

# VALORES DE $\beta_0$ Y $d_{CHAR}$ EN LAS PIEZAS DE MADERA LAMINADA DE LOS PINOS DE ANDALUCÍA

F. J. Jiménez-Peris<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Forestal.- Universidad de Córdoba. España

## RESUMEN

Los valores de  $\beta_0$  (velocidad de carbonización) y  $d_{CHAR}$  (profundidad de carbonización), en que,  $d_{CHAR} = \beta_0 \cdot t$ , siendo  $t$  = tiempo de exposición al fuego, en minutos, representan los parámetros de referencia para realizar un proyecto de estructuras de madera ante una posible situación de incendio.

En este trabajo exponemos los resultados obtenidos de estos valores tras su ensayo en el Laboratorio del Fuego del LGAI, de las piezas de madera laminada encolada fabricadas con madera de pinos de los montes Andalucía: *Pinus nigra*, *Pinus pinea* y *Pinus pinaster*.

**PALABRAS CLAVE:** carbonización, fuego.

## $\beta_0$ AND $d_{CHAR}$ VALUES IN PIECES OF ANDALUSIAN PINE LAMINATED WOOD

### SUMMARY

Values, in which  $b_0$  (charring rate) and  $d_{CHAR}$  (charring depth), in which  $d_{CHAR,0} = b_0 \cdot t$ , where  $t$  = time of exposure to fire in minutes, represent the reference parameters for realization of a project of wood frames in the face of a possible fire situation. In this study, we explain the results obtained from these values after testing, in the LGAI Fire Laboratory, pieces of glued laminated wood made from pine trees from the Andalusian mountains: *Pinus nigra*, *Pinus pinea* and *Pinus pinaster*.

**KEY WORD:** charring rate, fire.

## INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de la realización de un proyecto de investigación financiado por fondos FEDER, de la Unión Europea, para determinar si era viable la utilización de maderas de coníferas españolas (pinos de la región de Andalucía-España), para fabricar elementos estructurales de madera laminada encolada y por tanto, evitar tener que importar la materia prima del norte de Europa, se realizó esta investigación complementaria con el fin de comprobar que el comportamiento al fuego de estas piezas de MLE (madera laminada encolada), era similar o igual al establecido como normal en el Eurocódigo 5, parte 1-2. (Tablas Núm. 2 y Núm. 3). (FEDER-CICYT REF. 1FD97-0932, 2001-2002; Eurocódigo 5.-Plan de Estructuras de Madera; Perea, 1991)

trol de Calidad de la Consejería de Obras Públicas y Transporte de la Junta de Andalucía en Sevilla (España) y el Departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad de Córdoba, realizándose los Ensayos del fuego en:

El LGAI (Laboratorio General de Ensayos e Investigaciones) de la Generalidad de Barcelona, laboratorio acreditado por ENAC, reconocido por el Ministerio de Fomento y perteneciente a EGOLF (Grupo Europeo de Laboratorios Oficiales del Fuego)

LICOF (Laboratorio acreditado por ENAC, reconocido por el Ministerio de Fomento y perteneciente a EGOLF (Grupo Europeo de Laboratorios Oficiales del Fuego).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó, en el Laboratorio de Con-

## Características de las muestras ensayadas

Se describen en la Cuadro 1, expuesta a continuación:

CUADRO 1. Especies de maderas ensayadas

Referencia	Procedencia	Especie	Dimensiones mm
P <sub>pt</sub> (J) 8	S <sup>a</sup> Cazorla	<i>Pinus pinaster</i> Ait	140x310x1500
P <sub>n</sub> (J) 7	S <sup>a</sup> Segura	<i>Pinus nigra</i> Arn	140x310x1500
P <sub>p</sub> (PU) 3	Punta Umbria	<i>Pinus pinea</i> L.	140x310x1000

Significado de la referencia:

P<sub>pt</sub> (J) 8 = *Pinus pinaster* Ait de Jaén, muestra 8.

P<sub>n</sub> (J) 7 = *Pinus nigra* de Jaén, muestra 7.

