOE_{LOCAL}$  y densidad de la muestra de tablas testigos presentan distribución normal. Sin embargo, los datos de resistencia (MOR) no presentaron distribución normal: valor de Asimetría fuera del intervalo -2 y 2. Para dicho parametro (MOR) se identificaron y se eliminaron los puntos atípicos para poder proceder con los analisis propuestos.

**Tabla 3.** Valores estadísticos de media, desviación estándar, coeficiente de variación, asimetría y curtosis para los datos de flexión ( $MOE_{GLOBAL}$ ,  $MOE_{LOCAL}$ , MOR), de densidad y de Propiedad Indicadora (IP) obtenidas por ensayos con tecnología de vibración de ondas ( $IP_{MTG}$ ) y de ondas de tensión ( $IP_{MST}$ ) en tablas procedentes de los pies testigos.

	$IP_{MST}$	$IP_{MTG}$	$MOE_{GLOBAL}$	$MOE_{LOCAL}$	MOR	densidad
<b>Media</b>	12456	10884	9581	9843	49	546
<b>Desviación Estándar</b>	2177	2117	1806	2003	11	38
<b>C.V.</b>	17%	19%	19%	20%	23%	7%
<b>Asimetría</b>	-1,22	-0,96	-0,26	0,28	-3,14	-1,51
<b>Curtosis</b>	-1,84	-1,32	-1,46	-1,08	0,27	0,18

De manera general, los valores obtenidos para las dos muestras están dentro del mismo orden de grandeza. Como esperado, las Propiedades Indicadoras son numéricamente más grandes que los módulos de elasticidad obtenidos a flexión. También era previsto que los módulos de elasticidad globales fueran más bajos que los módulos locales. Dicho comportamiento se confirmó en las dos muestras. Con relación a la resistencia, la muestra de tablas procedentes de los pies testigos presentaron un valor medio ligeramente (6%) más alto que la muestra de tablas de los pies resinados.

Para cada parámetro analizado (destructivo y no destructivo) se obtuvieron gráficas de distribución de frecuencias (Figura 7) para las muestras de las tablas procedentes de los Pies Resinados y los Pies Testigos. Se observa que las distribuciones de los datos de todos los parámetros estudiados son similares para las dos muestras (Pies resinados y Pies testigos).



**Figura 7.** Histogramas de los parámetros no destructivos - **(a)  $IP_{MST}$**  y **(b)  $IP_{MTG}$**  -, de flexión - **(c)  $MOE_{GLOBAL}$** , **(d)  $MOE_{LOCAL}$** , **(e) MOR** - y de **(f) densidad** para las muestras de *Pinus pinaster* procedentes de Pies Resinados y de Pies Testigos.

Teniendo en cuenta la semejanza entre la distribución de los datos obtenidos para las dos muestras (Pies Resinados y Pies Testigos) se consideró la posibilidad de proponer un análisis estadístico para clasificación mecánica (correlación entre metodologías) considerando todas las tablas como una única muestra. Los

análisis presentados a continuación, por lo tanto, se refieren a una única muestra formada por 240 tablas de *Pinus pinaster* procedentes de pies resinados y pies testigos.

La Tabla 4 presenta los valores de estadística descriptiva (media, desviación estándar y coeficiente de variación) y de normalidad (Asimetría y Curtosis) de los datos de Propiedad Indicadora (IP), obtenidos en ensayos de con técnicas no destructivas (MST y MTG); de resistencia (MOR) y módulos de elasticidades ( $MOE_{GLOBAL}$  y  $MOE_{LOCAL}$ ), obtenidos en los ensayos de flexión; y de densidad de todas las tablas objeto de estudio (pies testigos y pies resinados). Los valores de Asimetría y Curtosis dentro del rango de -2 y +2 indican que los datos de  $IP_{MTG}$ ,  $MOE_{GLOBAL}$ ,  $MOE_{LOCAL}$  del total de tablas de la muestra presentan distribución normal. Sin embargo, los datos de  $IP_{MTG}$ , MOR y densidad no presentaron distribución normal: valor de Asimetría fuera del intervalo -2 y 2. Para dichos parámetros se identificaron y se eliminaron los puntos atípicos para poder proceder con los análisis propuestos.

