Relaciones entre las variables clasificadoras de la madera estructural de los pinos silvestre y laricio de procedencia española

Relationships between grade determining properties of spanish scots and laricio pine structural timber

J. I. FERNÁNDEZ-GOLFÍN, M.R. DÍEZ, E. HERMOSO
CIFOR-INIA. Laboratorio de Estructuras de madera

Fecha de recepción: 22-XI-02
Fecha de aceptación: 23-I-03

ESPAÑA

RESUMEN

En una muestra compuesta por 3.312 piezas de madera aserrada de pino laricio (pinus nigra) y 3318 piezas de pino silvestre (pinus sylvestris) de procedencia española y con dimensiones que varían entre 100x40x2.500 mm y 200x70x4.500 mm, previamente ensayada a flexión de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma UNE EN 408, se analizan las relaciones existentes entre las propiedades indicadoras establecidas en la norma UNE EN 338 (resistencia última a flexión, módulos de elasticidad global y local en flexión, densidad).

Adicionalmente a estas variables se determinó también el módulo de elasticidad obtenido mediante la medición de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos generados por un equipo Sylvatest.

El módulo de elasticidad global determinado mediante la medición de la deformación en la fibra neutra demuestra ser el mejor predictor de la resistencia última a la flexión, en tanto que el módulo de elasticidad local resulta ser de difícil ensayo y de inferior calidad predictiva, de donde sugiere su eliminación.

Se concluye también sobre la necesidad de considerar un único ensayo para la determinación del módulo de elasticidad global y la conveniencia de seguir trabajando sobre la determinación del módulo de elasticidad mediante técnicas de ultrasonidos ya que los actuales sistemas disponibles todavía no alcanzan el suficiente grado de precisión.

SUMMARY

In a sample made up of 3312 boards of scots pine (pinus sylvestris) and 3318 boards of laricio pine (pinus nigra Var. Saltzmannii), both of spanish provenance, and ranging in size from 100x40x2500 mm to 200x70x4500 mm, previously tested in accordance with the procedure set forth in UNE EN 408 standard, the relationships between the grade determining properties considered in the UNE EN 338 standard (bending strength, global and local modulus of elasticity in bending, density) are studied.

In addition to these variables, the modulus of elasticity was also considered, calculated by means of the measuring of the transmission speed of an ultrasonic pulse generated by a Sylvatest device.

The global modulus of elasticity calculated by measuring the deformation at the neutral axis seems to be the best predictor of the ultimate bending strength, while the local modulus of elasticity proves to be difficult to obtain, and has a lower predictive quality, and so its elimination is suggested.

The need to consider one single testing procedure to determine the global modulus of elasticity is also analysed, along with the convenience of carrying out further studies regarding the use of ultrasonic techniques in order to predict the modulus of elasticity, due to the fact that the systems available are not sufficiently precise.

PALABRAS CLAVE: madera estructural, pino silvestre, pino laricio, variables clasificadoras

KEY WORDS: structural timber, scots pine, laricio pine, determining properties

1. INTRODUCCIÓN

Desde finales del siglo XIX se tiene la evidencia de la existencia de relaciones altamente significativas entre la resistencia y la rigidez de la madera. De acuerdo con Fewell (1) fueron Bauschinger en 1883 y Unwin en 1888 quienes primero pusieron de manifiesto la existencia de tales relaciones. La bibliografía recoge también los trabajos de Cline y Heim (2), así como los de Chaplin y Latham (3) quienes confirmaron las primeras evidencias de Bauschinger y Unwin. Langlands (4) fue el primero en establecer relaciones de tipo lineal entre los módulos de rotura y de Elasticidad a flexión, usando para ello probetas libres de defectos de pino radiata (*Pinus radiata D. Don*).

Fue en la década de los 60 (Curry, 5) cuando se empezaron a aplicar estos modelos de regresión lineal a madera de tamaño estructural, incorporando de este modo en ellos la incidencia de defectos de tamaño y características reales. El primer trabajo en este sentido recogido por la bibliografía se debe a Hoyle (6), quien obtuvo regresiones de tipo lineal para el alerce, abeto Douglas, abeto rojo y hemlock. Relaciones significativas (R^2 del 49% al 64%) entre los módulos de rotura y de elasticidad a flexión en madera estructural también fueron establecidas por Senft, Suddart y Angleton en 1962 (7).

Este tipo de relaciones también ha sido establecido para otras propiedades y así Hofstrand y Howe (8) obtuvieron relaciones de tipo lineal entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión (R^2 del 40% al 81%) o a la tracción (R^2 del 25% al 64%). Estudios posteriores debidos a Curry y Fewell (9) confirmaron la existencia de tales relaciones entre la resistencia a la tracción paralela y el módulo de elasticidad, si bien empleando ecuaciones del tipo $Y=a \cdot X^b$, con coeficientes de determinación en el entorno del 60-64%.

Con respecto a la posibilidad de emplear relaciones resistencia-rigidez más complejas y supuestamente más precisas, Müller (10) estableció que no es rentable el empleo de una regresión múltiple entre la resistencia, por un lado, y la rigidez y la densidad, por otro, ya que la ganancia en el coeficiente de determinación (R^2) es muy reducida y la complejidad operativa que se introduce en la práctica es muy elevada. Esta conclusión justifica porque no se emplea habitualmente la densidad como variable predictora de la resistencia real de la madera.

