

CLASIFICACIÓN DE LA MADERA DE *Pinus sylvestris* L. MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

- 1.- L. Acuña
- 2.- A. Llorente
- 3.- C. Herrera.
- 4.- M. Casado

1 y 4.- Universidad de Valladolid E.T.S. de Ingenierías Agrarias.

Avd de Valladolid 57, 34071 – Palencia

2.- BMC Maderas

Polígono San Cristóbal – c/Aluminio, 5 (parc320); 47012 – Valladolid

3.- Cidenco.

Polígono Industrial Landeta s/n. 20730 – Azpeitia (Guipúzcoa)

Keywords: madera, *Pinus sylvestris*, ultrasonidos, resistencia

RESUMEN

El presente trabajo compara los métodos de clasificación de madera de uso estructural de *Pinus sylvestris* L. atendiendo a criterios de clasificación visual, físicos y mecánicos. Se ha utilizado un equipo emisor-receptor de ultrasonidos para la determinación indirecta de la resistencia de la madera (MOE), calculándose posteriormente el módulo de elasticidad de las piezas en una máquina universal de ensayo. La correlación existente entre el MOE y las variables velocidad de propagación de la onda y peso específico fue significativa, obteniéndose un valor de $R^2 = 0,71$.

SUMMARY

In this paper it has been analyzed and compared the different methods of classifying structural use wood, attending to visual, physic and mechanical aspects of *Pinus sylvestris* L. An ultrasound equipment has been used for the indirect determination of wood resistance (MOE) obtaining afterwards the elasticity modulus in the universal electromechanic testing machine. The correlation between MOE and the variables: wave speed propagation and specific weight is significative with an R^2 value of 0,71

INTRODUCCIÓN

La madera es una materia prima que ha sido utilizada de forma permanente a lo largo de la historia de las civilizaciones. Su tecnología ha ido evolucionando y han ido surgiendo nuevos productos que han ampliado su campo de aplicación, así como complementándose con otros materiales para mejorar sus prestaciones. La preocupación que en la actualidad existe por la restauración y mantenimiento del patrimonio histórico arquitectónico es, afortunadamente un hecho, pero ese esfuerzo conlleva a un elevado coste económico que en muchas ocasiones es obligatorio minimizar. La madera, como material orgánico, puede ser atacado por organismos vivos o sufrir alteraciones físicas y químicas, dando lugar a la aparición de defectos y singularidades (azulado, bolsas de resina...).

Durante el proceso de aserrado del tronco para obtener piezas de madera escuadrada, también aparecen algunas singularidades; así, las ramas se traducen en nudos o las fibras se cortan formando un ángulo con la directriz de la pieza. Por este motivo, la variabilidad de las propiedades mecánicas de la madera aserrada es mayor que en forma de rollizo. Esta gran variabilidad de las propiedades mecánicas, obliga a clasificar la madera en grupos o calidades, para poder asignarles una resistencia con un nivel de confianza razonable.

La clasificación de la madera con uso estructural comenzó a realizarse mediante la evaluación

visual de los factores que pueden afectar a la resistencia, como ocurre con los nudos. Las primeras reglas detalladas de clasificación se introdujeron en 1923 en Estados Unidos y a partir de los años 30 en varios países europeos. Con el fin de mejorar la precisión de la clasificación, evitando los inconvenientes de la clasificación visual (subjetividad, imprecisión), se desarrollaron diversos procesos de clasificación mecánica. Hasta los años 70, este procedimiento se basaba en el ensayo de probetas de pequeñas dimensiones libres de defectos. Sin embargo, este procedimiento era cuestionado como sistema válido para predecir el comportamiento de la madera de tamaño estructural.

La tendencia actual es ensayar piezas con tamaños y calidades comerciales, basada en la determinación de las propiedades mecánicas en las condiciones más parecidas al destino final de la madera. La imposibilidad de estimar de manera visual esa pérdida en las características físico-mecánicas, hace que sea necesario buscar un medio alternativo de estimación de las mismas. Por ello, el empleo de ensayos no destructivos de la madera, como la utilización de ultrasonidos, permitiría eliminar la incertidumbre entorno a la capacidad resistente de los distintos elementos de una estructura de madera, evitando así, en el caso de madera puesta en obra, tener que proceder al derribo total de los mismos para su sustitución por nuevos elementos.

Aunque no se trata de un método de ensayo ampliamente distribuido, se trata de una herramienta de estimación muy útil para determinar las condiciones de uso que puede presentar una madera.

En este trabajo se han empleado piezas de tamaño estructural (“vigas”) de *Pinus sylvestris* L. procedentes del pinar de Navafría en Segovia. Sobre ellas, se efectuará una clasificación visual (norma UNE 56544), que permita diferenciar las que van a ser apropiadas para su uso en estructuras. Estas piezas deberán cumplir unas características de resistencia que vienen exigidas por la norma UNE EN 338.