**Tabla 4.** Valores estadísticos de media, desviación estándar, coeficiente de variación, asimetría y curtosis para los datos de flexión ( $MOE_{GLOBAL}$ ,  $MOE_{LOCAL}$ , MOR), de densidad y de Propiedad Indicadora (IP) obtenidas por ensayos con tecnología de vibración de ondas ( $IP_{MTG}$ ) y de ondas de tensión ( $IP_{MST}$ ) en todas las tablas objeto de estudio (pies resinados y pies testigos),

	$IP_{MST}$	$IP_{MTG}$	$MOE_{GLOBAL}$	$MOE_{LOCAL}$	MOR	densidad
<b>N</b>	237	232	237	237	238	238
<b>Media</b>	12617	10976	9677	10118	48	552
<b>Desviación Estándar</b>	2164	2106	1867	2142	12	35
<b>C.V.</b>	17%	19%	19%	21%	26%	6%
<b>Min</b>	6490	5503	4921	4794	15	433
<b>Max</b>	17342	16329	14383	15178	82	635
<b>Rango</b>	10852	10826	9462	10384	67	202
<b>Asimetría</b>	-1,21	-0,34	0,70	0,41	<b>-2,03</b>	<b>-2,42</b>
<b>Curtosis</b>	<b>-2,06</b>	-1,48	-1,90	-1,34	-1,08	1,33

Para clasificar mecánicamente la madera para fines estructurales, la EN 14081-2 define una serie de procedimientos estadísticos que correlacionan variables no destructivas con las propiedades resistentes del material (resistencia, módulo de elasticidad y densidad). El primero procedimiento definido por el documento (EN 14081-2) es la obtención de regresiones lineales entre las Propiedades Indicadoras (IP) obtenidas con diferentes equipos y los parámetros de flexión y densidad.

La Tabla 5 presenta las estadísticas de Valor P, coeficiente de correlación (R), coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error de estimación estándar y las ecuaciones de paso obtenidas por análisis de regresión lineal entre las propiedades indicadoras obtenidas por los dos equipos (MST y MTG) – y los valores de densidad y aquellos obtenidos en flexión ( $MOE_{GLOBAL}$ ,  $MOE_{LOCAL}$  y MOR).

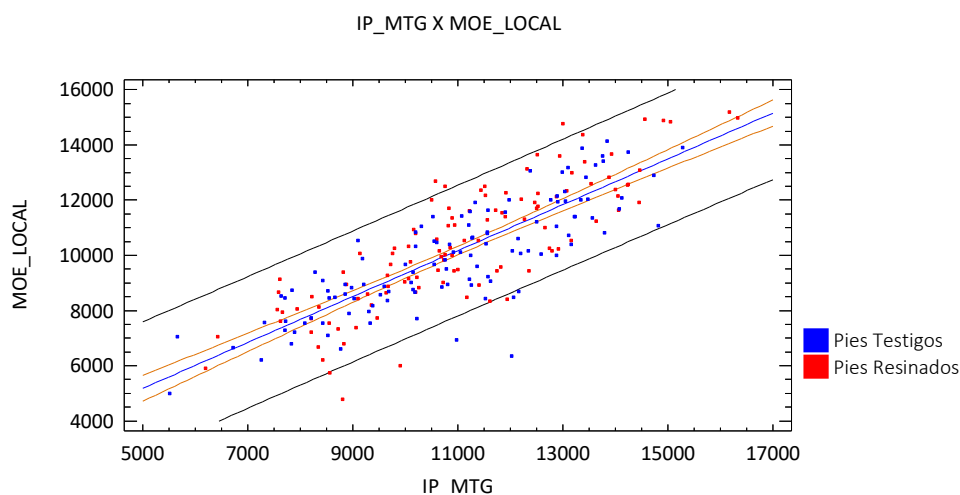
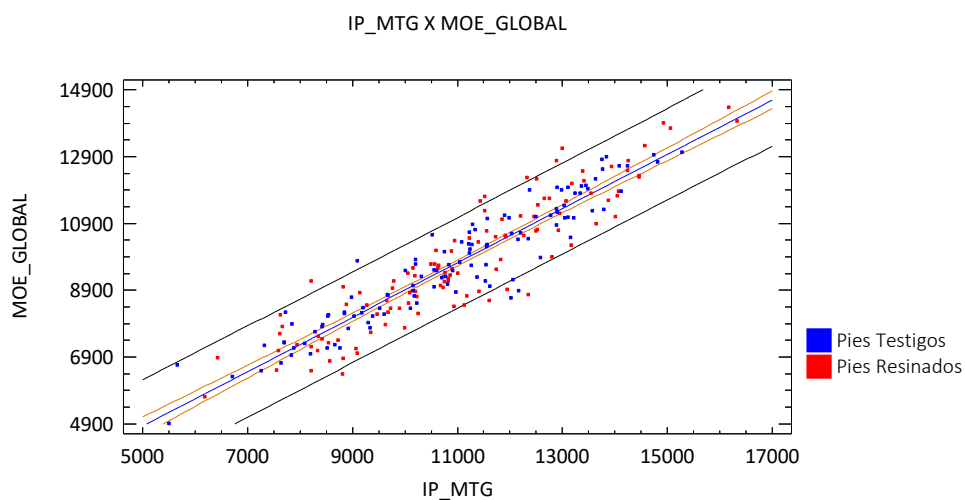
**Tabla 5.** Parámetros estadísticos – Valor P, coeficiente de correlación (R), coeficientes de determinación ( $R^2$ ), error de estimación estándar, valor P y ecuaciones de paso - obtenidos en las regresiones lineales entre las propiedades del indicadoras ( $IP_{MST}$  e  $IP_{MTG}$ ) y los módulos de elasticidad a flexión.

