

Folleto Técnico

3

Comportamiento del Fuego

3.1 Introducción

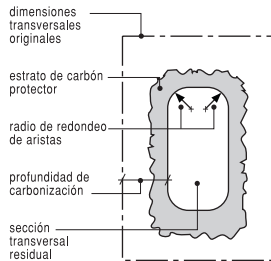


Figura 1:
Características de la madera carbonizada.

La madera, pese a ser considerada un material combustible, resulta un producto valioso cuando se le utiliza en estructuras resistentes al fuego. Al quedar la superficie de una pieza de madera expuesta a temperaturas elevadas durante períodos de tiempo prolongados a la acción del fuego experimenta una descomposición química o pirolisis que genera gases inflamables, que comenzarán a arder, resultando una carbonización superficial. La conductividad térmica de la madera es de por sí baja, y la del carbón considerablemente menor, por lo que hacia el interior de la madera no carbonizada los incrementos de temperatura, y consecuentemente las reducciones de las propiedades mecánicas, serán moderadas. El carbón genera por su parte un estrato que limita, tanto la conducción del calor hacia la madera del interior, como también el paso de los gases inflamables que constituyen el combustible del fuego desde el interior hacia el exterior. De esta forma, pese a ser combustible, cuando se le utiliza, empleando piezas de dimensiones transversales suficientemente grandes, la madera puede ser considerada como un material de construcción resistente al fuego.

La eficiente utilización de la madera en construcciones que deben satisfacer exigencias específicas de resistencia al fuego exige conocer, con cierta confiabilidad, la velocidad de avance de la carbonización que experimenta al quedar expuesta a las llamas. Este valor se emplea para calcular las reducciones de las dimensiones de la sección transversal de una pieza durante un incendio. La carbonización resulta más intensa en la región de las aristas de las piezas, dado que el efecto térmico de las caras convergentes se adiciona en estos sectores, situación que se evidencia a través del redondeo de las aristas.

En el cálculo de piezas, bajo consideración de una determinada resistencia al fuego, se especifican dimensiones de madera suficientes como para que la sección transversal remanente después de un período de tiempo preestablecido desde el inicio del incendio resulte capaz de resistir las cargas requeridas.

3.2 El concepto de resistencia al fuego

De acuerdo con lo establecido en los principales códigos de construcción la resistencia al fuego de una componente constructiva corresponde al período de tiempo, expresado en minutos, durante el que ésta es capaz de satisfacer una serie de exigencias al quedar sometida a un ensayo de combustión en laboratorio bajo una sollicitación temperatura-tiempo de acuerdo con la curva unitaria temperatura-tiempo:

$$T - T_o = 345 \cdot \log(8 \cdot t_F + 1)$$

En esta expresión T corresponde a la temperatura alcanzada después de transcurrido un tiempo t_F y T_o a la temperatura ambiental antes del inicio del incendio, expresadas ambas en °K o °C, y t_F al tiempo transcurrido desde el inicio del incendio, expresado en minutos.

Las exigencias consisten esencialmente en:

- mantener la capacidad resistente durante el tiempo del ensayo de control (criterio de estabilidad)
- en el caso de componentes de la envolvente, asegurar el confinamiento del recinto en el que se desarrolla el fuego (criterio de integridad), sin experimentar en la superficie opuesta a la acción del fuego incrementos de temperatura superiores a 140° C en promedio y superiores a 180° C en forma puntual (criterio de aislación).

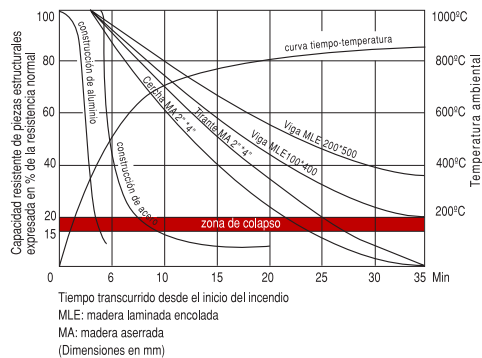


Figura 2:
Curva de desarrollo de temperaturas y resistencias comparativas en ensayos de fuego.

De acuerdo con la duración de su capacidad de resistencia al fuego, las componentes constructivas se clasifican en categorías o clases de resistencia al fuego que se designan con la letra F seguida de dos o tres dígitos que establecen la capacidad resistente en minutos. Se considera para estos efectos el peor resultado que se haya obtenido en el ensayo de al menos 2 probetas. Para las componentes constructivas de madera se trata habitualmente de las categorías F30, F60 y sólo muy ocasionalmente, de F90, con duraciones de resistencia al fuego de al menos 30, 60 y 90 minutos, respectivamente.

En el siguiente diagrama se ha graficado el desarrollo de las temperaturas durante un incendio normal de acuerdo con la expresión anterior, en conjunto con la reducción de la capacidad resistente que experimentan algunos materiales de construcción producto del calentamiento, expresada ésta como porcentaje de la resistencia correspondiente a condiciones normales. Destaca el rápido incremento que experimenta la temperatura ambiental durante los minutos iniciales de un incendio y la sorprendente reducción de la capacidad resistente de materiales incombustibles tales como los metales, en ese mismo período. Se asume que un material colapsa cuando su resistencia se reduce al 20 % o menos de la correspondiente a condiciones normales. Del diagrama se aprecia que una estructura metálica sin protección se desploma antes de 10 minutos de iniciado el incendio, mientras que la madera laminada, pese a ser combustible, es capaz de resistir al menos 30 minutos, en la medida que las dimensiones de los elementos estructurales se incrementan.

