

Modelos probabilísticos para la reducción de resistencia de la madera en función de la temperatura

Probabilistic models for the reduction of timber strength as a function of temperature

Ester García-Castillo^a, Ignacio Payá-Zaforteza^b y Thomas Gernay^c

^a Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de València - ICITECH. esgarcas@upv.es

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de València - ICITECH. Catedrático de Universidad. igpaza@upv.es

^c PhD in Engineering Sciences. Johns Hopkins University. Assistant Professor. tgermay@jhu.edu

RESUMEN

Este artículo presenta modelos probabilísticos para la reducción de la resistencia a compresión y tracción de la madera en función de la temperatura. Estos se han desarrollado a partir de un gran número de datos experimentales recopilados de la literatura y consisten en funciones continuas que pueden implementarse fácilmente en un código numérico para su aplicación en enfoques de diseño prestacional para evaluar el grado de confianza de estructuras de madera nuevas y existentes en relación con la seguridad estructural frente al fuego. Del estudio se concluye que existe una gran variabilidad en la resistencia de la madera a altas temperaturas y que las relaciones deterministas de la actual EN 1995-1-2 resultan conservadoras.

ABSTRACT

This paper presents probabilistic models for the reduction of compressive and tensile strengths of timber with increasing temperature. The models have been developed based on a large amount of experimental data collected from the literature and consist of continuous functions that can be easily implemented in a numerical code for application in performance-based design approaches for assessing the degree of confidence of new and existing timber structures regarding structural fire safety. The study concludes that there is a large variability in timber strength at elevated temperatures and that the deterministic relationships suggested by the current EN 1995-1-2 are quite conservative.

PALABRAS CLAVE: madera, resistencia, compresión, tracción, temperatura, modelo probabilístico.

KEYWORDS: timber, strength, compression, tension, temperature, probabilistic model.

1. Introducción

La aplicación de enfoques de diseño prestacional en la ingeniería estructural contra incendios es cada vez más habitual. Estos enfoques suelen aplicarse en evaluaciones deterministas [1–3], en las que la incertidumbre de los parámetros de entrada no se cuantifica explícitamente. No obstante, en los análisis estructurales de seguridad frente al fuego intervienen numerosas variables con gran incertidumbre. Por lo tanto, los análisis probabilísticos constituyen un

enfoque más fiable para el diseño de nuevas estructuras en relación con la seguridad estructural frente a incendios. Además, los análisis probabilísticos también pueden ayudar a preservar estructuras existentes para las que los requisitos de la normativa actual son demasiado exigentes [4].

Uno de los parámetros determinantes y con gran influencia en los resultados del análisis del comportamiento frente al fuego de las

estructuras es la reducción de resistencia de los materiales con el aumento de la temperatura. En el caso de estructuras de madera, la actual EN 1995-1-2 [5] establece modelos bilineales deterministas de reducción de resistencia y rigidez en función de la temperatura, que pueden emplearse en simulaciones numéricas cuando se adoptan enfoques de diseño prestacional. Sin embargo, tal y como sugiere la literatura [6,7], existe una gran variabilidad en los datos experimentales de reducción de resistencia de la madera a temperaturas elevadas.

En este contexto, esta comunicación presenta modelos probabilísticos que describen la variabilidad de la reducción de la resistencia a compresión y tracción de la madera en función de la temperatura. Los modelos se han desarrollado a partir de un gran número de datos experimentales recopilados de la literatura y consisten en funciones simples y continuas, que pueden implementarse fácilmente en un código numérico para el análisis de estructuras frente al fuego. Con ello, esta comunicación pretende fomentar el diseño de estructuras de madera más fiables y eficientes en lo que respecta a la seguridad estructural frente a incendios, así como facilitar la preservación de más elementos estructurales de madera en edificios existentes.

2. Metodología

El objeto de este artículo es el de proponer unos modelos probabilísticos que caractericen la reducción de resistencia a compresión y tracción de la madera paralela a la fibra en función de la temperatura. Para la definición de estos modelos, se recopiló un gran número de datos experimentales recogidos en la literatura sobre la resistencia a compresión y tracción de la madera a temperaturas elevadas. El conjunto de datos abarca temperaturas entre los 20°C y los 300°C, siendo esta última la temperatura de carbonización de la madera comúnmente aceptada [5], a partir de la cual la resistencia y rigidez de esta se consideran despreciables.

