

# EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE DE FORJADOS ANTIGUOS CON VIGAS DE MADERA

Por F. Arriaga (Dr. Arquitecto, AITIM).  
L. García (Dr. Ingeniero de Montes, AITIM).  
K.G. Gebremedhin (Associate Professor, Cornell University, Ithaca, N.Y. USA)  
y F. Peraza (Ingeniero de Montes, AITIM).

EL PRESENTE ARTÍCULO CONSTITUYE EL RESUMEN DE LA MEMORIA  
DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN TITULADO  
**ESTRUCTURAS DE MADERA. RESTAURACIÓN, EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE  
DE VIGAS DE FORJADO ANTIGUAS.**

FUE PARCIALMENTE SUBVENCIONADO POR LA COMISIÓN INTERMINISTERIAL  
DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (C.I.C.Y.T.; PAT 90-0224).  
EXISTE UNA SEGUNDA PARTE DEL PROYECTO, ACTUALMENTE EN DESARROLLO,  
QUE COMPLETARÁ ALGUNOS ASPECTOS DEL MISMO

**RESUMEN:** Se efectuó una clasificación visual estructural, utilizando las reglas recomendadas por la ECE, de treinta y cuatro vigas que tenían una edad de 90 a 130 años. Se ha determinado el módulo de elasticidad dinámico mediante medición de la propagación de ondas ultrasónicas y el módulo de elasticidad longitudinal, transversal y la tensión de rotura mediante ensayos mecánicos.

Ensayo 2 de flexión para determinar la tensión de rotura y módulo de elasticidad en flexión





Vigas de forjado marcadas

## 1. INTRODUCCION

En los edificios antiguos de madera, las piezas estructurales son de madera maciza que normalmente proceden cada una de un sólo árbol. En la actualidad es difícil conseguir piezas de madera de grandes dimensiones. Si se precisan grandes escuadrías se recurre a piezas de madera laminada encolada.

Las reglas actuales de clasificación están pensadas para piezas de relativamente pequeña sección. La aplicación de dichas normas a piezas de grandes escuadrías es difícil, y un elevado porcentaje de las piezas serían rechazadas por la norma. Sin embargo, en muchos casos estas piezas han estado en servicio sin problemas durante muchos años.

Los objetivos de este trabajo son: 1/ desarrollar un procedimiento para obtener las características geométricas y mecánicas de las piezas de gran escuadría (en vigas antiguas), y 2/ utilizar la información registrada para establecer reglas de clasificación sencillas o métodos para evaluar las propiedades mecánicas de piezas estructurales *in situ*.

La utilidad práctica que se persigue en este estudio es desarrollar métodos para la determinación de las propiedades mecánicas *in situ* de estructuras de madera. La información de esta naturaleza resulta esencial para la toma de decisiones en las obras de restauración de edificios con estructura de madera con piezas de gran escuadría.

Una de las partes del trabajo que más tiempo ha requerido fue la recogida de información de los defectos y otras características geométricas de las vigas. Se registró información numérica y gráfica en fichas para cada pieza. En el futuro se realizarán análisis más detallados de estos datos.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. RECOPIACION DE LA INFORMACION DE CADA PIEZA

En primer lugar se efectuó una inspección de todo el material del proyecto rechazando aquellas que tenían deterioros demasiado importantes. Se utilizaron tres sistemas para la caracterización de las propiedades mecánicas de las vigas: (1) método de los ultrasonidos, (2) ensayos mecánicos, y (3) clasificación visual. Se midieron también, el contenido de humedad y el peso específico de las piezas.

Antes de la aplicación de los citados sistemas se recogió una gran cantidad de información sobre las características generales de las piezas, tales como dimensiones, deformación remanente, y defectos (nudos, fendas, desviación de la fibra, gemas, espesor de los anillos de crecimiento).

### Material de estudio: vigas:

Las piezas proceden de dos edificios antiguos de la provincia de Madrid. En adelante las vigas asignadas a dos grupos, se denominan **Serie A** y **Serie B**.

La **serie A** está formada por 20 vigas de forjado con una sección transversal de aproximadamente 13 cm x 18 cm y con una longitud de 4 a 5 m. Estas vigas proceden de un edificio del centro de Madrid, con 130 años de antigüedad.

La **serie B** está formada por 14 pares de cubierta con una sección transversal de aproximadamente 12 cm x 16 cm y una longitud de 4 m. Los pares proceden de un edificio del centro de Vallecas (Madrid), cuya edad se estima entre 80 y 90 años.

### Referencias para el marcado de las piezas:

Las caras de las vigas y pares (en adelante denominadas como vigas sólo) se marcaron del 1 al 4, siendo la cara 1 la cara de apoyo de la pieza o cara inferior. Para referir las mediciones de los nudos y fendas se utilizó como plano de referencia una viga de madera laminada, como se indica en la Figura 1. Las coordenadas  $y_1$  e  $y_2$  de la Figura 1 se midían desde el citado plano de referencia. Para la medición de las dimensiones de la sección se efectuaron medidas  $y_1$  e  $y_2$  cada 30 cm.

### Deformación remanente:

La deformación remanente se midió sobre un tramo central con una longitud variable entre 2,70 y 3,60 m en cada una de las vigas de la serie A, pero no fue posible su determinación en las vigas de la serie B debido a las grandes irregularidades que presentaban. Las relaciones luz/flecha obtenidas se dan en la Tabla 1.

Como puede observarse en la Tabla 1, únicamente 4 de las 17 vigas presentaban una deformación superior a  $l/360$ . La máxima tensión de flexión que habían sufrido las vigas en servicio y bajo la carga permanente se estimó entre 55 y 59 Kg/cm<sup>2</sup>.

### Nudos:

Los nudos de cada cara de la pieza fueron medidos y situados en relación al plano de referencia. Como se indica en la figura 2,  $x$  representa la distancia desde el centro del nudo al origen de abscisas, e  $y$  es la distancia desde el centro del nudo hasta el plano de referencia. De cada nudo se anotaron además, el diámetro ( $\phi$ ), cuando era circular (o sensiblemente circular), y  $d_1$ ,  $d_2$  (Figura 2) si eran elípticos.

### Fendas:

Se midieron las fendas en cada cara de la viga, excepto cuando se consideraban despreciables, registrando la longitud ( $l$ ), anchura ( $a$ ) y profundidad ( $p$ ) así como la situación en la cara (Figura 3).

### Gemas:

Se midieron cada 30 cm de longitud las gemas de cada cara, registrando las dimensiones y su situación (Figura 4).

### Desviación de la fibra:

La desviación de la fibra fue calculada a partir de la desviación de las fendas. El ángulo se evaluó como la tangente  $(y_2 - y_1)/l$ , (Figura 3).

### Espesor medio de los anillos de crecimiento:

Fue determinado de acuerdo con el procedimiento especificado en las Reglas de clasificación estructural para madera aserrada de

*La utilidad práctica que se persigue en este estudio es desarrollar métodos para la determinación de las propiedades mecánicas in situ de estructuras de madera. La información de esta naturaleza resulta esencial para la toma de decisiones en las obras de restauración de edificios con estructura de madera con piezas de gran escuadría.*

conifera recomendada por la Comisión Económica Europea (ECE). El espesor medio de los anillos era de 1,8 mm en la serie A y 2,4 mm en la serie B.