3.3 Combustión sólida: Carbonización

La madera es un material polímero de naturaleza orgánica que al quedar expuesto a temperaturas superiores a 120° C durante períodos de tiempo prolongados puede inflamarse y entrar en combustión, resultando este proceso en la formación de grandes volúmenes de gases inflamables, humo y carbón. En la medida que la intensidad del efecto térmico aumenta, el lapso de tiempo requerido para la inflamación de la madera disminuye, pudiendo producirse una inflamación espontánea de la superficie de madera expuesta ante temperaturas del orden de los 300° C. Sin embargo la capacidad de la madera de carbonizarse lentamente, con una velocidad de avance del proceso prácticamente constante e independiente de las condiciones del incendio, ha permitido desarrollar criterios de diseño y de verificación de la capacidad resistente de elementos estructurales y de uniones. Estos consideran las dimensiones originales de las piezas de madera, su condición de exposición al fuego, la profundidad de carbonización y la reducción experimentada por las propiedades mecánicas producto del efecto de calentamiento. En el análisis se asume que sólo el núcleo residual de madera no carbonizada participa en la resistencia de las solicitaciones.

La regularidad superficial y homogeneidad física de la madera laminada encolada la hacen especialmente adecuada para aplicar sobre ella los procedimientos que se explica en lo siguiente y que reflejan la metodología de diseño y verificación considerada en la norma alemana DIN 4102 Parte 4¹ y en el Código Europeo EN 1995-1-2².

¹ DIN 4102, Teil 4, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Zusammenstellung und Anwendung klassifizierte Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile. Marzo 1994.

² Eurocode 5, Design of timber structures, Part 1.2 General Rules-Structural fire design, 2000.

3.3.1 Redondeo de aristas

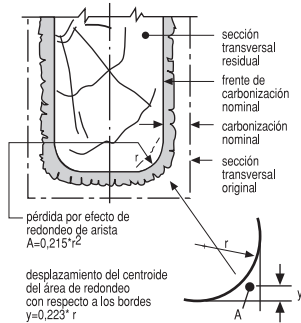


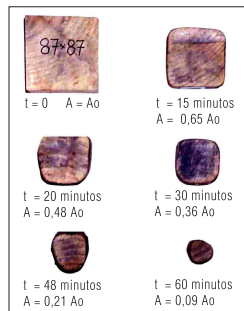
Figura 3:
Efecto del redondeo de aristas durante la combustión.

3.3.2 Velocidad de carbonización

De acuerdo con EN 1995-1-2 para madera laminada encolada de coníferas de densidad normal característica no inferior a 290 Kg/m^3 y cuando en la modelación de la carbonización para el cálculo de las propiedades estáticas de la sección transversal residual se prescinde del efecto de redondeo de aristas, se puede asumir una velocidad de carbonización nominal de $0,7 \text{ mm/min}$. Si en cambio se considera el redondeo de aristas la velocidad se puede reducir a $0,64 \text{ mm/min}$. Estos valores concuerdan con la velocidad de $0,65 \text{ mm/min}$, sugerido por Collier³ en Nueva Zelanda para la madera de Pino radiata. Nueva Zelanda resulta siempre un referente valioso e interesante para Chile en el campo de la construcción en madera, por exhibir un excelente nivel de ingeniería estructural e incorporar en sus investigaciones en el área de la ingeniería estructural en madera, Pino radiata de características muy similares a las de la madera que comercializa en nuestro mercado.



a. rebanada de probetas, después del ensayo



b. Secciones transversales residuales

Figura 4:
Carbonización efectiva en piezas de madera aserrada de pino radiata. (Memoria de A. Ramírez)

En Chile, el fenómeno se ha estudiado en forma bastante incipiente. Los principales antecedentes disponibles a la fecha corresponden a los resultados de ensayos de combustión de piezas de madera de distintas especies y sometidas a diversos tratamientos superficiales, físicos y químicos, expuestos en un horno cilíndrico a las condiciones de un incendio estándar, que constituyeron la fase experimental de la memoria de titulación del ingeniero civil Alejandro Ramírez Calvo en la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile⁴. Para madera aserrada (sección $90/90 \text{ mm}$; densidad aparente 490 kg/m^3) y madera laminada encolada (sección $126/126 \text{ mm}$; densidad aparente 570 kg/m^3) de Pino radiata, sin ningún tipo de protección superficial, se midieron velocidades medias de carbonización de $0,90$ y $0,85 \text{ mm/min}$, respectivamente. Los resultados pueden interpretarse como cotas superiores de carbonización, ya que en los ensayos se inyectó oxígeno en forma forzada hacia el interior del horno. En un incendio típico, en cambio, las condiciones de ventilación se dificultan debido a la presencia de humo o al confinamiento constructivo.

Sobre la base de los antecedentes expuestos y dada la similitud de propiedades entre el Pino radiata nacional y el crecido en Nueva Zelanda, se estima razonable considerar en las verificaciones de la resistencia al fuego de elementos de madera laminada encolada de Pino radiata una velocidad de carbonización nominal de $0,7 \text{ mm/min}$, incrementándose este valor para madera aserrada a $0,8 \text{ mm/min}$.

³ P. Collier Charring rates of New Zealand timbers New Zealand Timber Design Journal. Issue 2, Volume 2, 1993.

⁴ Ramírez A., Comportamiento de la madera frente al fuego y su protección. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago, 2001.