	Valor-P	R	$R^2$	Error	Ecuación
$IP_{MST}$	$MOE_{GLOBAL}$	0,00	0,82	67%	1077 $MOE_{GLOBAL} = 843,503 + 0,700795*IP_{MST}$
	$MOE_{LOCAL}$	0,00	0,72	51%	1493 $MOE_{LOCAL} = 1193,93 + 0,707902*IP_{MST}$
	MOR	0,00	0,44	19%	11 $MOR = 16,8689 + 0,00244931*IP_{MST}$
	densidad	0,00	0,34	11%	32 $densidad = 484,884 + 0,00535725*IP_{MST}$
$IP_{MTG}$	$MOE_{GLOBAL}$	0,00	0,93	86%	688 $MOE_{GLOBAL} = 764,948 + 0,813973*IP_{MTG}$
	$MOE_{LOCAL}$	0,00	0,83	68%	1199 $MOE_{LOCAL} = 1036,78 + 0,830371*IP_{MTG}$
	MOR	0,00	0,61	38%	10 $MOR = 9,31988 + 0,00352245*IP_{MTG}$
	densidad	0,00	0,42	17%	30 $densidad = 479,133 + 0,00658405*IP_{MTG}$

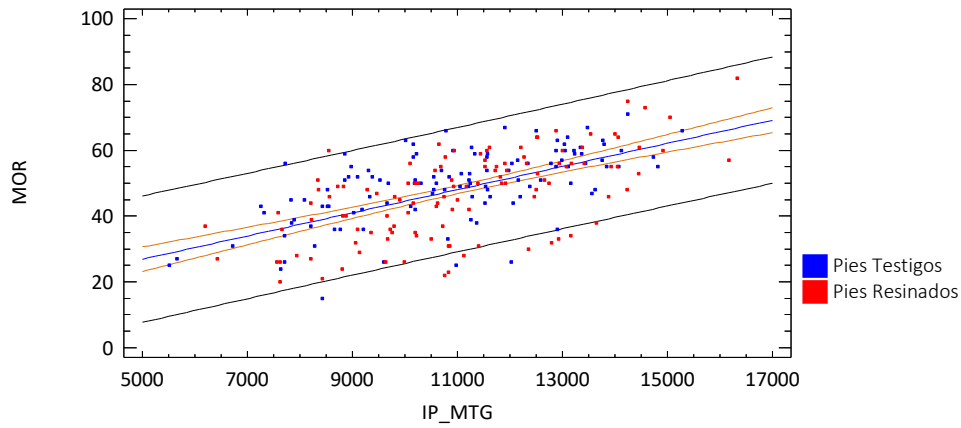
Con relación a los modelos presentados en la Tabla 5 existe una relación estadísticamente significativa entre los parámetros analizados, con un nivel de confianza del 95.0%, para todos los casos (Valor  $P < 0.05$ ).

La estadística  $R^2$  indica el porcentaje de variabilidad de la muestra. Los coeficientes de correlación ( $R$ ) indican la fuerza de la relación entre las variables. Los valores de  $R$  superiores a 0,70 indican que las propiedades indicadoras obtenidas con los equipos no destructivos tienen una fuerte relación con los módulos de elasticidades (global y local) a flexión. Aunque la norma (EN 14081-2) defina que se debe obtener regresiones lineales entre Propiedades Indicadoras (IP) y todas las variables de resistencia del material (módulo de elasticidad, resistencia y densidad), se espera que los módulos de elasticidad se correlacionen mejor (mayor  $R^2$ ) con los métodos no destructivos.

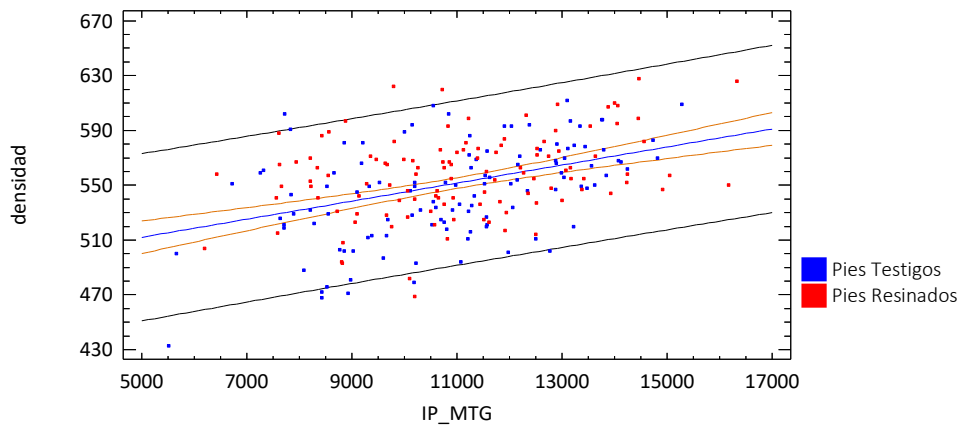
Las gráficas a continuación (Figura 8) muestran las regresiones lineales entre las propiedades resistentes ( $MOE_{GLOBAL}$ ,  $MOE_{LOCAL}$ , MOR y densidad) y las propiedades indicadoras (IP) obtenidas por los ensayos con los equipos no destructivos (MST y MTG) en la muestra total de tablas de *Pinus pinaster*. Los puntos rojos de la gráfica se refieren a la muestra de tablas procedentes de los Pies Resinados, los azules se refieren a la muestra de tablas procedentes de los Pies Testigos.