## 2.2. CLASIFICACION VISUAL

### Reglas de clasificación:

Las vigas fueron clasificadas visualmente de acuerdo con las Reglas de clasificación estructural para madera aserrada de conifera recomendadas por la Comisión Económica Europea (ECE). (U.N. Economic Commission for Europe, 1.982). Esta norma distingue tres clases (S10, S8 y S6) de madera aserrada. La evaluación de los nudos se basa en el concepto de Relación de Área de Nudos (K.A.R.: Knot Area Ratio). En futuros trabajos pueden considerarse otras normas o reglas de clasificación.

### Parámetros de clasificación:

Para la clasificación visual de las vigas se consideraron los siguientes defectos:

**Nudos** - se calcularon los KAR totales y marginales de acuerdo con las Reglas Recomendadas por la ECE, incluyéndose dentro del mismo KAR las proyecciones de aquellos nudos que se encontraban dentro de una distancia igual o menor al canto de la viga, en la sección de rotura. En cada viga se realizó una representación gráfica de las proyecciones de los nudos correspondiente a la sección de rotura.

**Fendas** - se consideró la longitud media de las fendas encontradas en cada pieza.

**Desviación de la fibra** - calculada a partir de la inclinación de las fendas con respecto a las aristas de la pieza.

**Gemas** - las gemas correspondientes a la sección de rotura (si existen) se evalúan como la relación entre la longitud de la gema y el ancho o canto de la sección transversal.

**Espesor medio de los anillos de crecimiento** - este parámetro se evaluó según el procedimiento indicado en la norma sobre una sección próxima a la rotura.

### Criterios de clasificación:

Se utilizaron dos criterios para la clasificación. El primero (Criterio 1) consideraba la aplicación estricta de las Reglas recomendadas por la ECE, mientras que el segundo criterio (Criterio 2) considera y evalúa las gemas como si fueran nudos.

En la clasificación visual de las piezas se consideraron los siguientes parámetros:

**A.1. Nudos** - KAR total (relación entre la suma de las áreas proyectadas de todos los nudos de la sección y el área de la sección transversal de la pieza, KT), y KAR marginal (relación entre la suma de las áreas proyectadas de los nudos o porciones de nudos contenidas en la zona del margen de la sección y el área de la sección transversal del margen, KM). Los márgenes se definen como las zonas próximas al borde de la sección transversal de la pieza que ocupan cada una, una cuarta parte de la sección total de la pieza. En la figura 5 se incluyen esquemas que definen los KAR total y marginal.

**A.2. Nudos** - KAR total (KT') y KAR marginal (KM') con la misma definición que en A.1. pero tratando las áreas ocupadas por las gemas como áreas de nudos.

- B. Fendas
- C. Desviación de la fibra
- D. Gemas
- E. Anillos de crecimiento

El Criterio 1 incluye los parámetros A.1, B, C, D y E, mientras que el Criterio 2 incluye los parámetros A.2, B, C y E. Las clases asignadas son: S10, S8, S6 y SX (donde, SX se asigna a aquellas piezas que no cumplen alguno de los requisitos mínimos del grado

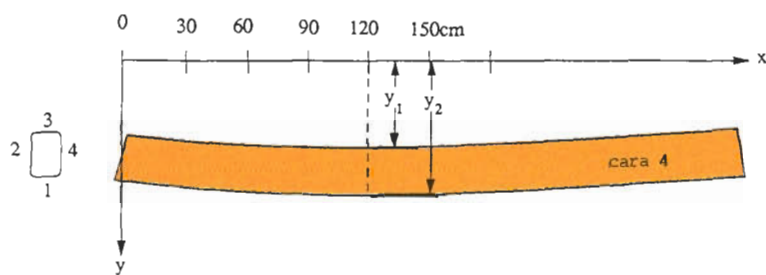


Fig. 1. Medición de las dimensiones.

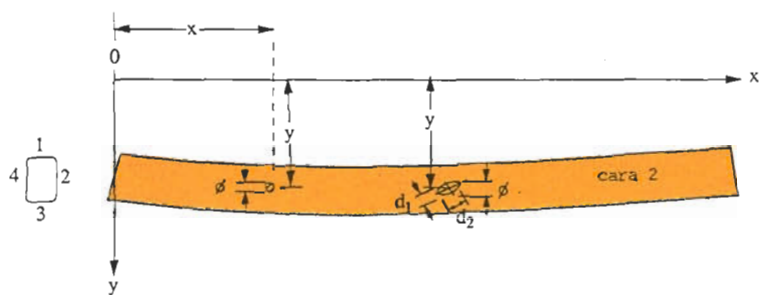


Fig. 2. Medición de los nudos.

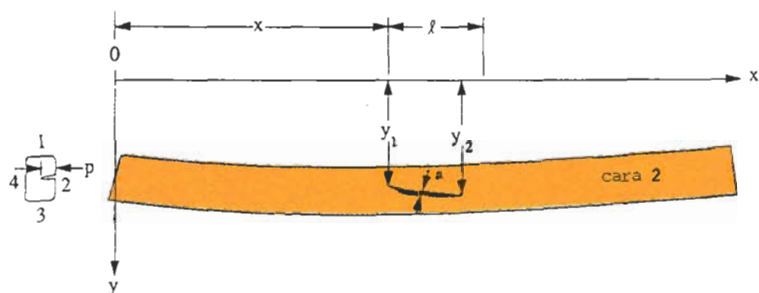


Fig. 3. Medición de las fendas.

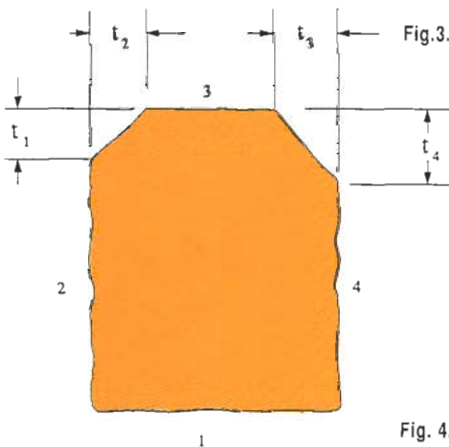


Fig. 4. Medición de las gemas.

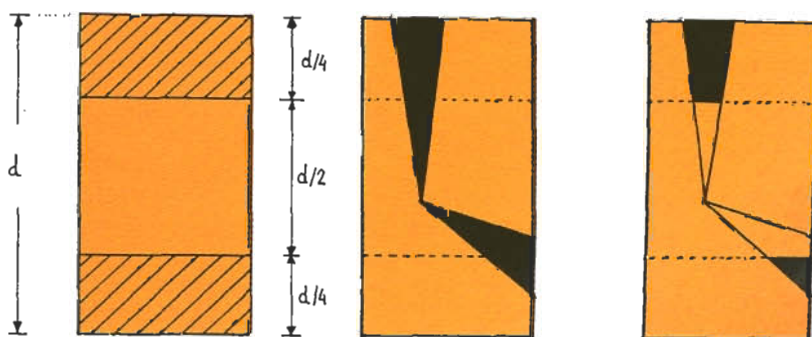


Fig. 5. Ejemplos de definición del KAR total y marginal.