Seguidamente, los datos se agruparon en intervalos de 20°C y se ajustaron múltiples distribuciones de probabilidad a cada uno de los grupos de datos. Por último, para medir la bondad de ajuste de cada una de las distribuciones en cada grupo de datos y seleccionar aquella que globalmente proporciona el mejor ajuste, se empleó el criterio de información bayesiano (BIC) [8].

3. Datos sobre la resistencia de la madera en función de la temperatura

Los datos experimentales se recopilaron de un total de 30 artículos: 10 de ellos proporcionan datos de resistencia a compresión a temperaturas elevadas [9–18], 13 proporcionan datos de resistencia a tracción [19–31] y 7 proporcionan datos tanto de resistencia a compresión como a tracción [32–38]. Los datos provienen de ensayos sobre probetas tanto libres de defectos [10,12–14,17,18,22,23,28,30,34,35,37,38] como con nudos u otro tipo de defectos [16,20,21,24,27,29,31,32]. A excepción de los ensayos realizados por Wiesner et al. [16] sobre probetas de madera laminada cruzada (CLT), estas son de madera maciza. Por último, las probetas abarcan un rango amplio de densidades (entre 130 y 785 kg/m³) y de humedades (entre 0 y 20%), así como de tamaños.

Respecto al calentamiento de las probetas, se emplearon mayoritariamente hornos, cámaras de secado o placas calefactoras. Por otra parte, en la mayoría de los ensayos, las probetas se calentaron a la temperatura objetivo antes de aplicar la carga. Finalmente, la forma más común de aplicación de la carga en los ensayos para determinar la resistencia de la madera a altas temperatura fue por control de los desplazamientos.

Para la resistencia a compresión y tracción, respectivamente, la Figura 1 y la Figura 2 muestran los datos experimentales recopilados de la literatura en forma de factor de reducción de la resistencia de la madera con el aumento de

la temperatura ($k_{c,0,T}$ o $k_{t,0,T}$). Dicho factor es el cociente entre la resistencia de la madera a una temperatura T ($f_{c,0,T}$ -en compresión- o $f_{t,0,T}$ -en tracción-) y la resistencia de la madera a temperatura ambiente ($f_{c,0,20}$ o $f_{t,0,20}$). Se incluye un total de 302 datos experimentales en el caso de la resistencia a compresión y 182 en el de la resistencia a tracción. Como se puede apreciar, los datos muestran una gran dispersión. La Figura 1 y la Figura 2 también incluyen los modelos bilineales de reducción de resistencia de la madera con el aumento de la temperatura propuestos por la actual EN 1995-1-2 [5]. Como puede observarse, los modelos del Eurocódigo parecen conservadores en comparación con los datos experimentales, especialmente en el caso de la resistencia a compresión.

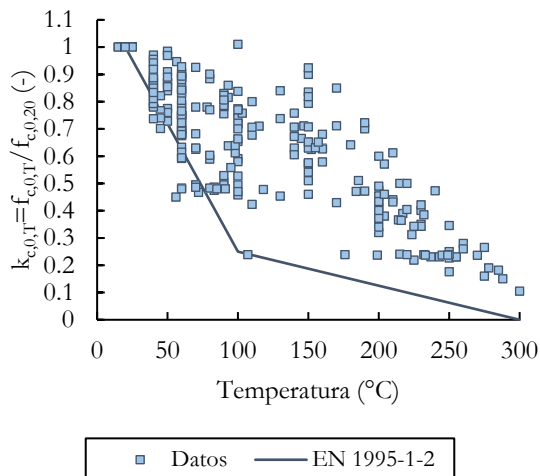


Figura 1. Datos de factores de reducción de la resistencia a compresión paralela a la fibra ($k_{c,0,T}$).