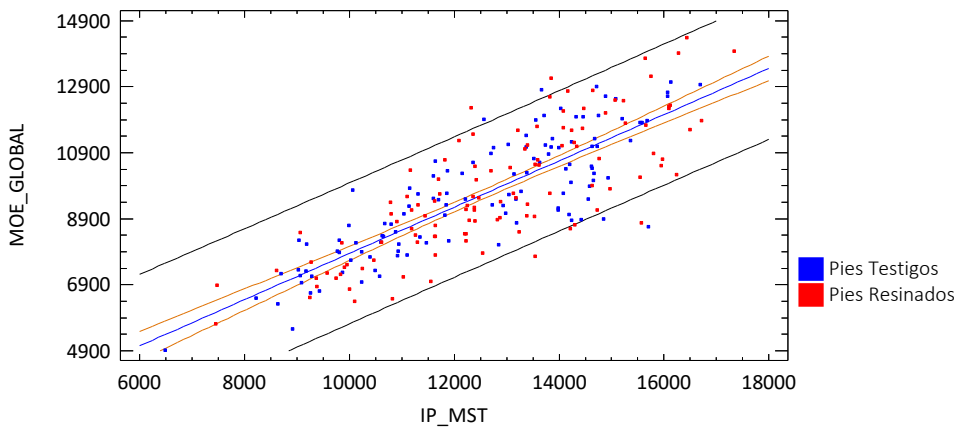
IP\_MTG X MOR

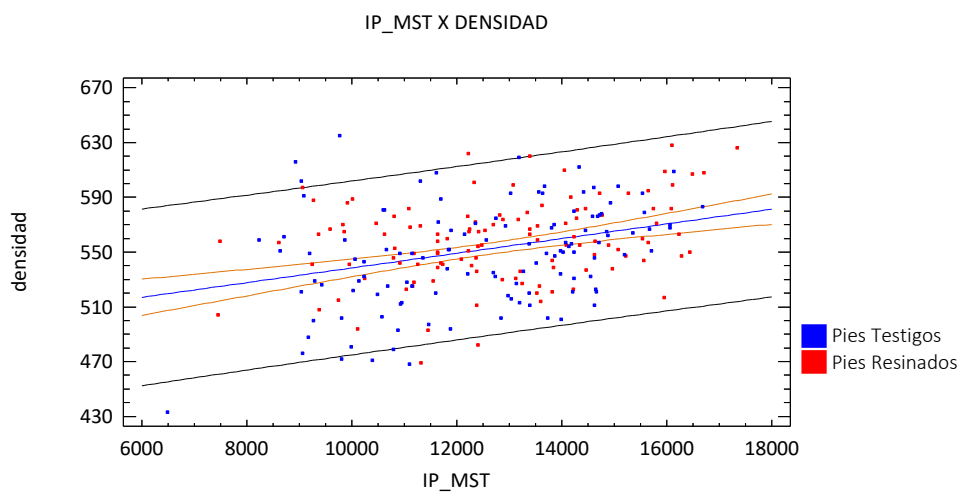
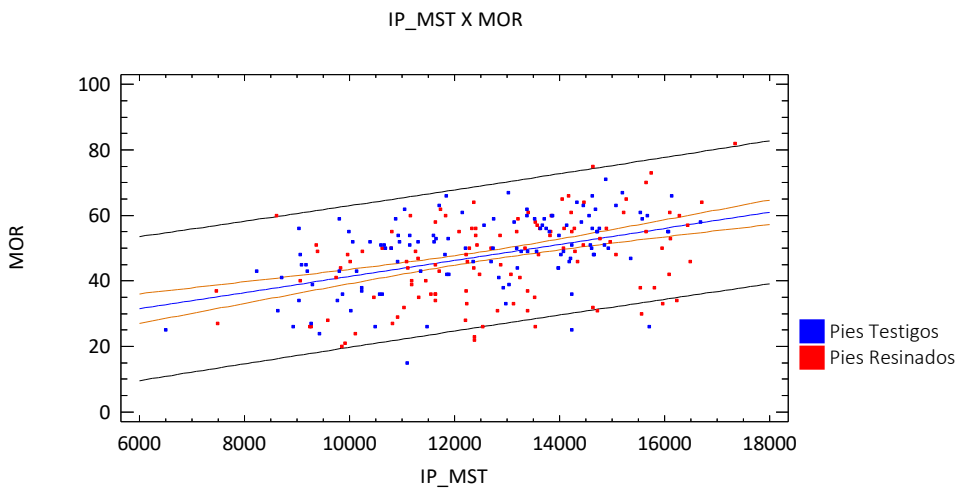
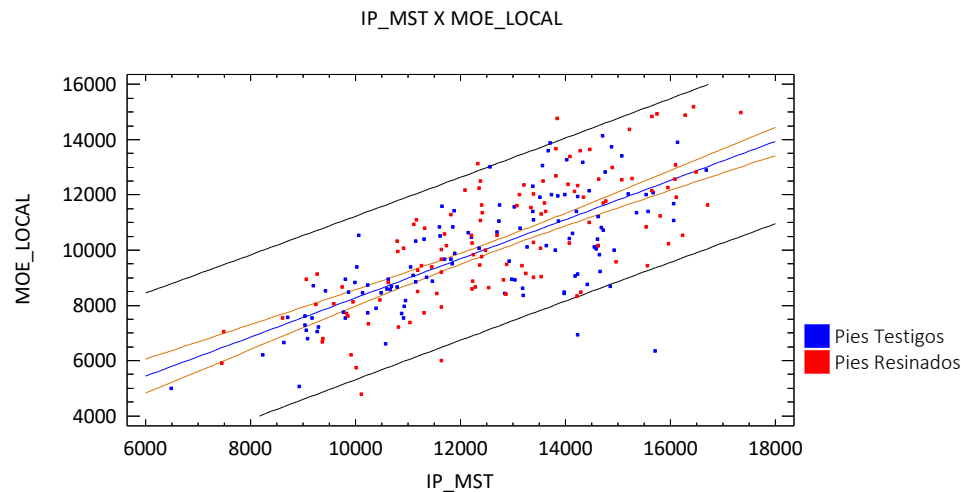