3.3.3 Carbonización efectiva

Se calcula, en mm, como el producto de la velocidad de carbonización, expresada en mm/min. por el tiempo transcurrido desde el inicio del incendio, expresado en min. y se designa usualmente por la letra griega β .

3.3.4 Sección transversal residual

Corresponde a la superficie de madera no carbonizada remanente luego de transcurrido un determinado tiempo desde el inicio del incendio.

En la siguiente tabla se presentan expresiones de las propiedades estáticas requeridas en el diseño al fuego asociadas a la sección transversal residual. Se discrimina entre el método exacto, que considera el redondeo de aristas y el método aproximado, que asume una carbonización de aristas recta.

Propiedades estáticas de la sección transversal residual después de "t" minutos desde el inicio del incendio			
Propiedad	Acción Fuego	Método Exacto	Método Aproximado
Área	Cuadrilateral	$A_r = (h_o - 2 * \beta * t)(b_o - 2 * \beta * t) - 4 * 0,215 * r^2$	$A_r = (h_o - 2 * \beta * t)(b_o - 2 * \beta * t)$
	Trilateral	$A_r = (h_o - \beta * t)(b_o - 2 * \beta * t) - 2 * 0,215 * r^2$	$A_r = (h_o - \beta * t)(b_o - 2 * \beta * t)$
Inercia mayor	Cuadrilateral	$I_r = \frac{(b_o - 2 * \beta * t)(h_o - 2 * \beta * t)^3}{12} - 2 \left(2 * 0,215 * r^2 \left(\frac{h_o - 2 * \beta * t}{2} - 0,223 r \right)^2 \right)$	$I_r = \frac{(b_o - 2 * \beta * t)(h_o - 2 * \beta * t)^3}{12}$
	Trilateral	$I_r = \frac{(b_o - 2 * \beta * t)(h_o - \beta * t)^3}{12} - 2 * 0,215 * r^2 \left(\frac{h_o - \beta * t}{2} - 0,223 r \right)^2$	$I_r = \frac{(b_o - 2 * \beta * t)(h_o - \beta * t)^3}{12}$
Módulo resistente	Cuadrilateral	$W_r = \frac{2 * I_r}{h_o - 2 * \beta * t}$	
	Trilateral	$W_r = \frac{2 * I_r}{h_o - \beta * t}$	

en las expresiones anteriores son:

- b_o, h_o : dimensiones transversales originales, mm;
- A_r : sección transversal residual, mm²;
- I_r : momento de inercia residual, mm⁴;
- W_r : módulo resistente residual, mm³;
- β : velocidad de carbonización, mm/min;
- t : tiempo transcurrido desde el inicio del incendio, min;
- r : radio de redondeo, $r = \beta * t$, mm

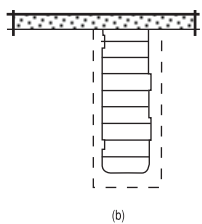
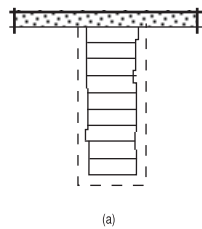
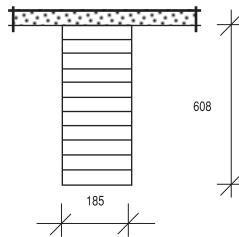


Figura E1:
Sección transversal de viga de madera laminada encollada.

Ejemplo 1

Cálculo de la sección transversal residual y del momento de inercia después de 60 minutos de fuego para una viga de madera Hilam

$$\rho_{12,k} = 391 \text{ kg/m}^3 > \rho_{12,k, \text{mín}} = 290 \text{ kg/m}^3, b_o \cdot h_o = 185 \cdot 608 \text{ mm},$$

ataque del fuego trilateral.

Solución

Se compararán los dos criterios de análisis, desde el punto de vista de la eficiencia de sus resultados

Caso a: carbonización simplificada

$$\beta_o = 0,7 \text{ mm/min}$$

$$\begin{aligned} \text{Profundidad de carbonización } d_{\text{carb}} &= 60 \cdot 0,7 = 42 \text{ mm} \\ h_r &= 608 - 42 = 566 \text{ mm} \\ b_r &= 185 - 2 \cdot 42 = 101 \text{ mm} \end{aligned}$$

Sección transversal residual

$$A_r = (101 \cdot 566) = 57.166 \text{ mm}^2$$

$$\text{Momento de inercia } I_r = \frac{101 \cdot 566^3}{12} = 1,526 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$\text{Módulo resistente } W_r = \frac{101 \cdot 566^2}{6} = 5,392 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Caso b: carbonización considerando redondeo de aristas

$$\beta_o = 0,64 \text{ mm/min}$$

$$\begin{aligned} \text{Profundidad de carbonización } d_{\text{carb}} &= 60 \cdot 0,64 = 38,4 \text{ mm} \\ h_r &= 608 - 38,4 = 569,6 \text{ mm} \\ b_r &= 185 - 2 \cdot 38,4 = 108,2 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{radio de redondeo en arista } r = 38,4 \text{ mm}$$

Sección transversal residual (ver fig. 2)

$$A_r = (108,2 \cdot 569,6) - 2 \cdot 0,215 \cdot 38,4^2 = 60.996 \text{ mm}^2$$

$$\text{Momento de inercia } I_r = \frac{108,2 \cdot 569,6^3}{12} - 2 \cdot 0,215 \cdot 38,4^2 \cdot (0,5 \cdot 569,6 - 0,223 \cdot 38,4)^2 = 1,618 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$\text{Módulo resistente } W_r = \frac{1,618 \cdot 10^9 \cdot 2}{569,6} = 5,681 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

El precio de la simplificación consiste en reducciones de 6,3%, 6% y 5,1% de la sección transversal residual, momento de inercia residual y el módulo resistente residual, respectivamente.