**Tabla 1. Relaciones luz/flecha para las vigas de la serie A**

Pieza n	l/f	Pieza n	l/f	Pieza n	l/f
2	240	9	428	15	176
3	483	10	825	16	360
4	333	11	2400	18	1650
5	385	12	600	19	600
6	500	13	375	20	288
8	750	14	900		

**Tabla 2. Resultados de la clasificación para las series A y B**

Serie A Pieza n.º	A						Criterio A.1, B, C, D, E	Criterio A.2, B, C, E
	1	2	B	C	D	E		
1	S10	S10	S10	S6	S10	S10	S6	S6
2	S8	S8	S10	S10	S10	S10	S8	S8
3	S10	S10	S6	S10	S10	S10	S6	S6
4	S10	S10	S10	S10	S10	S10	S10	S10
5	S10	S10	S10	S10	S10	S10	S10	S10
6	S8	S8	S10	S10	S10	S10	S8	S8
7	S10	S10	S10	S10	S6	S10	S6	S10
8	S10	S10	S10	S10	S10	S10	S10	S10
9	S8	S8	SX	S10	S10	S10	SX	SX
10	SX	SX	SX	S6	S10	S10	SX	SX
11	S10	S10	S6	S6	S10	S10	S6	S6
12	SX	SX	S10	S10	S10	S10	SX	SX
13	SX	SX	S10	---	SX	S10	SX	SX
14	S10	S10	S6	S10	S10	S10	S6	S6
15	SX	SX	S10	S10	S10	S10	SX	SX
16	S8	S8	S6	S10	S10	S10	S8	S6
17	S8	S8	S6	S10	S10	S10	S6	S6
18	S8	S8	S6	S8	S10	S10	S6	S6
19	S10	S8	SX	S10	S6	S10	SX	SX
20	S10	S10	S10	S10	S10	S10	S10	S10

Serie B Pieza n.º	A						Criterio A.1, B, C, D, E	Criterio A.2, B, C, E
	1	2	B	C	D	E		
1	S10	S8	S6	S10	S6	S10	S6	S6
2	S10	S8	S6	S10	S10	S10	S6	S6
3	S10	S8	SX	S10	S6	S10	SX	SX
4	S8	S8	SX	S10	S6	S10	SX	SX
5	S8	S8	SX	S10	S6	S10	SX	SX
6	S10	S10	SX	S10	S10	S10	SX	SX
7	S8	S8	S6	S10	S6	S10	S6	S6
8	S8	S8	SX	S10	S6	S10	SX	SX
9	S8	S8	SX	S10	S10	S10	SX	SX
10	S10	S8	S6	S10	S6	S10	S6	S6
11	S10	S8	SX	S10	SX	S10	SX	SX
12	S8	S8	S6	S10	S10	S10	S6	S6
13	S8	S8	SX	S10	S6	S10	SX	SX
14	S10	S10	SX	S10	S6	S10	SX	SX

**Tabla 3. Módulos de elasticidad dinámico en las series A y B**

Serie A Pieza n.º	ρh (kg/m²)	v perpend. (m/s)	E <sub>∞</sub> (kp/cm²)	V paral (m/s)	E <sub>∞</sub> (kp/cm²)
2	474	1.662	13.093	4.692	104.350
3	524	1.879	18.500	4.879	124.736
4	575	1.842	19.509	5.120	150.732
5	532	1.983	20.919	4.792	122.164
6	511	1.808	16.703	4.793	117.635
7	433	1.511	9.885	4.669	111.395
8	525	1.909	19.112	5.185	141.142
9	509	1.859	17.590	4.853	119.976
10	507	1.572	12.528	5.066	130.118
11	546	1.680	15.410	4.995	136.227
12	475	1.626	12.558	4.819	110.308
13	705	1.631	18.754	3.835	103.685
14	605	1.518	13.941	5.259	167.261
15	512	1.595	13.025	4.454	101.571
16	481	1.685	13.655	5.108	125.500
17	530	1.939	19.926	5.117	138.773
18	421	1.526	9.803	5.082	108.730
19	649	1.949	24.652	5.251	178.948
20	555	2.078	23.965	5.189	149.437

Serie B Pieza n.º	ρh (kg/m²)	v perpend. (m/s)	E <sub>∞</sub> (kp/cm²)	V paral (m/s)	E <sub>∞</sub> (kp/cm²)
2	479	1.766	14.938	5.328	135.976
3	477	1.154	6.352	3.839	70.299
4	539	1.983	21.195	4.133	92.070
5	448	1.807	14.628	4.895	107.345
6	601	1.730	17.987	4.404	116.565
7	494	1.814	16.255	4.765	112.163
8	476	1.898	17.147	4.587	100.153
9	485	1.672	13.658	4.301	89.718
10	489	1.584	12.269	4.982	121.371
11	511	1.805	16.648	4.018	82.497
12	593	1.862	20.212	4.834	136.232
13	564	1.972	21.932	5.032	142.810
14	449	1.785	14.354	4.505	91.124

**Tabla 4. Módulos de elasticidad aparente (E<sub>a</sub>), verdadero (E), de cortante (G) y tensión de rotura a flexión (σ) para las series A y B**

Serie A Pieza n.º	E <sub>a</sub> (kg/m²)	E (kp/cm²)	G (kp/cm²)	E/G	σ (kp/cm²)
1	90.440	117.641	18.167	6.47	439
2	34.662	68.055	4.046	16.81	183
3	52.931	77.670	8.327	9.32	170
4	89.779	126.177	12.709	9.92	536
5	70.193	124.507	5.695	21.86	341
6	59.564	95.742	7.081	13.52	368
7	26.147	78.848	1.637	42.91	157
8	62.652	111.207	6.064	16.68	482
9	48.037	90.071	4.887	18.42	290
10	38.817	68.785	4.184	16.43	227
11	59.569	100.689	7.001	14.38	287
12	39.188	90.317	2.603	31.10	90
13	47.241	62.273	9.393	6.62	165
14	30.933	44.268	5.146	8.60	250
15	33.375	51.658	4.331	11.92	42
16	54.302	93.912	6.520	14.40	220
17	57.748	103.013	3.706	18.05	163
18	35.879	64.349	3.808	16.89	133
19	64.781	104.565	5.531	12.25	330
20	53.926	94.466	5.581	16.92	346

Serie B Pieza n.º	E <sub>a</sub> (kg/m²)	E (kp/cm²)	G (kp/cm²)	E/G	σ (kp/cm²)
1	35.775	58.047	4.008	14.48	176
2	58.983	105.149	4.785	21.97	327
3	9.428	16.720	976	17.11	72
4	46.513	46.683	(1.991.862)	0.02	123
5	45.125	94.431	3.669	25.73	270
6	37.931	66.306	4.054	16.35	236
7	48.372	69.007	7.950	8.67	256
8	50.299	100.425	4.779	21.01	259
9	53.411	91.583	6.574	14.03	133
10	59.175	72.180	16.523	4.36	287
11	35.959	---	---	---	52
12	(93.956)	79.474	(-25.342)	(-3.13)	269
13	71.806	129.471	6.334	20.43	305
14	50.486	66.181	8.045	8.22	263

\* Piezas 3 y 11 rotas antes del ensayo.