Posteriormente, sobre esas mismas piezas, se realizan los ensayos mecánicos que nos permiten determinar sus características resistentes reales. Finalmente, haciendo uso del equipo de ultrasonidos, se compararán las características resistentes con las obtenidas y las determinadas por ensayo mecánico, pudiendo así comprobar si existe una correspondencia determinante entre ambas.

OBJETIVOS

Se pretende analizar la relación existente entre el módulo de elasticidad estático obtenido según el ensayo de flexión U.N.E.56-537-79 y la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas, obtenida con el Sylvatest, en dirección axial para la madera de *Pinus sylvestris* L. (pino silvestre) de calidad media/baja procedente del pinar de Navafría en Segovia.

La posibilidad de cálculo del módulo de elasticidad estático de la madera a partir de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas, no solo permite conocer las características elásticas de una viga de pino silvestre, o de cualquier otra madera, sin tener que deteriorarla, sino que además podría permitir establecer un sistema de clasificación de la madera más objetivo y preciso que el sistema de clasificación visual establecido por la norma UNE 56544.

Es igualmente de interés, el estimar la relación existente entre la clasificación obtenida a través del sistema de clasificación visual (norma UNE 56544) y la obtenida a través del Sylvatest, de forma que se pueda comprobar la utilidad del método de ensayo no destructivo mediante ultrasonido como sistema válido para conocer el comportamiento de la madera de tamaño estructural y como sistema adecuado y preciso de clasificación de la misma.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se ha realizado con una partida de madera comercial de *Pinus sylvestris* L. de dimensiones estructurales procedente del pinar de Navafría en Segovia. Las clases resistentes a las que pertenece el pino silvestre según la norma UNE EN 338 son la C18 y la C30 (que se corresponden con la ME2 y la ME1 de la norma UNE 56544 respectivamente), estableciéndose como valores característicos de resistencia a flexión en N/mm^2 y de módulo de elasticidad en KN/mm^2 los que aparecen recogidos en la tabla 1.

	C30	C18
FLEXIÓN ($f_{m,k}$)	30	18
Módulo de elasticidad paralelo medio ($E_{o,medio}$)	12	9
Módulo de elasticidad paralelo en el quinto percentil ($E_{o,k}$)	0	6

Tabla 1: Valores característicos de resistencia a flexión en N/mm^2 y valores medios y característicos de módulo de elasticidad en KN/mm^2 .

El ensayo mediante ultrasonidos se ha realizado con un equipo emisor-receptor de ultrasonidos “Sylvatest”, figura 1. Este aparato utiliza un generador de ultrasonidos, y con ayuda de un palpador emisor y de un palpador receptor situados a una distancia fija, mide el tiempo en μs que tarda la onda en llegar de uno al otro. En función de esa información, y de otros datos como la especie, la longitud y la geometría de la sección de la viga que se esté ensayando, el Sylvatest permite calcular el módulo de elasticidad del material.

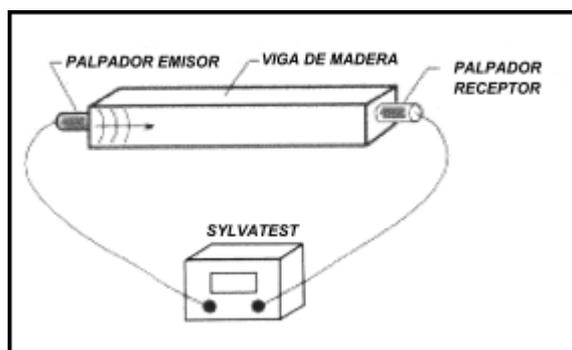


Figura 1.- Sistema de medida por ultrasonidos (Sylvatest)

Para obtener el módulo de elasticidad a través del ensayo destructivo UNE 56-537-79 se ha utilizado una máquina universal de ensayos. El ensayo determina la carga que se aplica sobre la pieza, la deformación que ésta sufre y el desplazamiento vertical del punto medio de la pieza hasta la rotura (carrera), obteniéndose a partir de ello el módulo de elasticidad según lo establecido por la norma.

Clasificación visual

Tras la recepción de las de *Pinus sylvestris* L. procedentes del pinar de Navafría (Segovia), se procedió a realizar la clasificación visual de cada una de ellas, según lo establecido en la norma UNE 56544. Para ello se anotaron en unas fichas las singularidades o defectos presentes en cada una y que pueden afectar a sus características resistentes. Una vez examinadas cada una de las piezas se adjudicó su pertenencia a alguna de las calidades establecidas por la norma, ME1 o ME2, o bien, queda fuera del uso estructural.