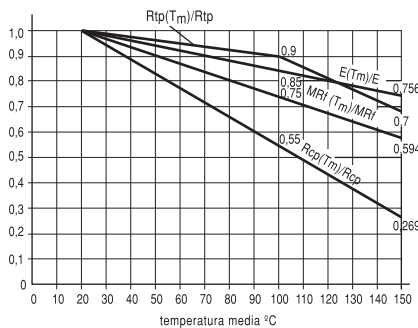
3.4 Efectos de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de la madera

En estudios experimentales se ha podido apreciar que al quedar expuesta una pieza de madera a temperaturas superiores a las normales sus propiedades mecánicas experimentan reducciones, las que hasta temperaturas no superiores a 70°C son recuperables. Por sobre este límite, aún cuando la madera vuelva a enfriarse, la capacidad mecánica experimentará mermas permanentes cuya magnitud será proporcional a la intensidad y duración del calentamiento experimentado.

3.4.1 Método Norma DIN 4102 Parte 4 (1994)

En la figura 5 se grafican las reducciones determinadas para las principales propiedades mecánicas de madera en estudios llevados a cabo en Alemania por Glos y Henrici⁵ en un programa experimental que consideró el ensayo de flexión, compresión y tracción, que fundamentan las especificaciones de la norma DIN 4102 en lo referente a la verificación al fuego de piezas de madera y madera laminada encolada. Se ensayaron 525 probetas de madera de abeto con densidades normales medias variables entre 370 y 410 kg/m³ sometidas a temperaturas de 20°C, 100°C y 150°C, con distintos contenidos de humedad. Las propiedades se expresan en función de la temperatura media, T_m , que alcanza el núcleo central de madera no carbonizada en la medida que el incendio transcurre.

Análiticamente, la situación graficada se puede expresar como una ponderación de las propiedades mecánicas correspondientes a condiciones normales por un factor de modificación por temperatura K_T específico para cada propiedad mecánica de acuerdo con lo siguiente:



Referencia: Glos, P.; Henrici, D. 1990 DIN 4102

Figura 5:
Reducciones porcentuales de las propiedades mecánicas de madera de coníferas en función de la temperatura media de la madera implícitas en DIN 4102, Parte 4 (1994).

Módulo de rotura en flexión

$$K_T = 1,0625 - 0,003125 * T_m \quad \text{para } 20^\circ\text{C} \leq T_m \leq 150^\circ\text{C}$$

Resistencia de compresión paralela a la fibra

$$K_T = 1,1125 - 0,005625 * T_m \quad \text{para } 20^\circ\text{C} \leq T_m \leq 150^\circ\text{C}$$

Resistencia de tracción paralela a la fibra

$$K_T = 1,1025 - 0,00125 * T_m \quad \text{para } 20^\circ\text{C} \leq T_m \leq 100^\circ\text{C}$$

$$K_T = 1,3 - 0,004 * T_m \quad \text{para } 100^\circ\text{C} \leq T_m \leq 150^\circ\text{C}$$

Módulo de elasticidad

$$K_T = 1,0375 - 0,001875 * T_m \quad \text{para } 20^\circ\text{C} \leq T_m \leq 150^\circ\text{C}$$

Scheer, Knauf y Meyer-Ottens⁶ derivaron la siguiente expresión para la temperatura media del núcleo de madera no carbonizada.

$$T_m = \left(1 + \kappa * \frac{b}{h}\right) * \left[20^\circ + \frac{180^\circ * (\beta * t_f)^\alpha}{(1 - \alpha) * \left(\frac{b}{2} - \beta * t_f\right)} \left\{ \left(\frac{b}{2}\right)^{1-\alpha} - (\beta * t_f)^{1-\alpha} \right\}\right]$$

con:

β velocidad de carbonización, en mm/min.

t_f duración del incendio, en min.

$\alpha = 0,398 * t_f^{0,62}$

κ factor dependiente del grado de sollicitación al fuego

= 0 para sollicitación bilateral (ataque de fuego sobre dos superficies)

= 0,25 para sollicitación trilateral (ataque de fuego sobre tres superficies)

= 0,40 para sollicitación cuadrilateral (ataque de fuego sobre las cuatro superficies)

b y h dimensiones iniciales de la sección transversal expresadas en mm

3.4.2 Método de la norma EC 5 (ENV 1995-1-2)

En el código europeo la temperatura media de la sección transversal residual no se incorpora explícitamente en los cálculos. Los efectos de la temperatura sobre las propiedades mecánicas se consideran ponderando las propiedades mecánicas correspondientes a condiciones normales por un factor de modificación por temperatura k_T específico para cada propiedad mecánica de acuerdo con lo siguiente:

módulo de rotura en flexión:
$$k_T = 1,0 - \frac{1}{200} * \frac{p}{A_r}$$

resistencia de compresión:
$$k_T = 1,0 - \frac{1}{125} * \frac{p}{A_r}$$

resistencia de tracción y módulo de elasticidad:
$$k_T = 1,0 - \frac{1}{330} * \frac{p}{A_r}$$

con p : perímetro de la sección transversal residual expuesta al fuego, en m
 A_r : superficie de la sección transversal residual, en m².