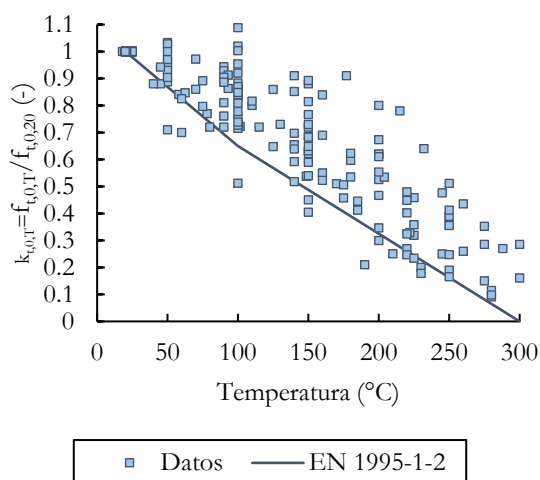


Figura 2. Datos de factores de reducción de la resistencia a tracción paralela a la fibra ($k_{t,0,T}$).

Cabe señalar que, a partir de la revisión bibliográfica realizada para recopilar los datos experimentales, se observó una falta de estandarización en los métodos de ensayo de probetas de madera a temperaturas elevadas empleados en las distintas publicaciones. Especialmente, se encontró una gran variabilidad en las dimensiones de las probetas, así como en las condiciones de calentamiento y aplicación de la carga. La falta de estandarización, así como el gran número de factores que influyen en la resistencia de la madera, dificultan la comprensión del efecto de las altas temperaturas en dicha resistencia. Por consiguiente, es deseable una mayor estandarización de estos métodos de ensayo.

4. Modelos probabilísticos

4.1. Selección y definición de los modelos

Para definir los modelos probabilísticos de reducción de la resistencia a compresión y tracción de la madera en función de la temperatura, se consideraron ocho distribuciones de probabilidad distintas como candidatas. Estas son la normal, log-normal, gamma, logística, log-logística, de Laplace, Weibull y de valores extremos.

Tanto para la resistencia a compresión como a tracción, cada una de las distribuciones candidatas se ajustó a cada conjunto de datos agrupados en intervalos de 20°C. La Figura 3 muestra, tanto para la resistencia a compresión como a tracción, el número de datos experimentales incluidos en cada intervalo de 20°C. Cabe señalar que todos aquellos intervalos con menos de seis datos no se tuvieron en cuenta para definir los modelos probabilísticos.

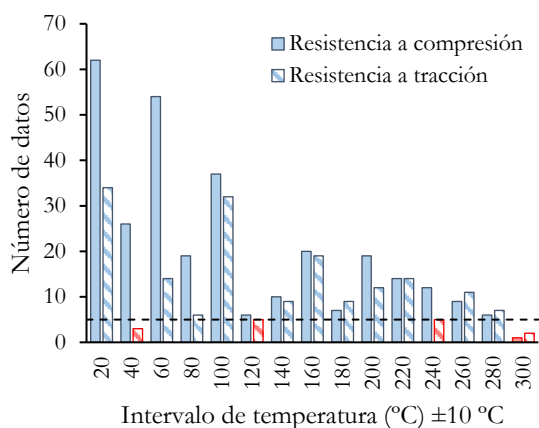


Figura 3. Número de datos experimentales por intervalo de 20°C.

Como se describe en la Sección 2, la bondad de ajuste relativa de cada una de las ocho distribuciones candidatas en cada intervalo de temperatura se determinó empleando el criterio de información bayesiano (BIC) [8], el cual está basado en la función de verosimilitud. Así pues, la Tabla 1 muestra, para cada distribución candidata y según se trate de la reducción de la resistencia a compresión o tracción, los valores medios del BIC [8] teniendo en cuenta los distintos intervalos de temperatura. Cuanto menor es el valor del BIC [8], mejor es la calidad del modelo.