Ensayo mediante ultrasonidos

Como se ha comentado, el equipo de ultrasonidos Sylvatest mide el tiempo que la onda ultrasonido tarda en llegar del palpador-emisor al palpador-receptor. Conocida la distancia entre los palpadores, se halla la velocidad de propagación de la onda como sigue:

$$V_L = \frac{d}{t}$$

donde:

d = Distancia entre palpadores en mm

t = Tiempo que tarda en percibir el palpador-receptor la onda emitida por el palpador-emisor.

El análisis teórico de la propagación de una onda de ultrasonido a través de un material, propone que el módulo de elasticidad del material es proporcional al módulo de elasticidad dinámico, es decir sin corregir con el coeficiente de Poisson (ORS MARTINEZ, 1986).

El MOE dinámico es igual a: $MOE_d = v^2 \text{ (m/s)}^2 * \rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$

v = Velocidad de propagación de las ondas ultrasonido a través del material en m/s.

ρ = Densidad de la viga ensayada

Asumiendo que existe una relación proporcional entre el módulo de elasticidad estático y el dinámico, se puede escribir la siguiente ecuación:

$$MOE \text{ (Pa)} = C \cdot MOE_d \text{ (Pa)} = C \cdot [v^2 \text{ (m/s)}^2 \cdot \rho \text{ (kg/m}^3\text{)}]$$

De esta manera, conocida la densidad de la madera y la velocidad de propagación de la onda obtenida mediante el Sylvatest, se puede obtener el módulo de elasticidad dinámico.

Módulo de elasticidad medio

Realizado el ensayo por ultrasonido se procedió a evaluar el módulo de elasticidad. Dicha evaluación se deduce a partir de las deformaciones medidas sobre un tramo de longitud igual a cinco veces el canto (I_1), es decir 500 mm, centrado respecto a la longitud de la pieza. La medición se efectúa con una regla quebrada soportada en puntos cercanos a la línea neutra, figura 2, y aplicando la expresión correspondiente se deduce el módulo de elasticidad. El captador de deformación recoge los datos necesarios que determinan la recta de regresión.

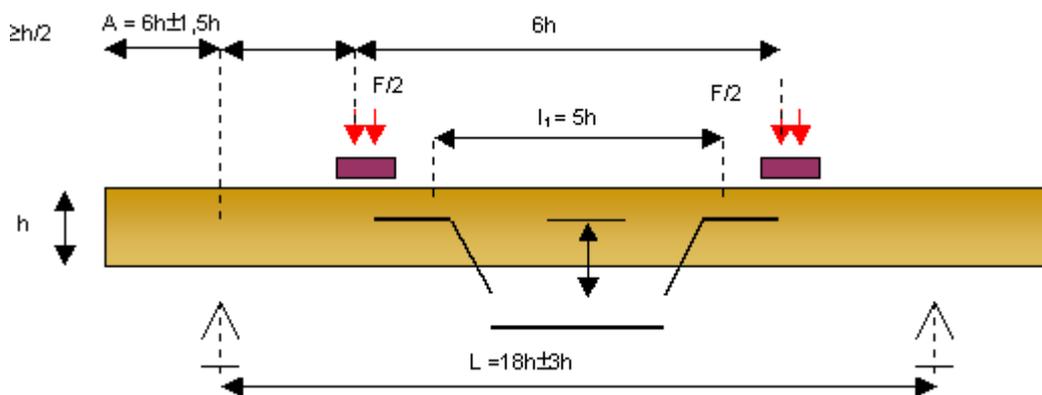


Figura 2: Esquema del ensayo a flexión

Relacionando el módulo de elasticidad dinámico obtenido para las distintas vigas, con el módulo de elasticidad estático obtenido con la máquina de ensayos universal, se puede hallar el coeficiente C que me permita estimar el módulo de elasticidad estático de una pieza de pino silvestre sin necesidad de tener que destruir la pieza en el ensayo.

En la tabla 2, recogida en los anejos, aparecen los datos del MOE estático, de la densidad de la madera de cada viga y de la velocidad de la onda en el ensayo mediante ultrasonidos

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Mediante un análisis de regresión múltiple se ha determinado la relación existente entre el MOE, calculado mediante ensayos mecánicos, y la velocidad de propagación de la onda de ultrasonidos y el peso específico de cada viga, obteniéndose:

$$\text{MOE} = -11678,8 + 3,71521 * (\text{velocidad})^2 + 19,063 * \text{peso específico}$$

Encontrando un valor para R^2 de 0,7032 y habiéndose comprobado a través del análisis de la varianza que la relación entre las variables es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 99%.

Igualmente se comprueba, comparando con la clasificación visual habitual, que la “eficacia” del método de clasificación por ultrasonidos es máxima para vigas que presenten singularidades o defectos importantes (vigas rechazadas para uso estructural) o que prácticamente no presenten ninguno (clase ME1). Aparecen algunos sesgos en aquellas vigas en que la clasificación visual las ha encuadrado en la clase ME2, que por el método de ultrasonidos se podrían encuadrar en la clase superior.