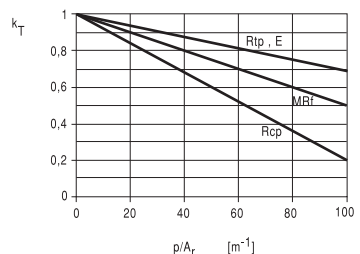
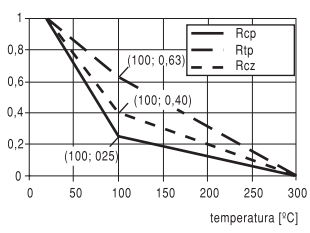


Figura 6: Factores de modificación por temperatura EN 1995-1-2.

La expresión gráfica de los factores se aprecia en figura 6.

El efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas considerado en el desarrollo de las expresiones anteriores resulta levemente más conservador que el implícito en las relaciones que fundamentan la norma DIN 4102 Parte 4. En el código europeo se utilizaron los resultados obtenidos por Källsner, König y Gerhard⁷ y que se esquematizan en los diagramas de la figura 7.



Referencia: Kallsner, B; König, J 2000
 Gerhards, C.C 1982 prEN 1995-1-2

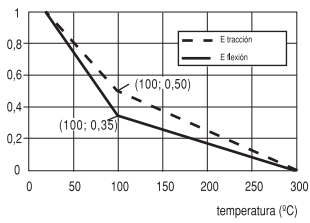


Figura 7: Efectos de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de la madera (EC 1995-1-2).

⁵ Glos, P; Henrici, D: Resistencia de madera de construcción ante temperaturas elevadas. Informe final del proyecto de investigación de la Sociedad Alemana para la Investigación en Madera en el Instituto de Investigación en Madera de la Universidad de Munich, 1990.
⁶ Scheer, Knauf y Meyer-Ottens. Rechnerische Brandschutzbemessung unbekleideter Holzbauteile, Grundlage für DIN 4102 T.4 Bautechnik 69 (1992), pag. 179-189.
⁷ Step 1. Estructuras de madera. Diseño y materiales de acuerdo con Eurocódigo 5. Informationsdienst Holz. Düsseldorf 1995.

3.5 Resistencia mecánica de la madera

3.5.1 Resistencia mecánica de la madera en condiciones normales

Por tratarse de una situación fortuita, inducida las más veces por acciones imprudentes y perfectamente evitables, las condiciones de verificación estructural durante un incendio se refieren al nivel de las resistencias medias. Esencialmente se trata de estimar el tiempo que requiere llevar la construcción a condiciones de colapso o pérdida absoluta de la funcionalidad. Esto equivale a controlar que el estado tensional inducido por las solicitaciones efectivas durante el incendio no sobrepasa la resistencia media de la madera bajo las condiciones de temperatura que se dan durante el incendio. Por esta razón normalmente los diseños conforme a norma en condiciones ambientales normales, designados como "diseños en frío" satisfacen la condición F30 de una verificación al fuego, o "diseño en caliente".

La resistencia de la madera en condiciones normales se puede determinar por medio de ensayos o utilizando como punto de partida los valores admisibles definidos para el material en la norma de diseño. En Chile la derivación de propiedades mecánicas admisibles para los productos estructurales de madera aserrada y madera laminada encolada se basan en la metodología norteamericana (ASTM D 245⁸, NDS⁹). La resistencia del material se refiere a un nivel que al menos el 95 % de las piezas que se ensayen es capaz de resistir, designada como resistencia característica asociada al percentil del 5%, nivel que se alcanza multiplicando la tensión admisible por el factor de ajuste correspondiente a la propiedad mecánica considerada. Para referir a su vez el percentil del 5% a la resistencia media, debe multiplicarse este último por el inverso del factor de variabilidad de la propiedad, asumiendo para la frecuencia de valores una distribución normal.

De acuerdo con esto y bajo aceptación de un coeficiente de variación 0,16 para las resistencias de flexión, tracción y compresión paralela y de 0,11 para el módulo de elasticidad, relaciones que se han podido apreciar sistemáticamente en los experiencias norteamericanas, las resistencias medias se calculan multiplicando las tensiones admisibles por 2,85, en el caso de flexión y tracción paralela y por 2,58 en compresión paralela a la fibra, a la vez que el módulo de elasticidad promedio requerido en las expresiones de la capacidad de carga crítica en condiciones de inestabilidad general (pandeo de columnas y volcamiento de vigas) se determina multiplicando el módulo de elasticidad característico por 2,03.

3.5.2 Resistencia mecánica de la madera durante un incendio

Ensayos experimentales en Alemania han demostrado que el efecto aislante de la capa de carbón de espesor 25 mm condiciona una temperatura del orden de 200 °C en el frente de carbonización, muy inferior a los 900°C que se pueden alcanzar en el ambiente del incendio. Lo interesante es que a una profundidad de 25 mm hacia el interior de la madera no carbonizada las temperaturas se reducen prácticamente a las existentes antes del inicio del incendio, por lo que sus propiedades mecánicas corresponden a las de la madera normal.

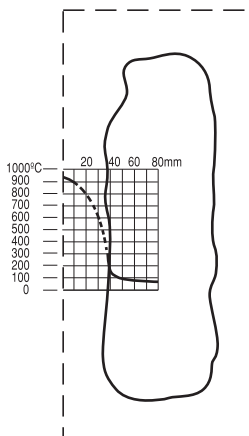


Figura 8:
Desarrollo típico de temperaturas a través de una pieza de madera en combustión (ensayo de cámara) combustión.¹⁰

⁸ ASTM D 245. Standard methods for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber. American Society for testing and Materials.