Los resultados de la Tabla 1 indican que la distribución Weibull es la que mejor representa los datos de resistencia a compresión de la madera, mientras que la distribución Gamma, seguida de cerca por la distribución Weibull, sería la más adecuada para describir la reducción de la resistencia a tracción de la madera en función de la temperatura. Dado que los valores medios del BIC [8] obtenidos para las distribuciones Gamma y Weibull son muy próximos, parece razonable asumir la misma distribución tanto para la resistencia a compresión como a tracción, facilitando así la aplicación de estos modelos probabilísticos en un código numérico. Además, el uso de la distribución Weibull para caracterizar la resistencia de la madera está respaldado por varias fuentes fiables [39–41] cuando no existen restricciones o bases establecidas para

seleccionar una distribución en concreto. Por lo tanto, se adoptó la distribución Weibull para definir los modelos probabilísticos tanto de reducción de resistencia a compresión como a tracción de la madera a temperaturas elevadas.

Tabla 1. Valores medios del BIC [8] para cada distribución candidata.

Distribución	$k_{c,0,T}$	$k_{t,0,T}$
Normal	-23.001	-13.807
Log-normal	-22.078	-13.862
Gamma	-22.688	-14.104
Logística	-22.468	-13.755
Log-logística	-22.101	-13.846
Laplace	-21.201	-12.970
Weibull	-23.057	-13.972
Valores extremos	-21.276	-11.972

La distribución Weibull de dos parámetros se define según la ecuación (1), donde k es el parámetro de forma y λ el de escala. En este caso, la variable x se correspondería con la temperatura. Así, los modelos probabilísticos propuestos en este artículo describen los parámetros k y λ en función de la temperatura.

$$f(x; k, \lambda) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Para cada intervalo de temperatura y según se trate de la resistencia a compresión o tracción, se obtiene un valor de k y λ distintos. Así que, se consideraron distintos tipos de ecuaciones para ajustar los parámetros k y λ de las distribuciones Weibull ajustadas en función del intervalo de temperatura. Se escogieron ecuaciones simples y continuas que pueden implementarse fácilmente en códigos numéricos, lo que favorece el uso de los modelos en enfoques analíticos y computacionales. Para seleccionar la ecuación de regresión que proporcionaba el mejor ajuste a los parámetros de la distribución Weibull en cada caso, se utilizó la medida estadística R^2 ajustado.