Dada la sencillez de su medición y la posibilidad de su determinación por métodos no destructivos, el módulo de elasticidad en flexión, evaluado de diversas formas, ha sido hasta ahora la principal variable empleada en la predicción de la resistencia última a la flexión, con independencia de la clasificación visual de la madera.

1. INTRODUCTION

*Since the end of the XIX century, evidence has shown that there are highly significant relationships between the bending strength and the stiffness of timber. According to Fewell (1), Bauschinger in 1883 and Unwin in 1888 were the first to prove this relationship. The bibliography also includes the works of Cline and Heim (2), and also those of Chaplin and Latham (3), who confirmed what had been previously stated by Bauschinger and Unwin. Based on the use of defect free samples of radiata pine (*Pinus radiata D. Don*), Langlands (4) was the first to obtain linear models between the modulus of rupture and the modulus of elasticity in bending.*

It was during the 1960s (Curry, 5), when these linear regression models were first used on structural timber, including, in this way, the effect of real size defects. The first work included in the bibliography is that of Hoyle (6), who obtained linear models in Larch, Douglas fir, Spruce and Hemlock. Significant relationships (R^2 between 40% and 81%) between the modulus of rupture and that of the modulus of elasticity in bending in structural timber were also found by Senft, Suddart and Angleton in 1961 (7).

This kind of relationship has also been found for other properties, and in this respect linear relationships between the modulus of elasticity and compression strength (R^2 between 49% and 81%) or tension (R^2 between 25% and 64%) were also demonstrated by Hofstrand and Howe (8). Later studies by Curry and Fewell (9) confirmed the existence of these relationships between tension parallel and the modulus of elasticity, using the equation $Y=a \cdot X^b$, with coefficients of determination of around 60-64%.

Regarding the possibility of applying more complex, and, in theory, more precise strength-stiffness relationships, Müller (10) proved that it is not worth using multiple regression between strength, on the one hand, and stiffness and density on the other, as the gain in the coefficient of determination (R^2) is extremely low, and the complexity of doing this is extremely high. This therefore explains why density is not usually used in predicting the real strength of timber.

Due to the fact that the modulus of elasticity in bending is easily obtained and evaluated in different ways by non-destructive methods, this has been the most used to date variable in the prediction of the ultimate bending strength, regardless of the visual grading of the timber.

Métodos tales como la clasificación mecánica automatizada, el empleo de los ultrasonidos o la realización de pruebas de carga, llevados a cabo tanto sobre madera nueva como sobre estructuras en servicio, se basan en la determinación del módulo de elasticidad en flexión de la madera como medio de predecir de forma objetiva y fiable la resistencia última a la flexión de la madera, superando de este modo la tradicional subjetividad de la clasificación e inspección visual de la madera.

Estudios recientemente llevados a cabo (Fernández-Golfín et al., 11) sobre pino laricio han permitido demostrar que la eficacia clasificadora de la norma española de clasificación visual resistente es del 53,2% mientras que la de una máquina tipo Cook-Bolinder que asigna la clase de resistencia en función del módulo de elasticidad mínimo, medido en la cara de la pieza, alcanza un valor de hasta el 84,7%.

La necesidad de la búsqueda de nuevos predictores de la resistencia o de la mejora de los actualmente existentes se hace especialmente patente cuando se trata de estructuras de madera en servicio ya que la evaluación de la capacidad resistente residual y de su estado fitosanitario es un aspecto básico en cualquier obra de rehabilitación.

Para los pinos silvestre (*pinus sylvestris*) y laricio (*pinus nigra saltzmannii*), los más usados estructuralmente en España, y sobre las relaciones entre la resistencia última y el módulo de elasticidad a flexión, el presente trabajo recoge toda la información generada en diversos proyectos de caracterización realizados sobre la base de la misma metodología de ensayo (normas europeas).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

3.312 piezas de pino laricio y 3.318 de pino silvestre, de varias dimensiones y procedencias, fueron ensayadas a flexión y hasta la rotura según los criterios establecidos en la norma UNE EN 408 (12), siendo calculados sus valores de resistencia, módulos de elasticidad y densidad característicos según UNE EN 384 (13). El material ensayado representa adecuadamente las diversas procedencias (zonas de crecimiento) y fuentes de variación conocidas de las propiedades mecánicas y elásticas del material. La Tabla 1 recoge un resumen de las características dimensionales, cantidades y procedencias del material ensayado.

Con carácter previo a su ensayo todas las piezas fueron clasificadas visualmente de acuerdo con la norma española UNE 56.544 (14), que considera dos clases de calidad mecánica: primera calidad (ME1) y segunda

Methods such as the machine strength rating, the use of ultrasound techniques or the carrying out of proof loading tests, applied on both new and structural timber in service, are based on the determining of the modulus of elasticity in bending as a means of predicting, both reliably and objectively, the ultimate bending strength of timber, this way avoiding the traditional subjectivity of the visual grading and inspection of timber.

Recent studies carried out by Fernández-Golfín et al. (11) on the laricio pine have demonstrated the grading efficiency of the spanish standard of visual strength grading to be 53%, whereas the use of a Cook-Bolinder machine, which assigns the strength class in accordance with the minimum value of the modulus of elasticity (measured as a plank), stands at 84.7%.

The need to find new strength predictors, or to improve those already existing, has been particularly apparent when considering timber in service, as the evaluation of the residual strength capacity, and its phytosanitary state are basic factors in any refurbishing work.