⁹ NDS National Design Specification for wood construction, 2001 Edition. American Forest & Paper Association.

¹⁰ Swedish and Finnish Redwood and Whitewood Performance in Fire. The Swedish Finnish Timber Council. Retford, 1981

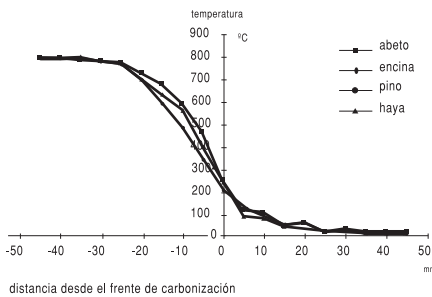


Figura 9: Perfil "estático" de temperaturas en el carbón y la madera (a la izquierda y derecha del frente de carbonización) para distintas especies forestales, ante una exposición al fuego unilateral.

La figura 9, que refleja los resultados obtenidos por Topf, Wegener y Lache en una investigación desarrollada para el Instituto para la Investigación en Madera de Munich¹¹ ofrece una visión más completa del desarrollo de temperaturas desde el frente de carbonización, considerando además lo que sucede en la capa de carbón. El frente constituye el origen coordinado referencial que se va desplazando con una velocidad igual a la velocidad de carbonización. Las temperaturas registradas para distintas especies madereras prácticamente coinciden. Se puede apreciar aquí también la rápida disminución de las temperaturas hacia el interior de la pieza. La zona de descomposición química se desarrolla entre las temperaturas de 200°C y 300°C, a la vez que la zona de carbonización se ubica en sectores de temperatura superior a 300°C.

Análogamente a la estimación de la carbonización, los criterios de diseño permiten dos opciones de verificación, una acuciosa y la otra simplificada. En la primera, para evaluar la capacidad resistente de la madera se aplica una corrección por temperatura sobre sus propiedades mecánicas por medio del anteriormente comentado factor de modificación K_T .

En la verificación simplificada se considera un incremento ficticio de la carbonización real, como compensación a no aplicar las correcciones por temperatura al evaluar la capacidad resistente de la madera.

3.5.2.1 Carbonización ficticia

Según se aprecia en la Figura 9 las propiedades de los estratos de madera adyacentes al frente de carbonización se ven comprometidos hasta una profundidad de aproximadamente 25 mm por una temperatura incrementada cuyo valor medio se ha podido estimar del orden de los 80 °C. De acuerdo con lo establecido en el diagrama de la Figura 5 para este nivel de temperatura las propiedades resistentes se reducen en promedio al 70% de su valor en un ambiente normal. En forma simplista, esto equivale a considerar que el 70 % de la franja de 25 mm no se ve afectada por la temperatura y que el 30% restante es completamente inefectivo. En la práctica la situación descrita equivale a descartar del volumen resistente no carbonizado una franja adicional de $0,30 \cdot 25 = 7,5$ mm, la que se define como carbonización ficticia. En consecuencia, el concepto del método simplificado consiste en calcular la sección transversal residual incrementando la carbonización efectiva en 7,5 mm y llevar a cabo la verificación considerando las propiedades mecánicas de la madera normal.

¹¹ Topf, Wegener y Lache. Informe final proyecto "Velocidad de carbonización de madera aserrada, madera laminada encolada y materiales de madera" Institut für Holzforschung, München, 1992.

3.6 Verificación al fuego de piezas estructurales de madera

En los problemas de diseño o verificación al fuego se deben cuantificar las tensiones inducidas por las solicitaciones, $E(t)$, en la sección transversal residual y la resistencia remanente de las piezas de madera, $R(t)$, durante la exposición al fuego, de manera de poder estimar el tiempo, t , que se requiere para que las primeras puedan llegar a sobrepasar a esta última. Este tiempo, expresado en minutos, corresponde a la resistencia al fuego del elemento.

Una visión esquemática de la situación planteada se presenta en la Figura 10. La resistencia al fuego, R_F , se alcanza en el tiempo t_f , cuando la resistencia del material $R(t)$ resulta menor que el estado tensional $E(t)$ inducido por las solicitaciones. Por esto la verificación a nivel de diseño se plantea por medio de la condición

$$E(t) < R(t)$$

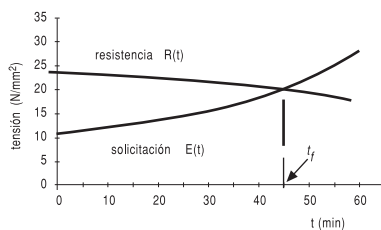


Figura 10: Concepto de diseño o verificación al fuego de una pieza estructural.

Cabe tener presente en la estimación de las solicitaciones que, durante un incendio, resulta poco probable contar con la sobrecarga de servicio completa, excepto en bodegas, almacenes, bibliotecas o similares. Al mismo tiempo, en la medida que el incendio transcurre la sobrecarga remanente se va reduciendo gradualmente, aspecto que también resulta aplicable sobre parte de la carga de naturaleza permanente, que se empieza a consumir. En un anteproyecto de norma australiano¹², por ejemplo, se proponía considerar una carga efectiva equivalente a la suma del 80% de las cargas de peso propio y el 40% de las sobrecargas de servicio. Una forma de racionalizar este criterio es aplicarlo en verificaciones para la categoría de resistencia al fuego F60 (60 minutos), definiendo adicionalmente una carga efectiva equivalente a la suma del 90% de las cargas de peso propio y el 70% de las sobrecargas de servicio en verificaciones para la categoría de resistencia al fuego F30 (30 minutos).