P<sub>p</sub> (PU) 3 = *Pinus pinea* L. de Punta Umbria (Huelva), muestra 3.

### Valores establecidos en el Eurocódigo 5, parte 1-2. (Eurocódigo 5, 1999; CTB, 1973; DTU, 1988; NBE EM-99, 1999 y Eurocódigo 5, 1995)

Según la misma para realizar el cálculo de la estructura en situación de incendio, ha de tenerse en cuenta lo siguiente:

#### Principios básicos

a) Cuando se requiera una resistencia mecánica en caso de incendio, las estructuras deberán proyectarse de manera que mantengan su función resistente aun a pesar de la acción del fuego el tiempo para el que fueron diseñadas. Este es el criterio de capacidad portante **R**.

b) Si la función es separadora, el criterio a tener en cuenta es su deformación, determinada por el Criterio **E** de integridad o estanqueidad y el Criterio **I** de aislamiento térmico.

c) Los elementos constructivos, pues, deberán cumplir los Criterios **R**, **E** e **I** como sigue:

**E e I**, sólo separación.

**R**, sólo capacidad portante.

**R, E e I**, separación y capacidad portante.

d) Respecto a las Acciones Térmicas que los elementos estructurales reciben se definen mediante el flujo neto de calor  $h_{net}$  [W/m<sup>2</sup>] en la superficie del elemento. El flujo neto de calor  $h_{net}$  se debe determinar considerando la radiación térmica y la convección térmica desde y hacia el entorno del incendio.

e) Dependiendo de la representación de las acciones térmicas, se pueden distinguir los siguientes procedimientos:

**Curvas estándar temperatura-tiempo (Norma EN 1363-1 y 2).**

**Curvas paramétricas temperatura-tiempo, basándose en los parámetros físicos.**

La comprobación puede hacerse:

$$\text{En el dominio del tiempo: } t_{fi,d} \leq t_{fi,requ} \quad (1)$$

$$\text{En el dominio de la resistencia: } R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (2)$$

$$\text{En el dominio de la temperatura: } q_d \leq q_{cr,d} \quad (3)$$

donde:

$t_{fi,d}$  valor de proyecto del tiempo requerido de resistencia estándar al fuego.

$t_{fi,requ}$  tiempo requerido de resistencia estándar al fuego.

$R_{fi,d,t}$  valor de proyecto de la resistencia para la situación de fuego.

$E_{fi,d,t}$  valor de proyecto de los efectos relevantes de las acciones para la situación de fuego.

$q_d$  valor de proyecto de la temperatura del material.

$q_{cr,d}$  valor de proyecto de la temperatura crítica del material.

Para el cálculo de los valores de las propiedades de los materiales, en el apartado del Eurocódigo de la madera parte del fuego vienen las expresiones que deberán utilizarse para las comprobaciones de la capacidad portante, comprobaciones de la deformación, para el análisis térmico y para las variaciones posibles de las propiedades del material y su influencia favorable o desfavorable para la seguridad.

#### Métodos de evaluación. (Eurocódigo 5-Plan de Estructuras de Madera; DTU, 1988; Eurocódigo 5, 1995)

El análisis de la estructura en situación de incendio se podrá realizar por:

Análisis global de la estructura.

Análisis de partes de la estructura.

Análisis de elementos estructurales.

a) Evaluación de comportamiento a la acción del fuego de la estructura.

Para ello es necesario contemplar el análisis global de la estructura, el análisis de partes de la misma y el análisis de elementos estructurales, como se menciona anteriormente.

Para el análisis global es necesario que se cumpla la relación:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d} \quad (4)$$

donde:

$E_{fi,d}$  es el efecto de cálculo de las acciones en la situación de incendio, incluyendo los efectos de dilatación térmica, cuando corresponda, pues en madera son despreciables.

$R_{fi,d}$  es la resistencia de cálculo correspondiente en exposición de fuego.