*Regarding the relationships between ultimate bending strength and the modulus of elasticity in bending, this study contains all the information compiled throughout different characterization projects, carried out applying the same european procedures (EN standards), regarding the scots (*pinus sylvestris*) and laricio pines (*pinus nigra* var. *saltzmannii*), which are those most used in Spain for structural purposes.*

2. MATERIAL AND METHODS

3312 laricio pine boards and 3318 scots pine boards, of varying sizes and provenances, were tested in bending up to rupture, following the procedure sets forth in the european standard UNE EN 408 (12), calculating their characteristic values of bending strength, modulus of elasticity and density in accordance with UNE EN 384 (13). The material tested, sufficiently represents the different provenances (growth areas) and known variation sources for the mechanical and stiffness properties. Table 1 includes a brief summary of the sizes, quantities, and provenances of the samples tested.

Prior to testing, all the samples were visually graded using the spanish standard UNE 56,544 (14), which considers two classes of mechanical quality: first quality (ME1), and second quality (ME2). The samples

TABLA 1/TABLE 1
Características generales del material ensayado
Characteristics of tested sample

Especie (<i>Species</i>)	Dimensiones (mm) (<i>Sizes (mm)</i>)	Zona de procedencia (<i>Provenances</i>)	Piezas ensayadas (<i>Test samples</i>)
Pino silvestre (<i>Scot pine</i>)	100x40x2500	Montes Universales, Navarra, Navafría	348
	100x50x2500	Montes Universales, Navafría	272
	150x40x3500	Montes Universales, Valsáin, Navafría	387
	150x50x3500	Montes Universales, Navarra, Alava, Soria, Burgos, Rascafría, Valsáin, Navafría	777
	160x60x3500	Alava, Soria, Burgos, Rascafría, Valsáin	507
	150x70x3500	Montes Universales, Valsáin	377
	200x70x4500	Montes Universales, Valsáin	400
	200x50x3500	Montes Universales, Valsáin	250
Pino laricio (<i>Laricio pine</i>)	100x40x2500	Montes Universales, Cazorla	959
	100x50x2500	Montes Universales, Cazorla	315
	150x40x3500	Montes Universales, Cazorla	206
	150x50x3500	Montes Universales, Cazorla	555
	155x55x3500	Montes Universales, Cazorla	276
	150x70x3500	Montes Universales, Cazorla	119
	160x60x3500	Montes Universales, Cazorla	518
	200x70x4500	Montes Universales, Cazorla	142
	200x50x3500	Montes Universales, Cazorla	125
	195x56x3500	Montes Universales, Cazorla	97

calidad (ME2). El material no incluido en alguna de estas dos clases corresponde a los rechazos de la clasificación (MER).

La norma UNE EN 338 (15) de clases de resistencia establece tres “propiedades clasificadoras” para la asignación de una población de madera a una clase de resistencia: resistencia característica a flexión (f_{mk}), módulo de elasticidad longitudinal medio (E_m) y densidad característica (ρ_k). Tal y como se ha apuntado más arriba, la determinación de los valores de dichas propiedades clasificadoras se efectúa mediante ensayo según el procedimiento descrito en la norma UNE EN 408 y cálculo según lo establecido en la UNE EN 384.

Respecto de sus dimensiones, todo el material ensayado cumplía con los requisitos correspondientes a la clase de tolerancia 2 establecidos en la norma UNE EN 336 (16) de dimensiones y tolerancias. Esta clase de tolerancia permite unas desviaciones dimensionales máximas, respecto de las nominales, de 1 mm para anchuras de cara y espesores inferiores o iguales a 100 mm y de 1,5 mm para el resto de dimensiones.

En lo referente al ensayo del módulo de elasticidad en flexión, es necesario considerar que la más reciente

not included in either of these two qualities were those that were rejected in the grading process (MER).

The European standard UNE EN 338 (15) regarding strength classes sets forth three “classifying properties” for the assignment of a timber population to a strength class: characteristic bending strength (f_{mk}), mean modulus of elasticity (E_m) and characteristic density (ρ_k). As mentioned above, the determining of the values of the aforementioned classifying properties are carried out in accordance with the testing procedure described in standard UNE EN 408, and calculated in compliance with that stated in UNE EN 384.

In terms of sizes, all the boards tested complied with the requirements of tolerance class 2 set forth in standard UNE EN 336 (16). This tolerance class 2 permits maximum dimensional deviations, with regard to the target size, of 1mm for thicknesses and widths greater or equal to 100 mm and of 1.5 mm for the remaining dimensions.

Regarding the methodology for testing the modulus of elasticity in bending, it is necessary to bear in mind that

versión de la norma EN 408.rev 1 (año 2000) establece dos formas distintas de efectuarlo (Figura 1):

- **Módulo de elasticidad local (E_{cen})**, midiendo la deformación en un tramo de longitud cinco veces la altura de sección ($5h$) ubicado en el tercio central (entre los puntos de aplicación de la carga) por lo que, por tanto, se trata de un módulo en flexión pura, sin afectación de cortantes. Este ensayo está sujeto a una fuerte variabilidad, está influenciado por el tamaño de las piezas y es caro de realizar, motivo por lo cual su utilidad práctica es cada vez más reducida.

- **Módulo de elasticidad global (E_{mg})**, midiendo la deformación en todo el tramo comprendido entre los apoyos extremos, es decir, dieciocho veces la altura de la sección ($18h$). La deformación que se mide para calcular este módulo global puede ser determinada, a su vez, en la fibra neutra (E_{mg}) o en las zonas extremas (compresión o tracción), siendo lo más frecuente la ubicación del deformador bajo la zona traccionada (E_{mgcto}). Este módulo incorpora en su valor el efecto del cortante.