¹² Draft Nr.1 Australian Standard (December 1982). Rules for Use of Timber in Structures. Part 4- Fire Resistance of Timber Structures. AS 1720, Part 4-1983.

Ejemplo 2

Diseñar un sistema de vigas de piso de madera laminada Hilam espaciadas cada 2,44 m entre ejes, que cubre una luz de 6,00 m y que debe resistir una carga de peso propio de 1 kN/m² y una sobrecarga de servicio de 3 kN/m².

Restricciones:

- Disposición combinada de láminas Grado A-B-A (clasificadas mecánicamente) en los sextos extremos y los dos tercios centrales de la altura de las piezas.
- Flecha admisible: L/300 para estado de carga: "peso propio + sobrecarga"
L/480 para estado de carga: "sobrecarga"
- Resistencia al fuego F30 ante ataque del fuego trilateral.
- Considerar en la verificación al fuego el efecto de las temperaturas sobre las propiedades mecánicas de la Madera y una restricción de flecha L/30.

Solución

Estimación de solicitaciones

Peso propio	$q_{pp} = 1 \text{ kN/m}^2$
Sobrecarga de servicio	$q_{sc} = 3 \text{ kN/m}^2$
Carga de diseño	$q_{pp+sc} = 4 \text{ kN/m}^2$
separación entre vigas, $d = 2,44 \Rightarrow$	$q_{pp+sc, lin} = 4 * 2,44 = 9,76 \text{ kN/m} = 9,76 \text{ N/mm}$
Distancia entre apoyos,	$L = 6,00 \text{ m} \Rightarrow$
momento flector máximo:	$M = 9,76 * 6,00^2 / 8 = 43.920.000 \text{ N*mm}$
Por tratarse de un sistema de piso,	$\Rightarrow K_D = 1,00$
Asumiendo	$F_{f,dis} = 7,2 \text{ MPa}$

$$W_{req} = M / F_{f,dis} = 43.920.000 / 7,2 = 6.1000.000 \text{ mm}^3$$

considerando $b_o = 115 \text{ mm}$

$$h_{o, req} = \sqrt{\frac{6 * W_{req}}{b_o}} = \sqrt{\frac{6 * 6.1000.000}{115}} = 564 \text{ mm}$$

La altura comercial más próxima es 570 mm

Comprobación tensión de diseño en flexión:

Tabla 1, capítulo 1, una pieza de altura 570 mm consta de 15 láminas:

Para una disposición combinada de láminas Grado A-B-A \Rightarrow

$$H=15 \quad H/6 = 2,5 \rightarrow 3 \quad \Rightarrow H_A = 15, \quad H_B = 15 - 2 * 3 = 9$$

Según NCh 2157 racionalizadas según ASTM 3737 y estudios de BRIAN Walford en Nueva Zelanda¹³

$$RR = 0,58; \quad T = 0,961$$

$$F_{f,dis} = 0,75 * F_{f,b} * RR * T * k_h = 0,75 * 19 * 0,58 * 0,961 * \sqrt{\frac{300}{570}} = 7,39 \text{ MPa}$$

Verificación tensional:

$$W = b_o * h_o^2 / 6 = 115 * 570^2 / 6 = 6.227.250 \text{ mm}^3$$

$$f_t = M / W = 43.9200.000 / 6.227.250 = 7,05 \text{ MPa} < 7,39 \text{ MPa}$$

Verificación funcional:

$$I = b_o * h_o^3 / 12 = 115 * 570^3 / 12 = 1.774.766.250 \text{ mm}^4$$

$$E_{dis} = 0,95 * E_{b,A} * T = 0,95 * 11.000 * 0,961 = 10.040 \text{ MPa}$$

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{q_{pp+sc} * L^4}{E * I} = \frac{5}{384} \frac{9,76 * 6.000^4}{10.940 * 1.774.766.250} = 9,2 \text{ mm} \approx L/649$$

con mayor razón se satisface la exigencia de flecha para la acción exclusiva de la sobrecarga.

¹³ Waner M. Normativas chilena relativa al cálculo de construcciones de Madera laminada encolada. Departamento de Ingeniería Civil U. de Chile. 13. 2005

Comprobación de la Resistencia al fuego F30 ante ataque del fuego trilateral (el sistema de piso debe tener una resistencia al fuego de al menos F30):

Aplicando proposición australiana:

$$q_{F,dis} = 0,9 * q_{pp} + 0,7 * q_{sc} = 0,9 * 1.000 + 0,7 * 3.000 = 3.000 \text{ KN/m}^2$$

$$q_{F,dis,lim} = 3.000 * 2,44 = 7.320 \text{ KN/m} = 7,320 \text{ N/mm}$$

$$M_F = 7,320 * 6.000^2 / 8 = 32.940.000 \text{ N*mm}$$

Criterio simplificado

Despreciando redondeo de aristas $\Rightarrow \beta = 0,7 \text{ mm/min}$.