**Tabla 5. (E) y (σ) en kp/cm² según procedimiento 1 y 2**

Procedimiento 1. Estricta aplicación de norma ECE							
Serie	Clase	Prop.	Media	Desv. est.	Coef. var%	0,05	N
A	S10	E	114.089	14.697	13	99.914	4
		σ	428	100	23	264	
	S8	E	85.903	15.483	18	60.434	3
		σ	257	97	38	96	
	S6	E	90.368	19.905	22	57.626	6
		σ	225	118	52	31	
	SX	E	83.202	17.321	21	54.711	5
		σ	221	95	43	63	
B	S10	E	---	---	---	---	0
		σ	---	---	---	---	
	S8	E	---	---	---	---	0
		σ	---	---	---	---	
	S6	E	76.771	17.639	23	47.757	5
		σ	263	55	21	171	
	SX	E	64.988	27.475	32	39.795	7
		σ	227	70	31	110	

Procedimiento 2. Procedimiento de solo nudos							
Serie	Clase	Prop.	Media	Desv. est.	Coef. var%	0,05	N
A	S10	E	103.974	17.953	17	74.444	9
		σ	344	120	38	129	
	S8	E	85.857	15.838	18	59.806	6
		σ	226	88	39	81	
	S6	E	---	---	---	---	0
		σ	---	---	---	---	
	SX	E	73.791	14.677	20	49.650	3
		σ	161	69	43	48	
B	S10	F	73.568	18.356	25	43.375	5
		σ	258	56	22	164	
	S8	E	87.276	26.061	30	44.409	7
		σ	230	72	31	112	
	S6	E	---	---	---	---	0
		σ	---	---	---	---	
	SX	E	---	---	---	---	0
		σ	---	---	---	---	

**Tabla 6. Coeficientes de correlación entre variables**

Variables	Serie A + B	Serie A	Serie B
E - E <sub>c</sub>	0,55	0,61	0,41
σ - E <sub>c</sub>	0,57	0,59	0,59
E - ρ	0,21	0,20	0,12
σ - ρ	0,29	—	0,04
E - KT	-0,11	-0,42	0,64
σ - KT	-0,49	-0,55	-0,20
E - KM	-0,14	-0,57	0,73
σ - KM	-0,52	-0,63	-0,13
E - KT'	-0,12	-0,36	0,60
σ - KT'	-0,47	-0,52	-0,05
E - KM'	-0,24	-0,54	0,50
σ - KM'	-0,54	-0,63	-0,00
E - G	0,23	0,50	-0,21
E - σ	0,64	0,76	0,42

**Tabla 7. Valores de la relación E/G**

	Serie A + B	Serie A	Serie B
Media <sup>1</sup>	16,36	16,83	15,52
Desviación estándar	7,96	8,65	6,90
Coefficiente de variación	48%	51%	44%

inferior, o S6). En la tabla 2 se resumen los resultados de la clasificación visual.

### 2.3. APLICACION DE LOS ULTRASONIDOS.

La técnica de los ultrasonidos ha sido utilizada para la evaluación de la capacidad de carga de estructuras de madera en servicio. Estos métodos permiten la determinación del módulo de elasticidad dinámico de la madera. El procedimiento de medición utilizado en este trabajo fue el mismo que en la práctica podría emplearse sobre piezas en servicio.

#### Equipo:

El equipo utilizado fue Steinkamp - Ultrasonic Tester BP V. La escala de medida tiene un rango desde 0,1 a 9999,9 microsegundos. Los palpadores eran de forma cónica con puntas de acero inoxidable. La forma cónica permite su aplicación sobre un punto de la superficie de la pieza, sin necesidad de preparaciones especiales de la superficie de contacto, como ocurre con los palpadores cilíndricos. La frecuencia de las ondas ultrasónicas del equipo está comprendida entre 40 y 50 KHz. El transductor está hecho de circonato - titanato de plomo.

#### Medidas de la velocidad de transmisión

La velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas se realizó en la dirección perpendicular a la fibra (1) y paralela a la fibra (2).

(1) Mediciones de la velocidad en la dirección perpendicular a la fibra: en estas medidas los palpadores se alineaban como se indica en la figura 6. Este procedimiento de medida suele denominarse método directo. Los tiempos de transmisión se midieron en tres puntos, marcados como 1, 2 y 3 en la figura 6, en una sección situada a una distancia  $x = 130$  cm en la serie A, y 120 cm en la serie B, medida desde el origen de referencia. En adelante ésta sección se denominará "sección inicial".

Los puntos extremos, 1 y 3, de la figura 6, se encontraban a 3 cm de las aristas de la pieza y el punto 2 centrado. La velocidad en la dirección perpendicular a la fibra se calculó como valor medio de la velocidad de transmisión en las tres posiciones citadas.

(2) Mediciones de la velocidad en la dirección paralela a la fibra: en este caso los palpadores se disponían de forma no directamente alineada: este procedimiento se denomina método semidirecto. En la zona del tercio central de la pieza, aproximadamente, se tomaron seis lecturas de tiempos de propagación entre la sección inicial (donde  $x = 130$  cm en la serie A y 120 cm en la serie B) y la sección final (donde  $x = 240$  cm en la serie A y 220 cm en la serie B). De esta forma los palpadores se encontraban distanciados 100 o 110 cm y formaban una línea recta desviada 6 o 7 grados con respecto al eje de la pieza. (Figura 7). Para determinar la velocidad de propagación en la dirección paralela (o casi paralela) a la fibra en cada pieza se obtuvo la media de las seis lecturas tomadas.

El módulo de elasticidad dinámico se calculó (sin incluir la corrección por el coeficiente de Poisson) mediante la expresión siguiente:

$$Ed = v^2 \cdot d$$

donde, Ed = módulo de elasticidad dinámico (N/m<sup>2</sup>)

v = velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas (m/s)

d = densidad del material (Kg/m<sup>3</sup>)

La densidad del material se obtuvo a partir de una probeta obtenida de una rebanada completa de la sección de cada pieza. En la tabla 3 se resumen los módulos de elasticidad dinámico obtenidos.

### 2.4. ENSAYOS MECANICOS:

Cada pieza fue sometida a dos ensayos mecánicos, con el fin de determinar el módulo de elasticidad en flexión, el módulo de elasticidad transversal y la tensión de rotura en flexión. Los ensayos se realizaron de acuerdo a los procedimientos especificados en el proyecto de norma pr EN 408 (1991) "Estructuras de Madera - Madera maciza y madera laminada encolada - Determinación de algunas propiedades físico - mecánicas".