Los valores del módulo de elasticidad, E_{cen} , E_{mg} y E_{mgcto} , fueron determinados en todas las probetas ensayadas.

Para la asignación de la clase de resistencia según la norma EN 338 no se considera el valor del Módulo local ensayado (E_{cen}) sino el determinado a partir del módulo de elasticidad global (E_{mg}) mediante la expresión establecida en la norma EN 384:

$$E_{ml} = 1,3 \cdot E_{mg} - 2690$$

De acuerdo con lo anterior se entenderá por E_{cen} el valor ensayado del módulo de elasticidad local (de acuerdo con UNE EN 408) y por E_{ml} el valor calculado a partir del Módulo de elasticidad global, mediante la expresión establecida en la norma EN 384.

En la Figura 1 queda recogido gráficamente el sistema de ensayo de los distintos módulos de elasticidad, tanto local como globales.

Figura 1.- Ensayos de los módulos local y global según EN 408.
Figure 1.- testing of global and local modulus in accordance with EN 408.

the most recent version of standard EN 408.rev 1 (year 2000) sets forth two different procedures:

- **Local Modulus of local elasticity (E_{cen})**, by measuring the deformation over a length that is five times the depth of the cross section ($5h$) set in the central third (between the loading points) which therefore results in a pure bending modulus, not affected by shear. The results of this test are highly variable, affected by a size effect and also expensive to carry out, which therefore has resulted in it being little used.

- **Global Modulus of elasticity (E_{mg})**, by measuring the deformation at the centre of a span of 18 times the depth of the cross section ($18h$). The deformation can be measured at the centre of the span and at the neutral axis (E_{mg}) or at the centre of the tension or compression edge, this being the most common situation to place the deflectometer under the tension edge (E_{mgcto}). This modulus includes the effect of shear.

The different modulus of elasticity E_{cen} , E_{mg} , and E_{mgcto} were tested for all the boards.

The value of local modulus of elasticity considered by the standard UNE EN 338 to assign a strength class, is not the tested value (E_{cen}) but that calculated from the global modulus of elasticity (E_{mg}), by means of the expression given in the standard EN 384:

In accordance with that mentioned above, E_{cen} is taken as the value of local modulus of elasticity obtained by testing according to the procedure set forth in the standard UNE EN 408, and E_{ml} is the value calculated from the global modulus of elasticity, according to the expression given in the standard UNE EN 384.

Figure 1 reflects, in graph form, the testing system for the different modulus of elasticity, these being both local and global.

Todo el material presentaba un valor del contenido de humedad, medido en el momento del ensayo, comprendido entre el 10 y el 12%, motivo por lo cual no se efectuó corrección alguna de los valores de las propiedades clasificadoras por este motivo.

Las Tablas 2 y 3 recogen, por calidad visual y procedencia, los valores medios y característicos (subíndice k) de las variables clasificadoras del material obtenidos para las maderas de pino silvestre y pino laricio, respectivamente.

En la Tabla 4 quedan reflejadas las asignaciones de las clases de resistencia de la norma UNE EN 338 a las clases de calidad de la norma UNE 56.544 para los dos pinos en estudio, de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma UNE EN 384.

Adicionalmente a los ensayos anteriores, se efectuaron mediciones de la velocidad de transmisión de ondas

All the material had a moisture content value, measured immediately before testing, of between 10 and 12%, as a result of which the classifying property values were not adjusted to the reference conditions (12%).

Tables 2 and 3 include, by visual grades and provenance, the mean and characteristic (sub-index k) values of the classifying variables of the material obtained from both Scots and Laricio pine.

Table 4 reflects the assignation of the strength grades of standard UNE EN 338 to the quality classes of standard UNE 56.544 for the two types of pine under study, in accordance with the procedure set forth in standard UNE EN 384.

In addition to the tests mentioned above, the speed of transmission of ultrasonic waves was also measured,

TABLA 2/TABLE 2
Valor de las variables clasificadoras según calidades visuales (pino silvestre)
Values of the classifying properties according to visual grades (scot pine)

Procedencia (Provenance)			Variables (Variables)				
Región (Region)	Zona/Calidad (Zone/Quality)		ρ (kg/m ³)		f_m (N/mm ²)		E_{cen} (N/mm ²)
			$\bar{\rho}$	ρ_k	$\bar{f}_m$	f_{mk}	$\bar{E}_{cen}$
2-Alto Ebro	Álava	ME1	570.1	468.5	58.1	32.9	12894
		ME2	518.8	416.0	36.1	18.1	11291
		MER	503.3	443.6	31.6	16.4	10359
3-Pirineo Navarro	Navarra	ME1	564.7	473.9	66.9	33.0	12761
		ME2	542.1	471.3	46.5	25.6	11022
		MER	535.1	467.9	32.0	13.6	8738
8-Soria-Burgos	S.Ibérico	ME1	539.3	435.2	61.8	30.4	12163
		ME2	520.5	426.3	33.8	18.1	10078
		MER	504.2	400.0	24.8	12.8	8644
10-Sª Guadarrama	S. Central	ME1	520.0	423.2	60.8	30.8	13598
		ME2	493.3	415.1	44.4	22.5	11630
		MER	478.9	412.2	27.6	12.4	9593
12- Mtes.Universales	Cuenca	ME1	499.8	408.8	56.6	29.4	12458
		ME2	488.3	411.6	38.4	19.3	10509
		MER	478.5	411.3	28.5	14.4	9175