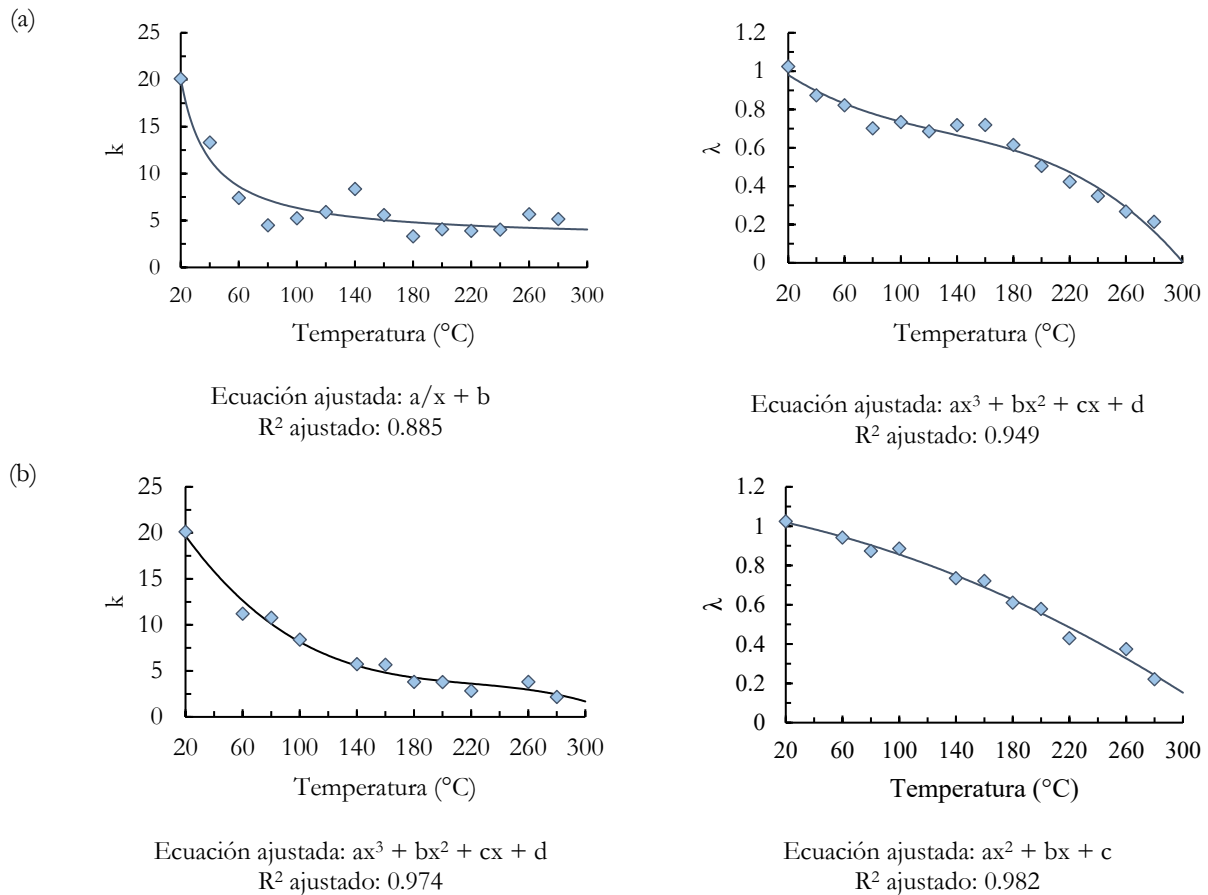


Figura 4. Ecuaciones de regresión dependientes de la temperatura para los parámetros k y λ de la distribución Weibull para (a) $k_{c,0,T}$ y (b) $k_{t,0,T}$.

La Figura 4 muestra, tanto para la resistencia a compresión como a tracción de la madera, los valores de k y λ obtenidos para cada una de las distribuciones Weibull ajustadas a los datos de los distintos intervalos de temperatura. Además, la Figura 4 incluye las ecuaciones de regresión ajustadas a los parámetros en cada caso, así como los valores de R^2 ajustado correspondientes. Las ecuaciones (2) y (3), en las que la variable T corresponde a la temperatura (°C), definen los parámetros de la distribución Weibull en función de la temperatura que caracterizan la reducción de resistencia a compresión de la madera a temperaturas elevadas ($k_{c,0,T}$).

$$k(T) = \frac{344.5}{T} + 2.892 \quad (2)$$

$$\lambda(T) = -8.015 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 3.155 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 5.843 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1.085 \quad (3)$$

Del mismo modo, las ecuaciones (4) y (5) definen los parámetros de la distribución Weibull en función de la temperatura que caracterizan la reducción de resistencia a tracción de la madera a altas temperaturas ($k_{t,0,T}$).

$$k(T) = -1.653 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 1.093 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 0.2547 \cdot T + 24.35 \quad (4)$$

$$\lambda(T) = -5.289 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 1.402 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1.049 \quad (5)$$

Cabe señalar que las ecuaciones (2) a (5) solo son de aplicación dentro del rango de temperaturas comprendido entre los 20 y los 300°C.

4.2. Validación de los modelos

El objetivo de esta sección es el de evaluar si los modelos probabilísticos propuestos son capaces de captar adecuadamente la variabilidad de los datos experimentales originales recopilados de la

literatura. Para ello, tanto para el modelo probabilístico de $k_{c,0,T}$ como para el de $k_{t,0,T}$, se generaron 15 datos aleatorios cada 5°C desde los 20°C hasta los 300°C a partir de los modelos propuestos para compararlos con los datos experimentales originales. Dicha comparación se muestra en la Figura 5, junto con los correspondientes cuantiles 0.05, 0.5 y 0.95 de los

modelos probabilísticos propuestos. Como referencia, la Figura 5 también incluye los modelos bilineales de reducción de resistencia de la madera en función de la temperatura propuestos por la actual EN 1995-1-2 [5]. Como puede deducirse de la figura, los datos aleatorios generados capturan adecuadamente la variabilidad observada experimentalmente.