#### Ensayo 1.

##### Módulo de elasticidad aparente

El primer ensayo fue un ensayo no destructivo con el fin de calcular el módulo de elasticidad aparente en flexión (Eap). La probeta se apoyaba sobre su vano central con una luz  $l_1$  ( $l_1 = 92$  cm en la serie A y 84 cm en la serie B). La carga se aplicaba concentrada en el centro del vano. La separación entre apoyos ( $l_2$ ) era aproximadamente igual a  $5x_d$ , siendo  $d$  el canto de la viga, tal y como se especifica en la norma. Uno de los apoyos se encontraba situado a una distancia  $l_2$  desde el origen de la pieza ( $l_2 = 139$  cm en la serie A y 128 cm en la serie B). El esquema de ensayo se describe en la figura 8.

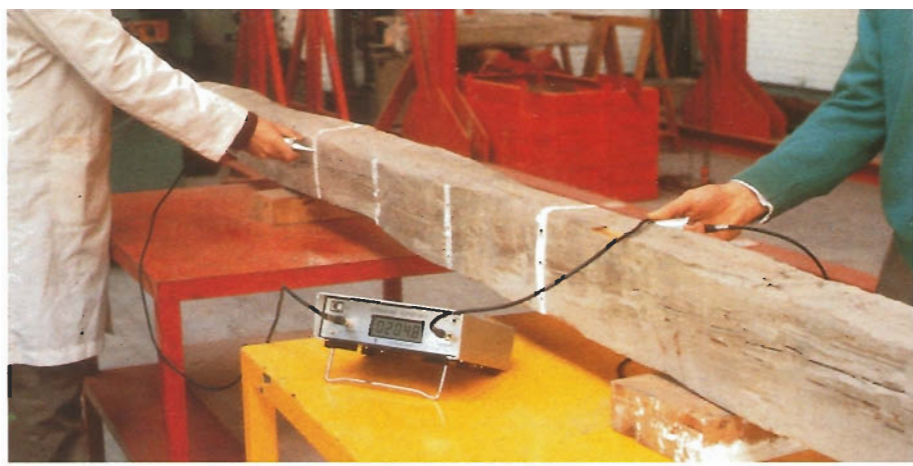
#### Ensayo 2.

##### Módulo de elasticidad y tensión de rotura en flexión.

En este ensayo la probeta se apoyaba sobre un vano con una luz  $l$  ( $l = 3,30$  m en la serie A y 3,00 m en la serie B). La carga se aplicaba sobre dos puntos correspondientes a los tercios de la luz. La esbeltez, relación luz/canto, era aproximadamente de 18, como se recomienda en la norma de ensayo. El esquema del procedimiento de ensayo se describe en la Figura 9.

Las deformaciones relativas, se midieron sobre el vano del tercio central de la pieza, donde el cortante es nulo. De esta forma se puede determinar el módulo de elasticidad en flexión pura (E), sin la influencia del esfuerzo cortante.

Para determinar la tensión de rotura ( $\sigma$ ), se continuaba el aumento de la carga hasta la rotura de la viga. Se registró gráficamente la forma de la rotura de cada una de las piezas. Conocidos los módulos de elasticidad "verdadero" y aparente se calcula el módulo de elasticidad transversal o de cortante (G). En la tabla 4 se resumen los resultados de los ensayos mecánicos. El módulo de



Sección transversal de una viga de la serie A.

Mediciones con ultrasonidos en el tercio central de las piezas.

elasticidad transversal se calculó a partir de la siguiente expresión:

$$G = K_g \cdot d^2 / (l_1^2 \cdot (1/E_{ap} - 1/E))$$

donde,

$K_g$  = constante que depende de la forma de la sección transversal de la pieza (en sección rectangular,  $K_g = 1,2$ ).

$d$  = canto de la viga.

$l_1$  = longitud del vano en el que se miden las deformaciones relativas.

$E_{ap}$  = módulo de elasticidad aparente.

$E$  = módulo de elasticidad "verdadero".

Si  $E_{ap}$  resulta mayor que  $E$ ,  $G$  tiene signo negativo lo cual no tiene sentido. Teóricamente,  $E$  debería ser siempre mayor que  $E_{ap}$  ya que ambos valores se obtienen a partir de medidas de deformación sobre la misma porción de la viga, y en el ensayo de determinación de  $E_{ap}$  (ensayo 1), la deformación debida al cortante reduce el valor aparente del módulo de elasticidad mientras que en el ensayo de determinación de  $E$  (ensayo 2), el cortante es nulo.

En los resultados obtenidos, sin embargo, algunos valores de  $E$  son inferiores a los correspondientes  $E_{ap}$ ; además la relación de  $E/G$  es muy variable aunque su valor medio es 16, de acuerdo con lo esperado. Una explicación posible para este fenómeno se basa en que los nudos y los defectos en general que afectan a la pieza no están necesariamente uniformemente distribuidos a lo largo de la zona central donde se efectuaron las medidas de deformación relativa. Por otro lado, el momento flector en dicha zona no es constante en el caso del ensayo 1 y sí en el caso del ensayo 2. Por tanto, los defectos podrían tener más influencia en el ensayo 2 (mediciones para  $E$ ) que en el ensayo 1 (mediciones para  $E_{ap}$ ) a causa de la diferente ley de momentos flectores.

#### Contenido de humedad

El contenido de humedad de cada pieza se obtuvo de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma pr EN 408. (proyecto de norma europea basada en la norma ISO 8375). El contenido de humedad se determinó sobre una rebanada de la sección transversal de la pieza, con un espesor de 4 cm, extraída de una zona próxima a la rotura. La humedad se determinó mediante secado en estufa a  $103 \pm 2$  °C hasta peso constante. El contenido de humedad medio obtenido fue de 9,72% en la serie A y 9,92% en la serie B.

#### Peso específico

El peso específico se determinó a partir de una probeta con forma de paralelepípedo de 4 cm de grosor extraída de una rebanada de la viga próxima a la zona de rotura. La rebanada estaba libre de nudos y de bolsas de resina. Las probetas se cortaban intentando abarcar la mayor parte posible de la rebanada manteniendo su forma rectangular y orientada en las direcciones radial y tangencial. Estas piezas eran cubicadas y pesadas para obtener el peso específico. En la tabla 3 se incluyen los resultados.

### 3.

## RESULTADOS Y ANALISIS

### 3.1. CLASIFICACION VISUAL

Las reglas recomendadas por la ECE, consideran 3 grados S10, S8 y S6. El cuarto "grado", SX, se asignó a aquellas piezas que no cumplen los requisitos mínimos de la clase inferior S6, y que son rechazados por la norma. Se utilizaron dos procedimientos de clasificación: el procedimiento 1 consideraba todos los parámetros de clasificación incluyendo nudos, fendas, gemas, desviación de la fibra y espesor de los anillos de crecimiento; el procedimiento 2 consideraba únicamente los valores del KAR total y marginal de los nudos. La intención de emplear estos dos criterios era conocer la diferencia de resultados entre la aplicación estricta de la norma y la simplificación que supone el considerar únicamente los nudos como parámetro de clasificación.

La aplicación estricta de las reglas de clasificación suponía un elevado porcentaje de piezas rechazadas en la serie B, principalmente debido a la existencia de grandes fendas. Estas reglas de clasificación pueden quizás ser inadecuadas para la clasificación de madera de grandes escuadrías. En la tabla 5 se resumen los resultados de la clasificación para cada procedimiento y el número (N) de pizas asignadas a cada calidad.