TABLA 3/TABLE 3

Valor de las variables clasificadoras según calidades visuales (pino laricio)
Values of the classifying properties according to visual grades (laricio pine)

Procedencia (<i>Provenance</i>)			Variables (<i>Variables</i>)				
Región (<i>Region</i>)	Zona/Calidad (<i>Zone/Quality</i>)		ρ (kg/m ³)		f_m (N/mm ²)		E_{cen} (N/mm ²)
7-S.Ibérico	Varías (10)	ME1	604.1	481.1	69.0	38.9	15103
		ME2	555.5	424.9	46.1	22.7	11895
		MER	537.0	457.9	33.4	15.9	11102
8ª.Cazorla	Varías (9)	ME1	593.6	496.7	70.4	35.0	15679
		ME2	571.1	459.6	47.7	21.5	12559
		MER	547.6	472.0	29.7	10.5	10927

TABLA 4/TABLE 4

Asignación de las clases de calidad de UNE 56.544 a las clases resistentes de UNE EN 384
Assignment of visual grades of UNE 56.544 standard to strength classes of UNE EN 384

Especie (<i>Species</i>)	ME1	ME2	Rechazo (<i>Rejects</i>)
P.laricio (<i>Laricio pine</i>)	C35	C18	*
P.silvestre (<i>Scot pine</i>)	C27	C18	*

*La madera de rechazo no debe ser usada con fines resistentes por lo que no existe asignación resistente. (**The rejected timber should not be used for structural purposes, and there is therefore no assignment of strength classes*).

ultrasónicas, empleando para ello un aparato denominado Sylvestest, específicamente diseñado para ser empleado con madera. El módulo de elasticidad así determinado se denomina como E_{sil} .

Por su mayor sencillez de uso y por su adecuado ajuste, para relacionar entre sí las distintas variables en estudio se emplearon únicamente relaciones del tipo $Y = A + B \cdot X$. En este modelo la variable dependiente es siempre la resistencia última a flexión (f_m) y la independiente puede ser el módulo de elasticidad local (E_{cen}), el global (E_{mg} ó E_{mgto}) o el obtenido por ultrasonidos (E_{sil}). Se ha calculado también el modelo de regresión que liga el módulo de elasticidad global (E_{mg}) con el módulo determinado mediante técnicas de ultrasonidos (E_{sil}).

for which a device called a Sylvestest was used, this being specifically designed for testing timber. The resulting elasticity modulus was named as E_{sil} .

Being easy to use and sufficiently precise, the linear model as $Y = A + B \cdot X$ was the only one used to relate the different tested variables under study. In this model the dependent variable is always the ultimate bending strength (f_m), and the independent can be either the local modulus of elasticity (E_{cen}), or the global (E_{mg} or E_{mgto}) or even that obtained by ultrasonic wave transmission methods (E_{sil}). A regression model between the global modulus of elasticity (E_{mg}) and the one found through the use of ultrasonics was also calculated.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las Tablas 5 y 6 recogen el valor de los parámetros, con su nivel de significación, y del coeficiente de determinación de los modelos ajustados por regresión lineal en el conjunto de los datos. En todos los casos el modelo fue estadísticamente significativo al 99%.

De los datos de las Tablas 5 y 6 se desprende que, entre los ensayados, el mejor predictor de la resistencia última a la flexión (f_m) resulta ser, en ambas especies, el módulo global medido en la fibra neutra (E_{mg}), seguido del módulo local (E_{cen}). También se observa que la predicción mediante el módulo global (modelos 1L y 1S) resulta ser más elevada en pino laricio ($R^2=62,74\%$)

3. RESULTS AND DISCUSSION

For the different models fitted to data, by means of linear regressions, Tables 5 and 6 reflect the values of their parameters, including the level of their significance, and the values of the coefficients of determination. In all the cases, the model was statistically significant at a confidence level of 99%.

The information included in tables 5 and 6 demonstrates that, among the variables tested, the best predictor of ultimate bending strength (f_m) is, for both species, the global modulus of elasticity measured at the neutral axis (E_{mg}), followed by local modulus (E_{cen}). It can also be observed that the predicting through global modulus (models 1L and 1S) is better in Laricio pine ($R^2=62.74\%$) than in Scots pine

TABLA 5/TABLE 5
Modelos de regresión (pino laricio)
Regression models (laricio pine)

Relación (Model)	Coeficientes (Coefficients)		R ² (%)
	A	B	
$f_m = A + B \cdot E_{mg}$ (1L)	-18.27 (***)	0.00621 (***)	62.74
$f_m = A + B \cdot E_{cen}$ (2L)	-2.84 (**)	0.00441 (***)	53.41
$f_m = A + B \cdot E_{mgcto}$ (3L)	-14.56 (***)	0.00677 (***)	50.66
$f_m = A + B \cdot E_{sil}$ (4L)	-13.44 (***)	0.00458 (***)	51.03
$E_{mg} = A + B \cdot E_{sil}$ (5L)	952.52 (***)	0.74289 (***)	70.04
$E_{mgcto} = A + B \cdot E_{sil}$ (6L)	1545.96 (***)	0.56877 (***)	65.39
$E_{cen} = A + B \cdot E_{mg}$ (7L)	-2706.21 (***)	1.28963 (***)	80.93
$E_{cen} = A + B \cdot E_{mgcto}$ (8L)	-608.89 (***)	1.29937 (***)	79.20
$f_m = A + B \cdot \rho$ (9L)	-44.39 (***)	0.16878 (***)	30.49
$E_{mg} = A + B \cdot \rho$ (10L)	-3062.05 (***)	26.32960 (***)	30.39