BIBLIOGRAFÍA

ACUÑA RELLO, L y HERRERA CALVO, C.

Influencia del azulado en las características resistentes de la madera para uso estructural
II Simposium Nacional de Protección de la madera en la construcción. 1999.

AENOR

Madera para construcción. Recopilación de normativa
Madrid, 1997

ARGÜELLES ALVAREZ, R. ARRIAGA MARTITEGUI F.

Curso de diseño y cálculo de estructuras de madera. COAM
Madrid, 1988

ARRIAGA MARTITEGUI, F.

Estructuras de madera. Volumen I y II. 1986

FERNÁNDEZ GOLFÍN, J.I , DIEZ, M.R. Y GUTIERREZ, A.

Caracterización mecánica de la madera aserrada de pino silvestre de los sistemas Central e Ibérico
mediante probetas de tamaño estructural
INFOR – INIA, Madrid

GARCÍA ESTEBAN, L. Y GUINDEO, A.

Anatomía e identificación de las maderas de coníferas españolas
AITIM, 1988

HOFFMEYER, P

Wood as a building material
Timber Engineering STEP 1, 1995

JOHNSON, H.

La madera.
BLUME. Barcelona, 1994

KOLLMAN, F

Tecnología de la madera y sus aplicaciones Vol. I
IFIE, Madrid, 1959

MADSEN, BORG

Structural behaviour of timber.
Timber Engineering LTD. Canada, 1992

Normas UNE EN

USDA, “Stress wave timing nondestructive evaluation tools for inspecting historic structures”, 2000

ANEJOS

N° viga	Tiempo que tarda onda (μs)	Longitud de la viga (m)	Peso específico	$V^2 * \rho$ (m/s)² * (Kg/m³)	MOE Estático (N/mm²)
3	202.8	1.14	593.44	1875213.05	11249.55
7	245.2	1.355	515.32	1573673.59	9056.75
9	202.4	1.088	501.40	1448842.26	8625.11
10	251.8	1.36	541.46	1579547.70	8139.14
13	226.2	1.323	477.96	1635031.18	10486.87
13	207.6	1.23	477.96	1677826.61	10486.87
18	192.2	1.122	447.86	1526234.35	8321
20	212.8	1.105	473.85	1277680.29	7035
20	200	1.121	473.85	1488648.34	7035
22	184	1.073	541.91	1842847.34	11298
24	246.6	1.271	460.83	1224181.19	6451.15
26	225.4	1.059	525.92	1160923.98	5735.16
27	203.2	1.145	553.12	1756236.21	10185.24
30	203.2	1.056	473.39	1278496.40	7417.1
37	228	1.31	512.90	1693189.62	11861.26
39	336.2	1.918	514.85	1675646.89	11110.24
42	265	1.514	493.31	1610200.37	10022.6
43	312.4	1.637	423.70	1163412.63	7601.86
46	215.2	1.274	437.52	1533388.61	8153.25
48	241.6	1.367	470.90	1507550.47	8982.19
50	227.2	1.276	498.18	1571342.96	9974.25
62	207	1.122	579.49	1702515.09	10261.77
64	148	0.854	463.55	1543436.96	9322.33
64	214.6	1.24	463.55	1547677.68	9322.33
70	237.8	1.315	477.08	1458878.14	9357.31
77	242	1.36	471.80	1490064.34	9922.67
79	214	1.228	459.90	1514372.09	9823.75
80	221.4	1.217	472.80	1428576.14	7734.92
82	209.8	1.113	514.17	1447058.52	8316.19
85	279.6	1.418	442.60	1138385.98	5896.4
87	204.6	1.103	491.80	1429316.12	7363.29
89	212.3	1.1	493.56	1324612.87	8468.6
95	193.2	1.107	465.00	1526630.56	10326.56
98	254.8	1.287	457.30	1166700.67	7603.57
99	207.2	1.075	473.20	1273744.03	8581.95

100	214.2	1.126	474.01	1309861.42	6072.34
101	255.4	1.26	493.94	1202188.65	7492.52
103	253.8	1.378	473.81	1396752.39	6937.3
104	228.4	1.173	480.16	1266465.67	7836.72
105	262.4	1.406	568.70	1632774.50	10233.38
108	204.2	1.008	541.40	1319252.24	7702.3
109	242	1.281	469.48	1315478.61	8273.88
114	273.8	1.409	521.65	1381440.91	7736.3
116	265	1.52	526.41	1731887.03	12397.51
120	191.6	1.046	481.94	1436366.72	10106.7
121	261.8	1.487	475.65	1534511.52	9213.1
122	239.25	1.263	597.46	1664990.05	9562.62