### 3.2. ANALISIS DE REGRESION LINEAL

Se realizaron análisis de regresión lineal para los siguientes grupos de datos:

(1) Serie (A+B): para este análisis se consideraron juntos los datos de las series A y B. El número total de datos es de 28. Los datos correspondientes a piezas que se encontraban rotas antes del ensayo o con problemas en el procedimiento de ensayo fueron excluidos del análisis. Las piezas rechazadas fueron las 14 y 15 de la serie A, y las 3, 4, 11 y 12 de la serie B.

(2) Serie A: número total de datos, 18

(3) Serie B: número total de datos, 10

En los análisis se tomaron las siguientes variables:

$E$ : módulo de elasticidad obtenido en los ensayos mecánicos.

$G$ : módulo de elasticidad transversal obtenido en los ensayos mecánicos.

$E/G$ : relación entre  $E$  y  $G$ .

$\sigma$ : tensión de rotura a flexión.

$d$ : peso específico a la humedad  $H$ .

$E_d$ : módulo de elasticidad dinámico.

$KT$ : KAR total de la sección de rotura.

$KM$ : KAR marginal de la sección de rotura.

$KT'$ : KAR total considerando las áreas de gemas como nudos, en la sección de rotura.

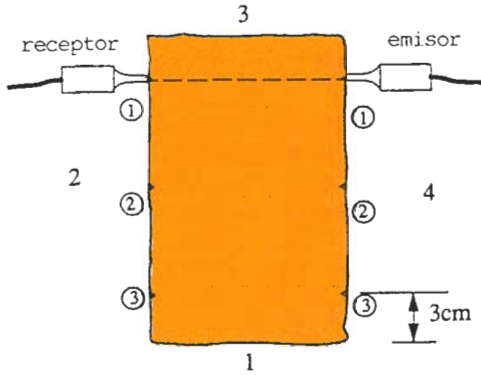


Fig. 6. Medidas de propagación de ultrasonidos en dirección perpendicular a la fibra.

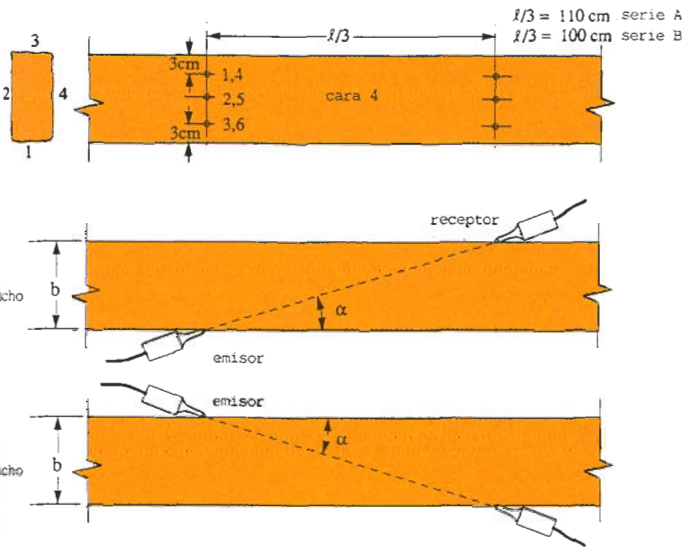


Fig. 7. Medidas de ultrasonidos en dirección paralela a la fibra.

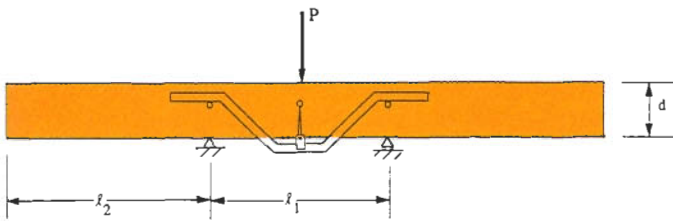


Fig. 8. Ensayo de flexión 1. Módulo de elasticidad aparente.

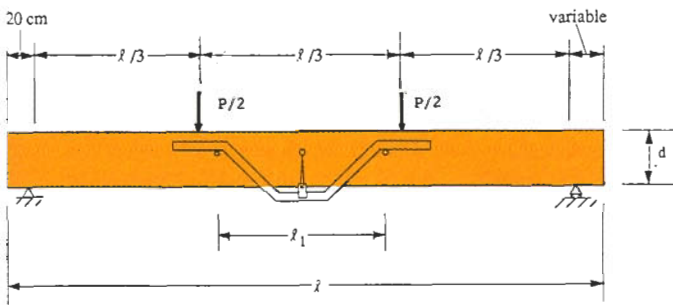


Fig. 9. Ensayo de flexión 2. Módulo de elasticidad y tensión de rotura.

KM': KAR marginal considerando las áreas de gemas como nudos, en la sección de rotura.

Los coeficientes de correlación entre las variables se resumen en la tabla 6. En la tabla 7 se dan los valores medios, desviación estándar y coeficiente de variación de la relación E/G.

El coeficiente de correlación entre el módulo de elasticidad (E) y la tensión de rotura ( $\sigma$ ) es de 0,76 en la serie A, pero se reduce a 0,42 en la serie B, probablemente debido a la gran irregularidad de las dimensiones de esta última serie. El valor medio de la relación E/G es 16 (tabla 7) y muestra una gran variabilidad.

En la madera libre de defectos y en pequeñas dimensiones existe una gran relación entre el peso específico y las propiedades mecánicas. Sin embargo, esta relación se pierde en el caso de piezas de gran escuadría probablemente a causa de la mayor influencia de los nudos y otros defectos en la resistencia que la que puede derivarse del peso específico. Además en piezas de tamaño grande el peso específico tiene fuertes variaciones por la falta de homogeneidad de la madera.

La correlación con las propiedades mecánicas es mayor cuando se evalúan los nudos como tales que cuando se consideran, además, las gemas como si fueran nudos. Cuando se evalúan los nudos, los efectos de desviación local de la fibra al rodear el nudo influyen en la resistencia, sin embargo estos efectos añadidos no existen en el caso de las gemas.

La correlación entre el KAR y la tensión de rotura resulta mayor que la existente entre el KAR y el módulo de elasticidad. Esto puede explicarse porque los valores del KAR considerados en el análisis corresponden a la sección de rotura (lo que está directamente relacionado con la tensión de rotura), mientras que el módulo de elasticidad depende de los diversos KAR que ocurran en todo el tercio central de la pieza (donde se miden las deformaciones relativas en el ensayo). La correlación entre las propiedades mecánicas y el KAR en la serie B resulta pequeña, debido a sus irregularidades de dimensiones.

### 3.3. METODO DE ULTRASONIDOS

La principal ventaja del empleo de la técnica de los ultrasonidos para caracterizar la madera es su facilidad de uso en obra, siempre que la pieza tenga tres caras accesibles.