(***) Significativo al 99%/Significant at 99%, (**) Significativo al 95%/Significant at 95%,

(*) Significativo al 90%/Significant at 90%

TABLA 6/TABLE 6
Modelos de regresión (pino silvestre)
Regression models (scot pine)

Relación (Model)	Coeficientes (Coefficients)		R ² (%)
	A	B	
$f_m = A + B \cdot E_{mg}$ (1S)	-14.74 (***)	0.00559 (***)	58.96
$f_m = A + B \cdot E_{cen}$ (2S)	-8.86 (***)	0.00489 (***)	55.32
$f_m = A + B \cdot E_{mgcto}$ (3S)	-10.64 (***)	0.00622 (***)	51.24
$f_m = A + B \cdot E_{sil}$ (4S)	-5.75 (***)	0.00424 (***)	48.59
$E_{mg} = A + B \cdot E_{sil}$ (5S)	2481.22 (***)	0.65781 (***)	68.42
$E_{mgcto} = A + B \cdot E_{sil}$ (6S)	2588.95 (***)	0.55602 (***)	67.19
$E_{cen} = A + B \cdot E_{mg}$ (7S)	-2765.57 (***)	1.28377 (***)	74.36
$E_{cen} = A + B \cdot E_{mgcto}$ (8S)	-786.20 (***)	1.28369 (***)	72.20
$f_m = A + B \cdot \rho$ (9S)	-28.66 (***)	0.14259 (***)	18.42
$E_{mg} = A + B \cdot \rho$ (10S)	-1054.84 (***)	22.0411 (***)	26.29

(***) Significativo al 99%/Significant at 99%, (**) Significativo al 95%/Significant at 95%,

(*) Significativo al 90%/Significant at 90%

que en pino silvestre ($R^2=58,96\%$). Los valores obtenidos para el coeficiente de determinación (R^2) en los modelos 1L y 1S pueden ser considerados como elevados, abriendo la puerta a su consideración para su empleo en obra mediante la realización de pruebas de carga.

La comparación de los coeficientes de determinación de los modelos 1L y 1S con los 3L y 3S permite concluir que la predicción de la resistencia última a flexión de la madera es más adecuada haciendo uso del módulo global medido en la fibra neutra (E_{mg}) que haciendo uso de idéntico módulo pero medido en la cara traccionada (E_{mgcto}).

Respecto de la predicción de la resistencia última a la flexión mediante el uso de técnicas de transmisión de ultrasonidos resulta evidente que la variación del módulo de elasticidad dinámico determinado por esta técnica (E_{sil}) sólo explica entre el 51,03% (P.laricio) y el 48,59% (P.silvestre) de la variabilidad de la resistencia a la flexión, motivo por lo cual su utilidad predictiva es todavía deficiente, estando esta técnica todavía necesitada de mejoras sustanciales para afianzar su utilidad predictiva en obra.

En lo que hace referencia a la predicción del módulo de elasticidad global mediante el uso de técnicas de transmisión de ultrasonidos, los datos de las Tablas 5 y 6 ponen de manifiesto que esta predicción es bastante aproximada, teniendo en cuenta que los coeficientes de determinación de los distintos modelos se mueven entre un valor mínimo del 65,39% (modelo 6L) y uno máximo del 70,04% (modelo 5L), valores todos ellos que pueden ser considerados como elevados para un material como la madera.

Respecto de la predicción del módulo de elasticidad local en función de los módulos de elasticidad global (E_{mg} y E_{mgcto}) es necesario destacar que la predicción mediante el módulo de elasticidad global medido en la fibra neutra (E_{mg}) (modelos 7L y 7S) arroja resultados muy similares que el propuesto por la norma UNE EN 384 (9) para calcular el módulo local (E_{ml}) en función del módulo global (sin que la norma defina el módulo global a emplear).

Sin embargo, la predicción del módulo local mediante el global determinado en la zona traccionada (E_{mgcto}) se aleja bastante (modelos 8L y 8S) del modelo definido en la norma UNE EN 384 (9), planteando con ello la necesidad de considerar en la norma de ensayo UNE EN 408 un único método de ensayo del módulo global, evitando así la indefinición actualmente existente.

($R^2=58.96\%$). The values obtained for the coefficient of determination (R^2) for models 1L and 1S may be considered to be high, which means that these could be considered for prediction by carrying out proof loading tests on structural timber in service.

The comparison of the coefficients of determination for models 1L and 1S with those of 3L and 3S permits the conclusion to be drawn that the prediction of the ultimate bending strength of the timber is most precise if the mean global modulus measured at the neutral axis (E_{mg}) is applied, rather than using the same modulus but measured at the centre of the tension edge (E_{mgcto}).

Regarding the prediction of ultimate bending strength using ultrasonic technology, it becomes apparent that the variation in the dynamic modulus of elasticity measured (E_{sil}) only accounts for 51.03% of the variability of bending strength in the Laricio pine, and 48.59% in the Scots pine. It is therefore obvious that this form of prediction is not yet sufficiently precise and improvements are needed if this is to be used for the evaluation of structural timber in service.