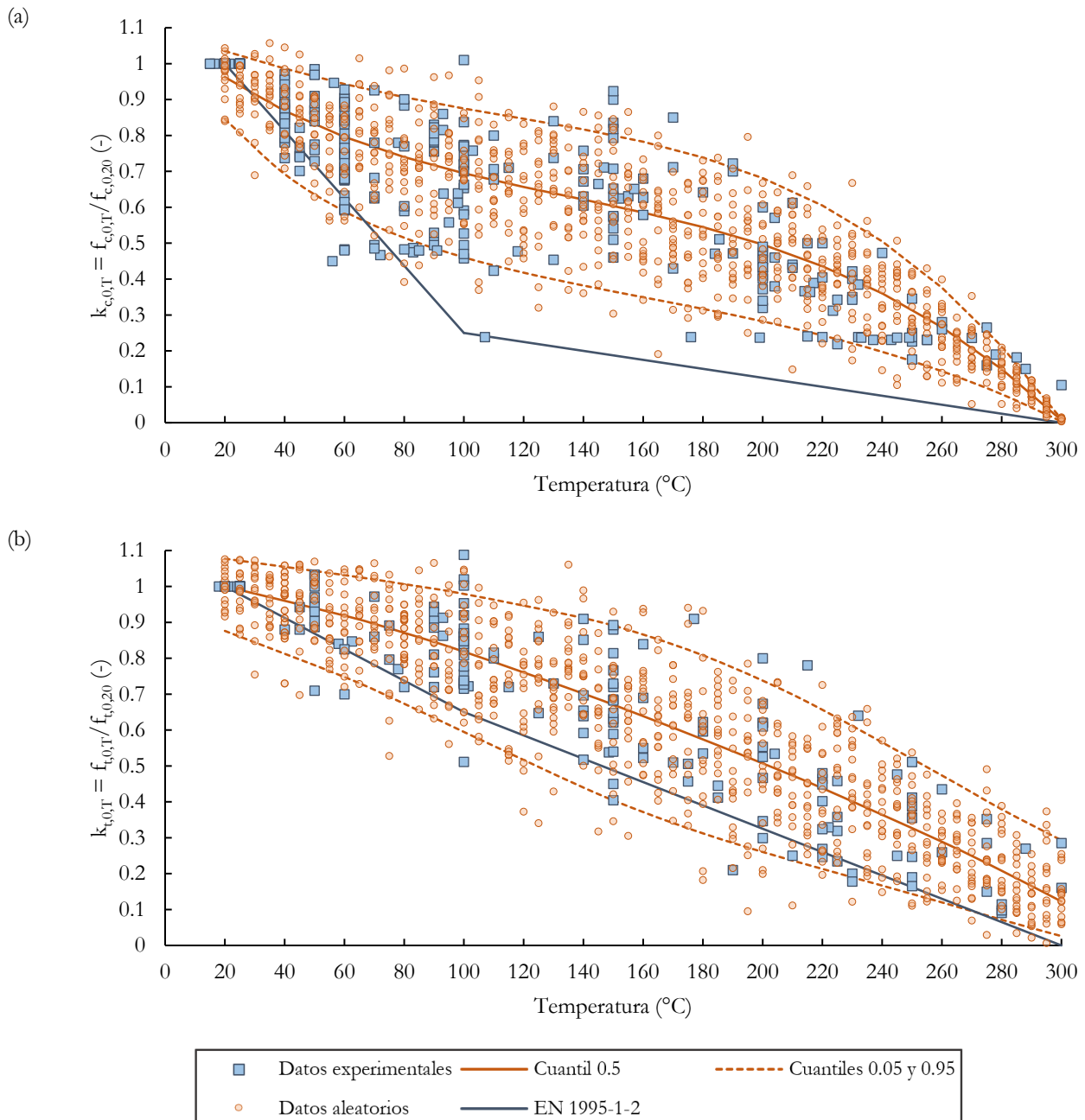


Figura 5. Datos experimentales y datos aleatorios generados, junto con los cuantiles 0.05, 0.5 y 0.95 de los modelos probabilísticos propuestos para (a) $k_{c,0,T}$ y (b) $k_{t,0,T}$.