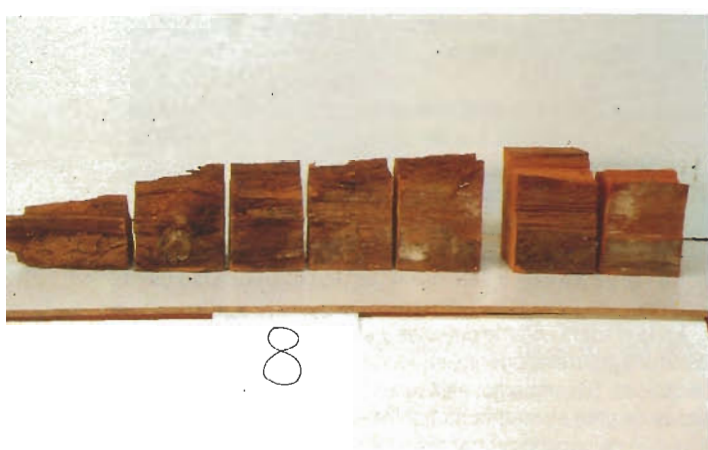
El inconveniente que se presenta es la dificultad para el cálculo o estimación de la densidad de la madera in situ. La densidad es necesaria para obtener el módulo de elasticidad dinámico. La relación entre el módulo de elasticidad y la densidad es lineal mientras que la velocidad aparece al cuadrado. Por tanto, parece razonable pensar que es posible utilizar los valores de la densidad de la bibliografía.

El coeficiente de correlación entre el módulo de elasticidad dinámico (obtenido mediante los ultrasonidos,  $E_d$ ) y el módulo de elasticidad (obtenido por ensayo mecánico, E) es de 0,61 para la serie A. La correlación entre  $E_d$  y la tensión de rotura ( $\sigma$ ) es de 0,59 (tabla 6). La correlación entre  $E_d$  y E en la serie B se reduce a tan sólo 0,41. Esta discrepancia puede deberse a la mayor irregularidad de dimensiones de esta serie.

Durante el proceso de ensayos mecánicos se efectuaron mediciones de propagación de ultrasonidos idénticas a las ya comentadas, pero con las piezas bajo carga. No se observaron diferencias con los resultados obtenidos cuando las vigas estaban sin cargas.

### 4. RESUMEN

Se clasificaron 34 piezas de madera (20 vigas de forjado, 13x18 cm de sección transversal, y 14 pares de cubierta de 12x16 cm de sección transversal) que tenían una edad en servicio de 90 a 130 años, siguiendo los procedimientos siguientes: (1) reglas de clasificación visual, (2) aplicación de la técnica de los ultrasonidos y (3) ensayos mecánicos no destructivos. Antes de comenzar los proce-



Putridión en extremo de viga 8

dimientos antes citados, se realizó una exhaustiva y precisa medición y registro de las dimensiones y características naturales de cada pieza. Esta información se recoge en fichas para formar una base de datos que pueda analizarse en el futuro según otras interpretaciones.

Las vigas fueron clasificadas visualmente de acuerdo a las Reglas Recomendadas por la Comisión Económica Europea (ECE, 1.982) que utiliza el sistema KAR para la evaluación de los nudos. El módulo de elasticidad dinámico (Ed) fue calculado a partir de mediciones de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas. Los módulos de elasticidad longitudinal (E) y transversal (G) y tensión de rotura en flexión ( $\sigma$ ) se obtuvieron mediante ensayos mecánicos. Los coeficientes de correlación obtenidos entre el KAR y  $\sigma$  fueron de 0,55 a 0,63, entre Ed y  $\sigma$  de 0,59, y entre E y  $\sigma$  de 0,76 en la serie A (la más regular en sus dimensiones). En el futuro es posible realizar análisis de los datos con diferentes enfoques y con otros métodos de clasificación.

## 5. ESTUDIOS FUTUROS:

Como trabajos futuros que completan esta primera parte se sugieren los siguientes:

- (1) Identificación microscópica de la especie en cada una de las piezas.
- (2) Establecimiento de la relación entre las propiedades mecánicas y las mediciones con ultrasonidos de probetas de pequeñas dimensiones y libres de defectos extraídas de las mismas piezas.
- (3) Determinación de la importancia del efecto de la densidad en el valor del módulo de elasticidad dinámico obtenido por ultrasonidos.
- (4) Establecimiento de un procedimiento de clasificación basado en las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos para deducir posteriormente las características naturales de cada clase (enfoque inverso al efectuado).
- (5) Simulación por ordenador de la capacidad de carga de vigas de forjado.

## BIBLIOGRAFIA

### A. GENERAL:

- A.1.- Nuere, E. **La carpintería de armar española**. Ed. Ministerio de Cultura. Madrid 1.989. 261 pags.
- A.2.- Giordano, G. **Tecnología del Legno**. Milan 1.981. 5 volúmenes.
- A.3.- Kollmann. **Tecnología de la madera y sus aplicaciones**. 1.959

A.4.- Peraza, C. **Estructuras de madera**. Ed. Escuela de la Edificación". Madrid 1.983. 3 volúmenes.

A.5.- Varios autores. **Curso de rehabilitación**. Ed. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. Vols. 5 **La estructura** y 6 **La cubierta**. Madrid 1.984

A.6.- Varios autores **Timber in Construction**. Ed. by John Sunley and Barbara Bedding. TRADA. Londres 1.985. 218 pags.

A.7.- Varios autores. **Curso de Construcción en madera**. Estructuras mixtas, rehabilitación y carpintería. Ed. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. Madrid 1.988. 346 pp.

A.8.- Navarro, F. **Notas históricas del edificio de Flora 1 y 3 futura sede Colegial**. Boletín Informativo del Colegio de Economistas. Madrid, Febrero 1.990, pags. 3-5.

### B. Rehabilitación de estructuras de madera

B.1.- **Réhabilitation des structures en bois: un marché porteur**. CTBA Info: revue du Centre Technique du Bois et de L'ameublement. N°30 - Mayo 1.990. pp. 21 - 24

B.2.- Meyer, R.W. y Kellogg, R.M. **Structural uses of wood in adverse environments**. 1.982. Society of Wood Science and Technology. USA. 510 pp.

- Predictive Service Life Testing of Structural and Building Components, Masters, L.W. pp. 425 - 436

- Evaluating residual strength and repair of structures, Lanius, R.M. pp. 436 - 451

- Acoustic emission as a technique for monitoring fracture processes in wood, Ansell, M.P. pp. 451 - 467

- Structural rehabilitation of deteriorated timber, Stumes, P. pp. 467 - 472

- Evaluation of in situ strength of aged timber beams, Suter, G.T. pp. 472 - 483

- Problems and possible solutions in the repair of deterioration in wood structural members, Christenson, T. pp. 483 - 486

B.3.- American Society of Civil Engineers. **Evaluation, maintenance and upgrading of Wood Structures**. 1.982

B.4.- Wood Structure. A design guide and commentary. Compiled by Task Committee on status of the art: Wood Committee on Wood ASCE Structural Division

B.5.- Richardson, B.A. **Wood preservation**. The Construction Press, Lancaster, England, 1.978

B.6.- Wilkinson, J.G. **Industrial timber preservation**. The Rentokil Library. London, 1.979

B.7.- Richardson, B.A. **Remedial treatment of buildings**. The Construction Press. Lancaster, England 1.980

B.8.- Giustina, G.D. **La pathologie des charpentiers en bois** Editions du Moniteur. Paris 1.985. 143 pp.