When referring to the prediction of the global modulus of elasticity using ultrasonic technology, the information in Tables 5 and 6 reflects that this form of prediction is reasonably precise, bearing in mind that the coefficients of determination of the different models fluctuate between a minimum value of 65.39% in model 6L, and a maximum of 70.04% in model 5L. These values are high for a material such as timber.

Regarding the prediction of the local modulus of elasticity based on the use of the global modulus of elasticity (E_{mg} and E_{mgcto}), it should be stressed that prediction using the global modulus of elasticity measured at the neutral axis (E_{mg}) (models 7L and 7S), reflects results similar to those set forth in standard UNE EN 384 (9) to calculate local modulus of elasticity (E_{ml}) from the global modulus, although this standard does not specify the global modulus to be used.

$$E_{ml} = 1,3 \cdot E_{mg} - 2690$$

Nevertheless, the prediction of local modulus using the global modulus measured at the centre of tension edge (E_{mgcto}), differs significantly (models 8L and 8S) from that specified in the standard UNE EN 384 (9), therefore suggesting that the testing standard UNE EN 408 should consider only one testing method for global modulus, and thereby avoiding the current lack of definition.

Una explicación posible de este diferente resultado con los dos procedimientos de ensayo podría estar basada en el efecto introducido por el sistema de apoyos inferiores sobre la medida de la deformación cuando el medidor de deformación se sitúa bajo la cara traccionada.

Los datos de las Tablas 5 y 6 sugieren que el módulo global que mejor predice tanto la resistencia última a flexión como el módulo de elasticidad local es el medido en la fibra neutra, por lo que debería ser el único que debiera ser considerado por la norma de ensayo UNE EN 408.

El uso de la densidad en la predicción tanto de la resistencia última (modelos 9) como del módulo de elasticidad global (modelos 10) no resulta adecuada a nivel práctico ya que apenas si llega a explicar el 30% de la variabilidad observada.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones que pueden extraerse de los datos contenidos en las Tablas 5 y 6 son las siguientes:

1. El mejor predictor de la resistencia última a la flexión de la madera resulta ser el módulo de elasticidad global medido en la línea neutra (E_{mg}).
2. La utilidad predictiva de las técnicas de ultrasonidos por transmisión en elementos estructurales de madera se limita a la determinación del módulo de elasticidad global, ya que la predicción directa de la resistencia última a la flexión (f_m) es todavía algo inexacta.
3. Es necesario especificar en la norma UNE EN 408 un único método de ensayo del módulo de elasticidad global, proponiendo que este sea el obtenido midiendo la deformación en la línea neutra (E_{mg}) ya que es el que mejor predice la resistencia última a la flexión y con el que se obtiene una relación con el módulo local (E_{ml}) más parecida a la descrita en la norma de cálculo de valores característicos UNE EN 384. En el caso de que se siga manteniendo en la norma UNE EN 408 el método de ensayo del módulo de elasticidad global obtenido evaluando la deformación de la zona traccionada (E_{mgcto}), sería necesario establecer en la norma UNE EN 384 una expresión de determinación del módulo local (E_{ml}) distinta ya que la actualmente considerada por la citada norma no permite predecir adecuadamente el valor del Módulo local (E_{ml}), valor que resulta de necesario conocimiento (Variable clasificadora) para la asignación de la clase resistente según la norma UNE EN 338.
4. Dado que la utilidad predictiva del módulo de elasticidad local (E_{ccn}) es inferior a la del global (E_{mg}) y

A possible explanation of this different result with the two procedures of measurement could be based on the effect of the support arrangement on the total deformation measured when the deflector is located under the tension edge.

The information shown in Tables 5 and 6 suggests that the global modulus that gives the most precise prediction for both ultimate bending strength, and the local modulus of elasticity, is that of measuring at the neutral axis. This therefore suggests that this procedure should be the only one included in the testing standard UNE EN 408.

The use of density in the prediction of both ultimate bending strength (models 9), and the global modulus of elasticity (models 10) is not sufficiently practical, as it only explains 30% of the variability observed.

4. CONCLUSIONS

The conclusions drawn from the information reflected in Tables 5 and 6 are as follows:

1. *The most precise predictor of ultimate bending strength is the global modulus of elasticity measured at the neutral axis (E_{mg}).*
2. *Ultrasonic technology is only useful in structural timber for the prediction of the global modulus of elasticity, as the direct prediction of ultimate bending strength (f_m) is somewhat imprecise.*
3. *Standard UNE EN 408 should specify only one single method for the testing of global modulus of elasticity, suggesting that this be obtained by measuring deformation at the neutral axis (E_{mg}), as this is the method that best predicts ultimate bending strength, and that which provides the most precise relationship with the local modulus (E_{ml}) in line with the specifications set forth in the standard UNE EN 384. If the testing method for the global modulus of elasticity obtained through the measuring of the deformation at the tension edge (E_{mgcto}) is maintained in standard UNE EN 408, standard UNE EN 384 ought to include an additional expression for the determining of the local modulus (E_{ml}), as the one already included in UNE EN 384 does not permit a precise enough prediction of the value of local modulus of elasticity (E_{ml}), as this is needed (Classifying variable) for the assignation of strength class in accordance with standard UNE EN 338.*
4. *Due to the fact that the predicting efficiency of the local modulus of elasticity (E_{ccn}) is lower than that of*

teniendo en cuenta que aquél es de difícil realización y que su valor puede ser adecuadamente predicho por el Módulo global (E_{mg}) mediante el empleo de la expresión contenida en la norma UNE EN 384, se sugiere eliminar su ensayo en la práctica diaria de los laboratorios.