5. Discusión

Los modelos probabilísticos propuestos para la reducción de la resistencia a compresión y tracción de la madera con el aumento de la temperatura son ecuaciones simples y continuas, que definen los parámetros de la distribución Weibull en función de la temperatura. La simplicidad de estos hace que su implementación en códigos numéricos para el análisis de estructuras frente al fuego sea muy sencilla. En concreto, los modelos probabilísticos propuestos han sido implementados en el software de análisis de elementos finitos SAFIR [42].

Por otra parte, los modelos deterministas sugeridos por la actual EN 1995-1-2 [5] resultan bastante conservadores en comparación con los datos experimentales y los modelos probabilísticos propuestos, especialmente para la reducción de la resistencia a compresión por encima de los 80°C, como se aprecia la Figura 5.

Respecto a la tendencia de la reducción de resistencia de la madera a altas temperaturas, como puede deducirse de los cuantiles 0.5 mostrados en la Figura 5, la resistencia a tracción muestra una relación casi lineal decreciente. En el caso de la resistencia a compresión, esta disminuye rápidamente entre los 20°C y los 100°C y entre los 200°C y los 300°C, aproximadamente, mientras que entre los 100°C y los 200°C decrece más despacio.

Por último, cabe señalar que, según la EN 1995-1-2 [5], la resistencia de la madera por encima de los 300°C es nula. No obstante, los datos experimentales parecen indicar que la madera aún conserva cierta resistencia a dicha temperatura, especialmente en el caso de $k_{t0,T}$, cuyos datos muestran una gran dispersión entre los 250°C y los 300°C. En cualquier caso, dado que el número de datos experimentales en torno a los 300°C es limitado, sería necesario realizar más ensayos para determinar si la hipótesis de considerar nula la resistencia de la madera por

encima de dicha temperatura es realmente conservadora.

6. Conclusiones

Esta comunicación presenta modelos probabilísticos para la reducción de la resistencia a compresión y tracción de la madera con el aumento de la temperatura. Los modelos se han desarrollado a partir de un número elevado de datos experimentales recopilados de la literatura. De la revisión bibliográfica llevada a cabo para recopilar los datos experimentales y de los modelos probabilísticos propuestos se concluye lo siguiente:

- Los datos experimentales de reducción de la resistencia a compresión y tracción de la madera a altas temperaturas muestran una gran variabilidad.
- En la bibliografía, se ha observado una falta de estandarización de los métodos de ensayo para determinar la resistencia de probetas de madera a altas temperaturas. Los ensayos de los datos experimentales recopilados abarcan una gran variedad de tamaños de probetas, así como de condiciones de calentamiento y de carga.
- La distribución Weibull fue la escogida para caracterizar la reducción de resistencia tanto a compresión como a tracción de la madera a temperaturas elevadas. Los modelos probabilísticos propuestos consisten en ecuaciones simples y continuas que definen los parámetros de dicha distribución en función de la temperatura. La simplicidad de estos modelos facilita su implementación en códigos numéricos para el análisis de estructuras frente al fuego.
- Las relaciones deterministas que sugiere la actual EN 1995-1-2 [5] para la reducción de resistencia de la madera

con el aumento de la temperatura parecen ser muy conservadoras en comparación con los datos experimentales. Por consiguiente, se espera que los modelos probabilísticos propuestos permitan el diseño de estructuras de madera más fiables y eficientes. Además, estos modelos también podrían ayudar a preservar un mayor número de estructuras históricas de madera para las que los requisitos de seguridad contra incendios de las normas actuales son demasiado exigentes.

En resumen, los modelos probabilísticos propuestos pueden aplicarse en enfoques de diseño prestacional para evaluar el grado de confianza de estructuras de madera nuevas y existentes en relación con la seguridad estructural frente al fuego.