B.9.- TRADA. **Timber preservation**. Timber Research and Development Association. England 1.986. 51 pp.

B.10.- TRADA. **timber pest and their control** Timber Research and Development Association. England, 1.984. 60 pp.

B.11.- Manion, P.D. **Trees disease concepts**. Prentice Hall Inc. USA, 1.981. 399 pp.

B.12.- **Preservation du Bois dans la construction**. Centre Technique du Bois. Cahier n°104. Paris. 1.976

B.13.- Primeras Jornadas Nacionales de la Madera en la Construcción INIA-ANCOP. 2° Ponencia. **La protección de la madera y sus productos derivados**. Madrid, 6-8, Marzo 1.985

B.14.- Segundas Jornadas Nacionales de la Madera en la Construcción INIA-ANCOP. Madrid 20-22, Mayo 1.986

B.15.- Elvira Martín, L.M. y Jimenez Pérez, F.J. **Comportamiento al fuego de materiales y estructuras**. Monografía n°37 del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid, 1.982

B.16.- Varios autores. **La madera en la conservación y restauración del Patrimonio Cultural**. Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes y Archivos. Madrid, 1.985, 132 pp.

B.17.- Falk, R.H. and Ross, R.J. **Methods for Assessing Wood Structures in Place**. Serviceability and durability of construction



materials: Proceedings of 1st materials engineering congress; 1.990 August 13-15; Denver, CO. New York: American Society of Civil Engineers; 1.990: 324-330. Vol. 1

B.18.- Sandoz, J.L. **Form and treatment effects on conical round wood tested in bending.** Wood Sci. Technol. 25: 203-214 (1.991)

B.19.- Rouger, F. y otros. **Creep behaviour of French woods.** Proceedings of the 1.990 International Timber Engineering Conference. Vol.2. Oct. 23-25- 1.990. Tokyo, Japan. pag 330-336.

B.20.- Buchanan, A. y otros. **Reinforcing bars epoxy bonded in glue laminated timber.** Proceedings of the 1.990 International Timber Engineering Conference. Vol 2. Oct. 23-25- 1.990. Tokio, Japón. pp. 601-610.

B.21.- Stewart, A. **Rehability assessment of existing wood structures.** Proceeding of the 1.990 International Timber Engineering Conference. Vol.3. Oct. 23-25- 1.990. Tokio, Japón. pp.905-910.

B.22.- Tampone, G. **Il restauro del legno.** Nardini Editore. 2 volúmenes. Actas del 2º Congreso Nazionale Restauro del Legno. Firenze, 8-11 Nov. 1.989. 358 pp. y 312 pp.

B.23.- Tampone, G. **Legno e restauro.** Editrice Dialogo. Firenze 1.989. 318 pp.

### C. Clasificación estructural de la madera:

C.1.- Ortiz, J., Cruz, H. y Blanchon, J.L. **Informe final del proyecto: Standard Quality of Pinus pinaster.** Comisión de las Comunidades Europeas. Dirección General XII. 1.990

C.2.- Reglas de clasificación de madera aserrada de coníferas recomendadas por la CEE. Bruselas 1.982

C.3.- Guinard, D. y otros. **La valorisation des bois francais. Leur classement pour une utilisation en structure: la démarche du CTBA.** CTBA. Paris, Enero 1.989. 53 pags

C.4.- Sato, K. y otros. **Lumber stress grading utilizing acoustic emission technique.** Proceedings of the 1.990 International Timber Engineering Conference Vol. 2. Oct. 23- 25, 1.990 Tokio Japón. pp.523-526

C.5.- Arima, T. y otros **Natural frequency of log and lumber hit with hammer and application for production processing.** Proceedings of the 1.990 International Timber Engineering Conference Vol.2. Oct. 23-25. 1.990. Tokio, Japón. pp. 527-533

### D. Ensayos no destructivos. Ultrasonidos

D.1.- Ramírez, F. y otros. **Introducción a los métodos de ensayos no destructivos de control de la calidad de los materiales.** Capitulo 3 Ultrasonidos. Madrid pag. 217-400

D.2.- Bucur, V. **La vitesse des ultrasons et la qualite du bois.** Communication au 19e Colloque du Groupe Francais de Rhéologie. Paris, 28-30 Nov. 1.984

D.3.- Bucur, V. **Ultrasonic, hardness and x-ray densitometric analysis of wood.** Ultrasonics, Nov. 1.985. pag. 269-275.

D.4.- Bucur, V. **Modules d Young, de Coulomb et coefficients de Poisson, du bois, par mesures ultra - sonores sur éprouvettes cylindriques de faible taille.** Revue d Acoustique n°63. 1.982. pag. 234-238.

D.5.- Bucur, V. and Archer, R.R. **Elastic constants for wood by an ultrasonic method.** Wood Science and Technology 18:255-265. (1.984)

D.6.- Bucur, V. **Determination du module d Young du bois par une méthode dynamique sur carottes de sondage.** Ann. Sci. forest. 1.981, 38(2), 283-298

D.7.- Bucur, V. **Modifications des propriétés acoustiques du bois de résonance sous l effet de sollicitations de longue durée.** Ann. Sci. forest., 1.980, 37(3), 249-264

D.8.- Bucur, V. et Rocaboy, F. **Anisotropy of biological orthotropic structures estimated from ultrasonic velocity measurements. Application to wood.** INRA. Institut National de la Recherche Agronomique. Centre de Recherches Forestieres. Nancy. 1.988. 24 pags.

D.9.- Bucur, V. **Le comportement a la rupture du bois massif etudie par la methode ultrasonique d impulsion.** Communication présentée au 4e Congres Francais de Mécanique, Nancy, 4-7. Septembre 1.979. Institut National de la Recherche Agronomique. Centre National de Recherches Forestieres. 1.979. 7 pags.

D.10.- Bucur, V. **Relationship between grain angle of wood specimens and ultrasonic velocity.** Catgut Acoustical Society Inc., Newsletter n°41, 1/5/1.984, pag 30-35

D.11.- Bucur, V. **Retrait du bois et vitesse de propagation des ultrasons sur carottes de sondage.** Comptes rendus des seances de l'Academie d'Agriculture de France. Tome 67, année 1.981, n°7, 576-583

D.12.- Fujii, Y. y otros. **Using acoustic emission monitoring to detect termite activity in wood.** Forest Products Journal, January 1.990. Vol. 40, N°1 pag. 34-36

D.13.- García, L. y Hombrados, F. **Tomografía computerizada.** Rev. AITIM. Mayo - Junio 1.989. n°138. pag 26-29

D.14.- Tanaka, T. **Evaluation of bending strength by non-destructive methods on Western Hemlock attacked by termites.** Proceedings of the 1.990 International Timber Engineering Conference Vol. 3. Oct. 23-25 1.990 Tokio, Japón. pp. 673-680.