despreciando efectos térmicos:

$$c = \beta * t_p + 7,5 = 0,7 * 30 + 7,5 = 28,5 \text{ mm}$$

$$h_r = h_o - c = 570 - 28,5 = 511,5 \text{ mm}$$

$$b_r = b_o - 2 * c = 115 - 2 * 28,5 = 58 \text{ mm}$$

Aplicando NCh 2157

$$W_r = b_r * h_r^2 / 6 = 58 * 511,5^2 / 6 = 2.529.111 \text{ mm}^3$$

$$f_r = M / W = 32.940.000 / 2.529.111 = 13,0 \text{ MPa}$$

$$h_r = 511 \text{ mm} \text{ Tabla 1} \Rightarrow n \approx 14 \text{ láminas}$$

$$H_A = 14 \text{ y } H_B = 9$$

$$RR = 0,58; T = 0,952$$

$$F_{f,dis} = 0,75 * F_{f,d} * RR * T * k_h = 0,75 * 19 * 0,58 * 0,952 * \sqrt[9]{\frac{300}{511,5}} = 7,41 \text{ MPa}$$

$$MR_{prom} = 2,85 * 7,41 = 21,1 \text{ MPa} > f_r = 13,0 \text{ MPa}$$

$$E = 0,95 * 11.000 * 0,952 = 9,945 \text{ MPa}$$

Control flecha

$$I_r = b_r * h_r^3 / 12 = 58 * 511,5^3 / 12 = 646.820.330 \text{ mm}^4$$

$$\delta_F = \frac{5}{384} \frac{7,32 * 6.000^4}{9,945 * 646.820.330} = 19,2 \text{ mm} \approx L/312 \ll L/30$$

En consecuencia, la viga satisface la categoría F30.

Criterio exacto

$$c = \beta * t_p = 0,64 * 30 = 19,2 \text{ mm}$$

$$h_r = h_o - c = 570 - 19,2 = 550,8 \text{ mm}$$

$$b_r = b_o - 2 * c = 115 - 2 * 19,2 = 76,6 \text{ mm}$$

$$A_r = 76,6 * 550,8 - 2 * 0,215 * 19,2^2 = 42.033 \text{ mm}^2$$

Momento de inercia:

$$I_r = \frac{76,6 * 550,8^3}{12} - 2 * 0,215 * 19,2^2 * (0,5 * 550,8 - 0,223 * 19,2)^2$$

$$= 1,055 * 10^9 \text{ mm}^4$$

Módulo resistente:

$$W_r = \frac{1,055 * 10^9 * 2}{550,8} = 3,831 * 10^6 \text{ mm}^3$$

$$f_r = M / W = 32.940.000 / (3.830 * 10^6) = 8,60 \text{ MPa}$$

$$h_r = 550,8 \text{ mm} \text{ De Tabla 1} \Rightarrow n \approx 15 \text{ láminas}$$

$$H_A = 15 \text{ y } H_B = 9$$

$$RR = 0,58; T = 0,961$$

$$F_{f,dis} = 0,75 * F_{f,d} * RR * T * k_h = 0,75 * 19 * 0,58 * 0,961 * \sqrt[9]{\frac{300}{551}} = 7,42 \text{ MPa}$$

$$MR_{prom} = 2,85 * 7,42 = 21,1 \text{ MPa}$$

$$E = 0,95 * 11.000 * 0,961 = 10.040 \text{ MPa}$$

Efecto temperatura

DIN 4102 Parte 4

$$A = 0,398 * f_t^{0,62} = 0,398 * 30^{0,62} = 3,279$$

$$T_m = \left(1 + 0,25 * \frac{115}{570} \right) \left[20 + \frac{180 * (0,7 * 30)^{3,279}}{(1 - 3,279) \left(\frac{115}{2} - 0,7 * 30 \right)} \left\{ \left(\frac{115}{2} \right)^{1-3,279} - (0,7 * 30)^{1-3,279} \right\} \right]$$

$$= 64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$MR(64^\circ) = (1,0625 - 0,003125 * 64) * MR_k = 0,863 * 21,1 = 18,3 \text{ MPa} > f_t = 9,00 \text{ MPa}$$

$$E(64^\circ) = (1,0375 - 0,001875 * 64) * E = 0,918 * 10.040 = 9.216 \text{ MPa}$$

Control flecha

$$I_r = 1,055 * 10^9 \text{ mm}^4$$

$$\delta_F = \frac{5}{384} \frac{7,32 * 6.000^4}{9.216 * 1,055 * 10^9} = 12,7 \text{ mm} \approx L/472 \ll L/30$$

En consecuencia, la viga satisface la categoría F30.

Eurocódigo 1994-2

Método exacto

$$p = 2 * (b_r + h_r) = 2 * (0,0766 + 0,551) = 1,255 \text{ m}$$

$$A = 42.033 \text{ mm}^2 = 0,042 \text{ m}^2$$

$$p/A = 1,255/0,042 = 29,9$$

$$k_{T,MR} = 1,00 - 29,9/200 = 0,851$$

$$MR_{k,F} = 0,851 * 21,1 = 18,0 \text{ MPa} > f_t = 9,00 \text{ MPa}$$

$$k_{T,E} = 1,00 - 29,9/330 = 0,906$$

$$E_F = 0,906 * 10.040 = 9.096 \text{ MPa} \approx E_p, \text{ DIN 4102}$$

En consecuencia, independientemente del criterio que se considere, en este ejemplo la viga satisface la categoría F30.



Arauco Distribución S.A.
Av Pdte. E. Frei Montalva 21100, Lampa
Santiago, Chile

Mesa Central : (56-2) 425 8000
Area Comercial : (56-2) 425 8100
Fax : (56-2) 425 8109

www.araucodistribucion.cl
www.arauco.cl