El método de cálculo de la “**Sección eficaz**”, se basa en determinar la reducción de la sección inicial en la profundidad eficaz de la carbonización:

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 d_0 \quad (5)$$

donde:

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

$d_{char}$  de acuerdo con la ecuación (6)

$$k_0 < 1,0$$

El otro método de cálculo, viene explicado en el Anexo “A” del Eurocódigo 5, parte 1-2 y toma como cálculo el que la sección residual del elemento se determinaría a partir de la reducción de la sección inicial en la profundidad carbonizada, sin considerar el redondeo de las aristas, por lo que la velocidad de carbonización viene dada por

$$d_{char} = \beta_0 t \quad (6)$$

donde:

$\beta_0$ , debería tomarse del Cuadro 3 o por el contrario reduciendo la sección inicial en la profundidad carbonizada teniendo en cuenta el redondeo de las aristas, definida por  $d_{char} = \beta_0 t$  (7) donde  $\beta_0$  tiene los valores del Cuadro 2:

**CUADRO 2. Velocidades de Carbonización  $\beta_0$**

Especies de maderas	$\beta_0$ (en mm/min.)
<b>a) Coníferas:</b> Madera laminada encolada con una densidad(normal) característica $\geq 290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	<b>0.64</b>
Madera maciza con una densidad(normal) característica $\geq 290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	<b>0.67</b>
<b>b) Frondosas*</b> Madera maciza o laminada encolada con una densidad (normal) característica $\geq 350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	<b>0.54</b>

Los materiales de que están formadas las piezas estructurales, lógicamente son la madera y materiales derivados de ella o fabricados a partir de la misma como son, los tableros de partículas, contrachapados, de densidad media o de fibra, OSB, laminados, enlistonados, etc. y la madera laminada encolada (M.L.E.) (Perea, 1991 y Eurocódigo 5, 1995)

Estos materiales en exposición al fuego normalizado, la profundidad de carbonización eficaz viene dada por la relación:

$$d_{char} = \beta_0 t \quad (8)$$

donde:

$\beta_0$  velocidad de carbonización eficaz en mm/min, que es ligeramente superior a la velocidad real de carbonización, permitiendo así suponer que la sección reducida sigue siendo rectangular, despreciando de esta manera el efecto redondeo de las aristas.

$t$ : tiempo de exposición al fuego.

**CUADRO 3. Velocidades de Carbonización  $\beta_0$**

Especies de Maderas	$\beta_0$ (en mm/min)
<b>a) Coníferas:</b> Madera laminada encolada con una densidad (normal) característica $\geq 290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y con una dimensión mínima de 35 mm.	<b>0.8</b>
Madera laminada encolada con una densidad característica $\geq 290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	<b>0.7</b>
Tableros de madera con densidad característica de $450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y con un grueso de 20 mm.	<b>0.9</b>
<b>b) Frondosas:</b> Madera maciza o laminada encolada con una densidad (normal) característica $\geq 450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y madera de roble.	<b>0.5</b>
Madera maciza o laminada encolada con una densidad (normal) característica $\geq 290 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .	<b>0.7</b>

## Metodología

### Ensayos realizados en LICOF. (FEDER-CICYT REF. IFD97-0932, 2201-2002)

Los valores de avance de la carbonización en las piezas estructurales que conformaban las muestras de ensayo, ensayadas en el LICOF, se determinaron por medición directa, tras retirar las muestras del horno una vez finalizado el ensayo.

El cálculo se hizo por dos procedimientos, dando ambos valores muy próximos.

Para el primer procedimiento se aplicó la fórmula utilizada para los revestimientos de paneles de madera y derivados de la madera para determinar **el tiempo de fracaso o sea el momento de alcanzar la isoterma de 300 °C**, la cual es la siguiente:

$$t_f = (h_p / \beta_0) - 4, \quad (9)$$

donde:

$t_f$  = tiempo de fracaso en minutos,

$\beta_0$  = es la proporción de carbonización básica en mm/min. y

$h_p$  = es el espesor de la carbonización de todas las capas en mm. y

El segundo que consistía simplemente en dividir el espesor de carbonización real despreciando los tres primeros milímetros de formación de carbón (Elvira y Peris, 1982), por el tiempo, basándose en cómo se comporta la madera ante una fuente de energía calorífica (Vignote y Peris, 2000).