IP\_MTG X DENSIDAD



IP\_MST X MOE\_GLOBAL





**Figura 8.** Gráficos de las regresiones lineales entre las propiedades resistentes ( $MOE_{GLOBAL}$ ,  $MOE_{LOCAL}$ , MOR y densidad) y las propiedades indicadoras (IP) obtenidas por los ensayos con los equipos no destructivos (MST y MTG) en la muestra total de tablas de *Pinus pinaster*.

Los gráficos muestran las líneas de tendencia de las regresiones (azules) y dos conjuntos de límites para cada regresión. Los límites internos (líneas rojas) establecen intervalos de confianza del 95 % para los valores medios de Y en cualquier X seleccionado. Dado que las relaciones son lineales, dichos límites indican qué tan bien se han estimadas las líneas de tendencia. Cuanto mayor sea la muestra, más estrictos serán

esos límites. Las líneas exteriores (negras) son los límites de predicción del 95% para nuevas observaciones. Se estima que el 95% de las observaciones adicionales, similares a las de la muestra, estarían dentro de esos límites.

Se observa en los gráficos de regresión lineal que la distribución de los datos procedentes de los pies resinados (puntos rojos) y testigos (puntos azules) son muy similares, lo que indica que la actividad resinera no afecta en la eficacia de la clasificación mecánica de la madera de *Pinus pinaster*.

## CONCLUSIONES

De manera general, no se aprecian diferencias numéricas y de distribución en los datos obtenidos en la caracterización y clasificación mecánica de la madera proveniente de pies resinados y pies testigos.

- Los valores medios de las propiedades resistentes ( $MOE_{GLOBAL}$ ,  $MOE_{LOCAL}$ , MOR y densidad) no presentaron diferencias numéricamente significativas entre material resinado y no resinado de ambas procedencias. Las distribuciones de frecuencia de las dos muestras son similares.
- Con relación a la clasificación mecánica, los valores de coeficiente de correlación ( $R^2$ ) entre las propiedades indicadoras ( $IP_{MTG}$  y  $IP_{MST}$ ), y las propiedades resistentes ( $MOE_{GLOBAL}$ ,  $MOE_{LOCAL}$ , MOR,  $\rho$ ) obtenidos para la muestra total de tablas están dentro de los límites esperados, lo que indica que los parámetros acústicos no están influenciados por la actividad resinera.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

EN 338: 2016. Structural timber. Strength classes. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 384: 2016+A1:2018/A2:2022. Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 408: 2010+A1:2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

UNE 56544: 2022. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de conífera. Asociación Española de Normalización (AENOR), Madrid, España.