global modulus of elasticity (E_{mg}), and bearing in mind that the former is complicated to test, and that its value may be sufficiently deducted using global modulus of elasticity (E_{mg}) by means of the expression given in UNE EN 384, it is suggested that laboratories cease to use this form of testing on a day-to-day basis.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Fewell A. R., 1982. *Machine stress grading of timber in the United Kingdom*. Holz als Roh- und Werkstoff 40 (1982): 455-459.
- (2) Cline M.G., Heim A. L., 1912. *Tests on structural timbers*. Bulletin Div.Forest USDA nº 108.
- (3) Chaplin C. J., Latham J., 1935. *Strength tests on structural timbers, Part I*. Forest Prod. Res. Rec. Nº 2, HMSO, London.
- (4) Langlands I., 1938. *The mechanical properties of South Australian plantation-grown Pinus radiata*. Pamph. Coun. Scient. Ind. Res. aust. Nº 87, 1938.
- (5) Curry W. T., 1966. Stress grading machines. Timber trades Journal, 5 nov. 1966:71-77
- (6) Hoyle R. J., 1961. *A nondestructive test for stiffness of structural lumber*. Forest Prod. J., june 1961:251-254
- (7) Senft J.F., Suddart S.K., Angleton H.D., 1962. *A new approach to stress grading of lumber*. Forest products Journal, april, 1962:183-186.
- (8) Hofstrand A. D., Howe J.P., 1963. *Relationship between Modulus of Elasticity and Compressive Strength of white fir*. Potlach Forest Inc.; Consultants' Research Report nº 8, september 1963
- (9) Curry W. T., Fewell A.R., 1977. *The relations between ultimate tension and ultimate compression strength of timber and its modulus of elasticity*. Building Research Establishment. Current Paper CP 22/77. Princess Risborough, BRE.
- (10) Müller P. H., 1968. *Mechanical Stress-Grading of structural timber in Europe, North America and Australia*. Wood Sci. And Technol. 2(1968):43-72.
- (11) Fernández-Golfín Seco J. I., Díez Barra M. R., Hermoso Prieto E., 2002. *Derivation of machine strength rating settings for Spanish laricio pine timber in accordance with en 14081 standard*. Proceedings of the 8th European Conference on NDT, Barcelona, Spain.
- (12) UNE EN 408, rev 1: 2000. *Madera estructural. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*.
- (13) UNE EN 384, 1995, 2000. *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*.
- (14) UNE 56.544 1999. *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural*
- (15) UNE EN 338 *Madera estructural. Clases resistentes*
- (16) UNE EN 336 *Madera estructural. Coníferas y chopo. Desviaciones permisibles respecto de las dimensiones*.

* * *

APLICACIONES DE LAS CENIZAS VOLANTES EN EL CAMPO DE LA CONSTRUCCIÓN. EXPERIENCIA ESPAÑOLA

M^a. C. ALONSO, M^a. P. de LUXÁN

Desde principios de siglo las cenizas volantes han sido objeto de estudio a la búsqueda de campos diversos para su utilización. Los primeros trabajos de investigación se deben al Profesor Davis en Estados Unidos y desde entonces se ha recorrido una larga trayectoria en cuanto a la profundización del conocimiento de las características de estos subproductos y de su viabilidad de utilización.

En España se cuenta también con un cúmulo de trabajos, desarrollados desde hace varias décadas, que permiten abrir grandes vías de aplicación. Sin embargo, la proporción relativa entre el consumo de cenizas y su producción es aún bajo. Por ello se han promovido numerosas investigaciones que permitan crear cauces adecuados para su utilización de acuerdo con las características específicas de las cenizas volantes generadas en las centrales termoeléctricas españolas.

En este libro se recogen aquellas aplicaciones que han sido objeto preferente de estudio en España, antecedidas de los principales aspectos de las cenizas volantes españolas en relación directa con su comportamiento como material de construcción y, en general, en su incorporación a cementos, morteros y hormigones. No ha sido objeto de este libro contemplar de modo exhaustivo cada aspecto de las cenizas volantes y de sus mezclas sino, por el contrario, recopilar con sentido divulgativo y bajo aspectos científico-técnicos, las posibilidades que se abren en el sector de la construcción para el uso de estos subproductos. El conocimiento y difusión de sus características pueden potenciar las aplicaciones de estos residuos, que se estima alcancen 800 millones de toneladas a nivel mundial en el año 2010.

La aplicación en el campo de la construcción permite el aprovechamiento de grandes volúmenes de cenizas volantes y ha de estar precedido de estudios específicos para adecuar y optimizar el uso de estos subproductos, por su influencia en el comportamiento y propiedades de los materiales resultantes. Toda aplicación de las cenizas volantes queda implicada por un aspecto normativo, cuyas directrices están reguladas por la Directiva Europea sobre los Productos de Construcción (89/106/CEE). Nuevas aplicaciones requieren el

aval de la investigación sobre el comportamiento y eficacia de estos subproductos, desde las actuales y futuras perspectivas en los nuevos usos que se perfilan, tanto en los nuevos materiales mixtos que se generen como en las regulaciones y nuevas garantías de calidad que avalen su utilización.

*Distribución:
Instituto Eduardo Torroja
Apartado 19.002 Madrid
Telf: 302 04 40 / Fax: 302 07 00*