### Ensayos en el LGAI

De observaciones y mediciones después de los ensayos sobre las tres vigas ensayadas en LGAI, se deduce lo siguiente:

Los valores de la expresión:  $d_{char} = \beta_0 \cdot t_f$ , vienen expresados en el Cuadro del apartado 4 del informe de ensayo de LGAI documento base que se utilizó para la elaboración de este trabajo.

En él se reflejan los datos de registro de la temperatura de 300 °C en cuatro puntos de profundidad de la pieza de MLE (*a 15 mm, 30 mm, 50 mm y 70 mm*) y en la columna siguiente el tiempo en minutos que se tardó en alcanzar esa temperatura y ser registrada por los termopares correspondientes.

En la última columna se expresa la velocidad de combustión que no es lo mismo que penetración de la carbonización, puesto que para alcanzar los 300 °C de temperatura, la madera expuesta al fuego ha debido de pasar por la fase de pirólisis interna o sea por la fase endotérmica.

A partir de la fórmula  $t_f = (h_p / \beta_0) - 4$ , es como se ha calculado el valor  $b_0$ , obteniéndose los resultados expresados en los Cuadros 5 y 6.

## RESULTADOS

De acuerdo a la anterior metodología y a los datos obtenidos de los ensayos realizados en LICOF, los diferentes resultados se expresan en el Cuadro 4.

CUADRO 4. Valor de  $\beta_0$  de las diferentes especies de madera ensayadas.

Muestra	Procedimiento primero (mm/min.)	Procedimiento segundo (mm/min.)
Ensayo 1: <i>Pinus pinaster</i> Ppt3 (una cara)	$b_0 = 0,78$	$b_0 = 0,80$
Ensayo 1: <i>Pinus pinea</i> Pp(PU)3 (una cara)	$b_0 = 0,86$	$b_0 = 0,90$
Ensayo 2: <i>Pinus nigra</i> Pn(J) 8 (3 caras)	$b_0 = 0,68$	$b_0 = 0,69$
Ensayo 2: <i>Pinus pinaster</i> Ppt 8 (una cara)	$b_0 = 0,75$	$b_0 = 0,75$

Los resultados de los ensayos realizados en el LGAI, se indican en los Cuadros 5 y 6.

CUADRO 5. Resultados de los ensayos en LGAI

Muestra ensayada	Distancia de carbonización: $d_{char}$	Velocidad de carbonización ( $b_0$ ) (Valores medios) mm/min
Pino salgareño (ref. Pn (J) 7)	55 mm	0.72
Pino piñonero (ref. Pp (Pv) 3)	55 mm	0.67
Pino negral (Ppt8)	55 mm	0.76

De los datos de los cuadros de resultados del Informe técnico de ensayo emitido por el LGAI, se deduce que la pérdida de sección de las piezas ensayadas es la presentada en el Cuadro 6.

CUADRO 6. Pérdida de sección por lado expuesto al fuego de las vigas de MLE ensayadas en LGA

Muestra	Pérdida de sección: mm/min	Pérdida sección cm/min	Pérdida sección en 15 minutos
Núm. 1	0.80	0.080	1.20 por lado expuesto
Núm. 2	0.64	0.064	0.96 por lado expuesto
Núm. 3	0.86	0.086	1.29 por lado expuesto

Datos que se obtendrían de dividir la carbonización real que es igual a 55 mm por el tiempo real que ha tardado en producirse esa carbonización o sea en llegar a la temperatura de 300 °C. De tal forma que para la muestra número 1, el tiempo real fue de 68 minutos, para la muestra 2 fue de 86 minutos y para la muestra 3 fue de 64 minutos.

Se obtiene un valor medio de pérdida de sección por carbonización en la madera laminada encolada de los pinos de Andalucía de aproximadamente 1.1 cm por lado expuesto al fuego en un cuarto de hora.