EN 1912:2012. Structural Timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 14081-1:2016+A1:2019. Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 14081-2: 2019. Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 2: Machine grading; additional requirements for type testing. European Committee of Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

ANEXOS

Proyecto: **GO Acero**  
 Procedencia: **Polanco**  
 Fecha: **jun/2022**  
 Especie: **P. pinodes**  
 Dimensiones: **45 x 110**  
 Tipo de Ensayo: **Flexión**

Tabla	MOE Local	MOE Global	MOR	Tipo de Rotura		Observaciones
				Flexión	Comp.	
1A1	11913	10680	69117		X	
1A3A	11196	10351	56417	X	X	
1A3B	10169	10004	50117	X		destrucción de fibra
1A4A	8160	8395	4941	X		mudo
1A4B	8640	8602	37110	X		mudo / destrucción circulares?
1A5						
1A6A	9084	9113	5451		X	
1A6B	11185	10630	5930	X		
2A1	11454	10589	60973		X	
2A2A	11197	13265	5994			
2A2B	12904	11741	5635	X		
2A5	11656	10942	55116		X	
2A6	14558	10983	6034	X		mudo
2A7	12557	11628	6099	X		
2A8	datos no	de grabacion				
3A2A	8055	8319	6145			
3A2B	12012	11973	4751	X		
4A1	11755	11009	6413	X		
4A2A	9878	9373	6171	X		
4A2B	9881	9005	5002	X		
4A4	11898	11153	59116	X		
4A5A	9050	9155	4408	X		carne
4A5B	10492	9184	4351		X	
4A6A	10105	9607	4304	X		
4A6B	9550	8642	5589	X		
5A1	11399	13645	5672	X		
5A2A	9145	9377	5222		X	
5A3B	7541	7424	3635	X		mudo / carne
5A6	11451	11198	5675		X	
6A1A	8424	7976	4011	X		mudo / destrucción



Proyecto:   
 Especie:   
 Procedencia:   
 Dimensiones:   
 Fecha:   
 Tipo de Ensayo: Flexión

Tabla	MOE Local	MOE Global	MOR	Tipo de Rotura		Observaciones
				Flexión	Comp.	
7A1A	X	8057	7710	4052	A	
7A1B	X	9442	9228	5193	X	
7A2	X	11096	10185	5326	A	
7A3	X	10984	12230	5738	X	
7A4	X	11385	10714	3595	X	mudo/duración
8A1A	X	11760	10914	56114	X	
8A1B	X	12710	11721	4849	X	
8A2A	X	8107	8496	4425	X	
8A2B	X	10810	10027	5237	X	
8A3A	X	9999	9925	4716	X	
8A3B	X	7079	3206	4640	X	
8A5	X	10217	9863	6061	X	
8A6A	X	12450	11406	5706	X	
8A6B	X	9836	9351	5062	X	
8A7A	X	8176	7867	4122	X	
8A7B	X	8253	8054	5109	X	
8A8	X	11578	11254	6122	X	
9A1	X	8391	8467	5002	X	
9A2A	X	10180	9224	5207	X	
9A2B	X	7345	6737	4064	X	
10A1	X	13683	12484	5529	X	
10A2A	X	10102	9374	4924	X	
10A2B	X	10259	10065	5656	X	
10A3	X	12679	11853	6055	X	
10A6A	X	8580	8564	4593	X	
11A4B	X	9576	7959	4243	X	
11A5A	X	11286	10715	5946	X	
11A5B	X	10628	9443	4223	X	
11A6	X	11102	10706	6669	X	
11A8A	X	9210	8601	4797	X	

Tipo de Ensayo: Flexión

Especie:  
Dimensiones:

Proyecto:  
Procedencia:  
Fecha:

Tabla	MOE Local	MOE Global	MOR	Tipo de Rotura		Observaciones
				Flexión	Comp.	
1B1 ✓	10749	10044	60,43		✓	
1B2A ✗	8283	8461	50,99		✗	nudo
1B2B >	8222	8093	48,12		✓	destr. / nudo
1B3A	9584	9029	57,67			
1B3B >	7357	7775	46,55		✓	Rotura por nudo
2B1 >	12863	1198	56,00		✗	
2B2 >	11671	9396	33,22		✓	nudo
2B3 ✗	13762	11952	60,68		✗	
3B4	1436	13115	70,21			
3B5 >	11729	10045	49,68		✗	
4B3 ✗	10361	8959	35,08		✗	nudo
4B4B >	404177					
4B5B	9645	8586	31,97		✗	nudo / desviación
4B8 ✗	882	825	39,59		✗	Rotura por desviación / nudo
5B2A >	12515	11698	55,92			
5B2B >	11035	9795	51,38		✗	
* 5B3A	8698	8087	41,42		✗	Pegajosa Desviación por nudo
5B3B ✗	8526	8471	30,82		✗	
* 5B6A	12134	9251	54,08			
5B6B >	11384	10383	48,22		✗	
5B7 >	13128	11770	64,05		✗	Crack
✓ 6B1	10642	8826	22,59		✗	Rotura Flexión Nudo Inferior
* 6B2A	9558	8344	28,87		✗	Rotura Desviación Nudo
6B2B >	8715	7247	25,62		✗	desviación de fibra / nudo
6B3A	2003	8814	22,11		✗	nudo / Rotura flexión de estiramiento
6B3B >	11643	10990	54,53		✓	nudo
6B4B	6764	6594	27,06		✗	* Nudo fuerza de tracción: Descomposición = 18 cm
6B6A ✗	9242	8862	39,60		✗	desviación de fibra
6B6B ✗	7322	6840	43,80		✗	
3B3 >	12979	11959	55,25		✗	