## DISCUSIÓN

Desde que se viene utilizando en los sistemas constructivos en madera para la fabricación de piezas estructurales la MADERA LAMINADA ENCOLADA, se da por hecho que las especies a utilizar son las maderas procedentes de bosques de coníferas del Centro y Norte de Europa, básicamente madera de *Pinus sylvestris* L., Picea y Abies, siendo tal que en las Normas UNE y EN, (CTB, 1973; DTU, 1988; Jiménez, 1991; Norma EN 13381-7, 2001) se hace mención a estas especies en función de que sus valores de resistencias mecánicas y de comportamiento al fuego han sido experimentados sobradamente, por lo que este proyecto pretendió con sus investigaciones demostrar que las maderas originarias de los montes españoles podrían cumplir con las características deseadas para la función de conformación de piezas de MLE, hecho que se ha demostrado, tanto en el aspecto de propiedades resistentes a los esfuerzos exteriores como frente a una hipotética acción de un fuego desarrollado, siendo este último aspecto el tratado en este trabajo.

## CONCLUSIONES

\* Se ha comprobado que la velocidad de carbonización de las piezas de madera laminada encolada (MLE), fabricada con maderas de especies de coníferas españolas y más concretamente con tres especies de pinos naturales de los montes de Andalucía está dentro del valor  $b_0 = 0.7 \text{ mm/min.} \pm 20 \%$  que establece el Eurocódigo 5,

parte 1-2 y la Norma europea EN 1995, parte 1-2.

\* La distancia de carbonización está igualmente dentro de lo establecido por las experiencias europeas y recogido en la normativa de valor  $1.0 \text{ cm} \pm 10 \%$  por cada 15 minutos de exposición al fuego y por lado del elemento estructural expuesto.

## LITERATURA CITADA

- ELVIRA, M.; JIMÉNEZ-PERIS, F. J. 1982. "Comportamiento al Fuego de Materiales y Estructuras". INIA-MAPA 285 p.
- EUROCÓDIGO 5.-Plan de Estructuras de Madera. Proyecto de Estructuras de Madera. Parte 1-2 "Reglas Generales del Proyecto de Estructuras de Madera Sometidas al Fuego". AENOR. 51 p.
- JIMÉNEZ PÉRIS, F. J. -1991. I Curso de Construcción en Madera. Cap. La defensa contra el Fuego. Colegio. Oficial Arquitectos de Sevilla.
- LE COMPORTEMENT DU BOIS AU FEU.-CAHIERS DU CENTRE TECHNIQUE DU BOIS. Paris-France 1973. 47 p.
- METHODE DE JUSTIFICACION PAR LE CALCULE DE LA RESISTANCE AU FEU DES STRUCTURES EN BOIS. Régles Bois feu 88. DTU (Document Technique Unifié). Paris-France. 1988. 44 p.
- NBE EM-99. Estructuras de Madera: Anejo 9. "Reglas complementarias para las estructuras de madera en situación de incendio".
- NORMA EN 13381-7 .-2001. "Método de ensayo para la determinación de la contribución a la resistencia al fuego de elementos estructurales: Protección aplicada a elementos de madera".
- PEREA ALONSO, E.. 1991. La Estructura de Madera Laminada Encolada y su control de Calidad. Capitulo del I Curso de Construcción en Madera. Colegio. Oficial Arquitectos de Sevilla.
- prEN 1995-1-2.-EUROCÓDIGO 5. PLAN DE ESTRUCTURAS DE MADERA. Parte 1-2: octubre 2001:Reglas generales Plan estructural del fuego. Proyecto final. (stage 34)-INNSBRUCK (AUSTRIA) Y COPENHAGUE (DINAMARCA) ABRIL 2002.
- PROYECTO FEDER-CICYT REF. 1FD97-0932: 2001-2002. "Resultados de los ensayos referentes a los objetivos del mismo respecto a comportamiento al fuego". UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA-ETSIA M España.
- VIGNOTE, S.; JIMÉNEZ PERIS, F. J.-2000. 2ª Edición "Tecnología de la Madera". edit. MAPA/Mundi Prensa. MADRID. 653 p. (España).