Proyecto:  
Procedencia:  
Fecha:

Especie:  
Dimensiones:

Tipo de Ensayo: Flexión

Tabla	MOE Local	MOE Global	MOR	Tipo de Rotura		Observaciones
				Flexión	Comp.	
7B1 X	13560	11753	59,28	X		
7B3 X	11628	10718	54,27	X		
7B4	8718	8546	51,04	X		
7B5 X	10934	11326	58,74		X	
7B6A X	9749	9391	49,26	X		
7B6B X	9780	10052	55,80	X		
8B1A X	9349	9552	47,69	X		
8B1B X	8504	8632	32,69	X		nudo
8B2A X	6814	6769	39,33	X		crack / desviación
8B2B X	8416	7880	35,95	X		nudo
8B3A X	10074	10278	45,61	X		
8B3B X	10978	10165	47,49	X		nudo
8B6 X	9302	9114	62,75	X		
9B2 X	8110	6954	36,13	X		
9B3A X	10107	9165	49,80	X		
9B3B X	8135	7064	25,62	X		
9B4A X	7071	7069	34,06	X		nudo / desviación
9B4B X	9030	7362	30,69	X		crack / nudo / desviación
9B5A X	8429	8614	37,97	X		crack
9B5B X	8194	6449	23,68	X		crack
9B7 X	8180	7898	43,15	X		nudo / crack
10B2A X	10403	10798	66,36	X		
10B2B X	11843	11761	66,85	X		
10B3 X	11614	11455	63,39	X		
10B4 X	9763	9153	59,77		X	
10B5	8864	9856	47,82	X		desv / nudo
11B1 X	12557	11414	63,64	X		
11B2A X	1510	10657	60,08	X		
11B2B X	12420	11310	48,56	X		nudo
12B3 X	10605	984	19,00		X	



MAN

Tabla	MOE Local	MOE Global	MOR	Tipo de Rotura		Observaciones
				Flexión	Comp.	
14A1	12442	11257	45,88	x		t = 227 mudo
14A2	x 14551	12894	73,38	y	x	t = 624
14A3	y 11872	11462	54,72	x		mudo t = 321 v = 7,5 Retenido 8kN
14A4	14729	13746	81,62			
14A5	5864	8161	45,21	x		mudo t = 448
14A6	x 11574	11985	63,24	y		t = 291
15A1	x 11786	10267	54,20	y		370
15A2	y 7874	6383	25,79	x		mudo t = 229
15A3	x 9761	8872	51,77	x		t = 459
15A4	y 12299	11528	64,92	x		t = 445
17A1	x 10742	11373	50,63	x		t = 305 v = 7 Retenido 8kN
17A2	y 10989	10656	37,59	y		t = 185
18A1	y 12252	11925	42,23	x		t = 208 madero general
18A2	y 13254	10927	56,31	x		t = 314
18A3	9717	9280	42,16	x		t = 287
18A4	8799	7556	25,51	y		t = 166
18A5	x 10038	9125	31,05	x		t = 185
18A6	x 11493	10472	52,86	x		t = 329
18A7	y 10574	9913	37,79			t = 233
13A1	x 10965	10394	59,62	x		t = 431
13A2	x 8650	8031	33,05	y		mudo t = 234
13A3	x 11052	10297	58,37	y		t = 464
13A4	x 12263	12479	74,79	y		t = 577
13A5	7932	7344	48,37	x		t = 484
16A1	y 8035	7495	34,61	x		mudo t = 268
16A2	6022	7205	20,56	y		t = 146 mudo
16A3	x 6524	6925	50,81	x		t = 539
16A4	x 5856	6672	46,35	x		t = 704
16A5			45,72	x		no x curvatura 0 ... .. 1. ... ..

Tabla	MOE Local	MOE Global	MOR	Tipo de Rotura		Observaciones
				Flexión	Comp.	
15B1	7875	7094	27,98	>	-	k = 203
15B2	7017	6308	27,18	>	-	mudo k = 237
15B3	8674	8053	50,20	>	-	k = 421
15B4	10021	8969	37,14	>	-	t = 227
15B5	8261	8923	39,30	>	-	t = 322
16B1	6610	6663	49,33	>	-	t = 507
16B2	8973	8479	63,67	>	-	t = 420
16B3	9594	9078	46,18	>	-	t = 258
16B4	7137	7196	48,73	>	-	t = 453
16B5	5785	5587	36,91	>	-	t = 414
17B1	11775	12399	66,09	>	-	k = 383
17B2	9172	8538	30,02	>	-	t = 176
17B3	11350	11577	64,03	>	-	t = 449
17B4	10254	9976	34,12	>	-	t = 176
17B5	9196	9187	45,17	>	-	k = 304
3B1	7186	8186	48,93	>	-	t = 259
3B2	4664	6229	24,27	>	-	t = 217
3B3	9237	11289	50,44	>	-	t = 308
3B4	9958	10405	32,88	>	-	t = 379
3B5	8191	8705	54,39	>	-	k = 496
3B6	9935	9675	32,47	>	-	mudo k = 168
4B1	11585	10795	46,19	>	-	t = 253
4B2	12112	10913	42,37	>	-	k = 218
4B3	8183	6805	36,45	>	-	mudo k = 308
4B4	8442	6926	40,64	>	-	t = 376
4B5	7180	6946	32,15	>	-	t = 256
8B1	10183	8171	28,32	>	-	t = 206
8B2	9350	8086	35,53	>	-	t = 254
3B3	11579	9070	21,00	>	-	

Tabla	MOE Local	MOE Global	MOR	Tipo de Rotura		Observaciones
				Flexión	Comp.	
21A1	10492	10868	55,07	>		t = 358
21A2	12585	12649	57,17	>		t = 300
21A3	12198	11380	62,32	>		t = 391
21A4	8773	8136	42,71	>		t = 337
21A5	10143	10224	50,06	x	x	t = 318
21A6	12552	11764	55,74	x	>	t = 472
23A1	13497	12406	70,86	>		k = 577
23A2	9107	8777	61,99	x		t = 606
23A3	10490	10988	62,16	>	>	t = 584
23A4	9728	10557	54,87	>	x	t = 456
23A5	6471	6150	30,70	x		k = 266
19A1	8444	8501	49,93	>		t = 496
19A2	7356	7130	41,75	>		k = 451
19A3	7360	7674	42,63	>		t = 484
19A4	7533	8310	58,50	y		k = 591
19A5	6041	6318	43,02	x		k = 446
19A6	4886	4801	24,88	x		k = 283
19A7	7780	7623	62,37	x	y	k = 491
19A8	6938	7012	47,64	>		t = 591
19A9	7940	7896	51,55	x	>	t = 574
20A1	9773	9615	51,03			t = 304
20A2	8470	8665	50,79	>		t = 348
20A3	11745	11549	61,00	y		t = 405
20A4	13511	12661	66,42			k = 425
20A5	9842	10281	56,15	x		t = 441
20A6	9730	9858	49,73	x		t = 305
20A7	8522	8645	57,52	.		t = 478
22A1	8605	9008	53,72	x		t = 371
22A2	12522	9937	54,04	>		t = 429

Tabla:

Tabla	MOE Local	MOE Global	MOR	Tipo de Rotura		Observaciones
				Flexión	Comp.	
19B1	7567	7735	34,21	x		t = 251
19B2	6606	6775	45,04	x		t = 652 v = 5
19B3	9826	10363	45,72	x		v = 7,5 t = 286
19B4	7442	8068	56,23	x		t = 582
19B5	4938	5404	25,74	x		mado interno (rodado)
19B6	8396	9250	49,67	x		t = 365
20B1	8220	8930	43,53			t = 341
21B1	8245	8957	43,53	x		t = 342
21B2	11755	11565	60,38	x		t = 374
21B3	6767	8623	25,12	x		t = 172
21B4	10751	12365	34,93			t = 356
21B5	11365	12270	55,14	x		t = 292
21B6	6164	8418	26,42	x		t = 163
24B1	<del>8632</del>	8507	54,78			t = 514
24B2	8809	7570	44,52	x		mado t = 108
24B3	8219	8033	59,44			t = 586
24B4	6902	6511	27,33	v		t = 346
24B5	7072	6499	20,93	x		t = 282 mado no hay NDT
24B6	7798	7756	54,00	x		t = 709 mado parcial
22B1	8732	9425	39,22	x		t = 235
22B2	10297	9111	50,04	x		t = 357
22B3	8709	8028	25,79	x		t = 164
22B4	10609	10087	57,71	x		t = 392
22B5	11181	10132	53,23	x		t = 343
23B2	9408	9119	37,65	x		t = 231 mado puntal
23B1	11651	10475	59,18	x		t = 459
23B3	10831	11103	60,44	x		t = 400
23B4	8432	8036	51,02	x		t = 510
23B5	9301	9102	55,39	x		t = 455