En base a las conclusiones de la presente comunicación, futuras líneas de trabajo podrían incluir el desarrollo y recomendación de métodos de ensayo estandarizados para determinar la resistencia de la madera a altas temperaturas; la afinación de los modelos probabilísticos propuestos usando datos experimentales adicionales derivados de dichos ensayos estandarizados; la recomendación de percentiles de los modelos probabilísticos propuestos que deberían considerarse para alcanzar un nivel adecuado y fiable de seguridad estructural frente al fuego al tiempo que se diseñan estructuras de madera más eficientes; y el desarrollo de modelos probabilísticos que puedan adoptarse para la fase de enfriamiento del incendio.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento por el apoyo prestado a esta investigación a través de la ayuda FPU18/00726 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FSE invierte en tu futuro. Además, este artículo también forma parte del proyecto PID2021-128152NB-I00 financiado

por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

Referencias

- [1] P. Bernardi, E. Micheline, A. Sirico, S. Rainieri, C. Corradi, Simulation methodology for the assessment of the structural safety of concrete tunnel linings based on CFD fire – FE thermo-mechanical analysis: a case study, *Eng. Struct.* 225 (2020) 111193.
- [2] T. Gernay, N.E. Khorasani, Recommendations for performance-based fire design of composite steel buildings using computational analysis, *J. Constr. Steel Res.* 166 (2020) 105906.
- [3] J. Martinez, A.E. Jeffers, Structural response of steel-concrete composite floor systems under traveling fires, *J. Constr. Steel Res.* 186 (2021) 106926.
- [4] E. Garcia-Castillo, I. Paya-Zaforteza, A. Hospitaler, Fire in heritage and historic buildings, a major challenge for the 21st century, *Dev. Built Environ.* 13 (2023) 100102.
- [5] CEN, Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design (EN 1995-1-2), European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
- [6] K. LaMalva, D. Hopkin, eds., *International Handbook of Structural Fire Engineering*, Springer International Publishing, Cham, 2021.
- [7] M.Z. Naser, Fire resistance evaluation through artificial intelligence - A case for timber structures, *Fire Saf. J.* 105 (2019) 1–18.
- [8] G. Schwarz, Estimating the Dimension of a Model, *Ann. Stat.* 6 (1978) 461–464.
- [9] T. Goodrich, N. Nawaz, S. Feih, B.Y. Lattimer, A.P. Mouritz, High-temperature mechanical properties and thermal recovery

- of balsa wood, *J. Wood Sci.* 56 (2010) 437–443.
- [10] F. Kollmann, Die mechanischen Eigenschaften verschieden feuchter Hölzer im Temperaturbereich von -200 bis + 200°C, *Vdi-Forschungsh. No. 403* 403 (1940) 1–18.
- [11] F. Kollmann, Über das mechanische Verhalten von Kiefernholz bei Biegung und Temperaturen zwischen 20 und 100°C, *Sven. Träforskningsinstitutet, Trätekniska Avd. Meddelande* (1951) 1–22.
- [12] M.J. Manríquez Figueroa, P. Dias De Moraes, F. Almeida Maestri, Temperature and moisture content effects on compressive strength parallel to the grain of paricá, *Ambient. Construído* 15 (2015) 17–27.
- [13] M.J. Manríquez Figueroa, P. Dias De Moraes, Influence of the temperature on the compression strength parallel to grain of paricá, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 99–104.
- [14] M.J. Manríquez Figueroa, P. Dias De Moraes, Temperature reduction factor for compressive strength parallel to the grain, *Fire Saf. J.* 83 (2016) 99–104.
- [15] P.H. Sulzberger, The effect of temperature on the strength of wood, plywood and glued joints, in: *Rep. ACA-46, Aeronautical Research Consultative Committee, Melbourne, Australia, 1953: pp. 1–44.*
- [16] F. Wiesner, D. Thomson, L. Bisby, The effect of adhesive type and ply number on the compressive strength retention of CLT at elevated temperatures, *Constr. Build. Mater.* 266 (2021) 121156.
- [17] S.A. Young, P. Clancy, Compression mechanical properties of wood at temperatures simulating fire conditions, *Fire Mater.* 25 (2001) 83–93.
- [18] A. Zaben, D. Lange, C. Maluk, Compressive strength and MoE of solid softwood at elevated temperatures, in: *Proc. 11th Int. Conf. Struct. Fire, The University of Queensland, Brisbane, Australia, 2020.*
- [19] M.H. Do, G.S. Springer, Model for predicting changes in the strengths and moduli of timber exposed to elevated temperatures, *J. Fire Sci.* 1 (1983) 285–296.
- [20] A. Frangi, M. Bertocchi, S. Clauß, P. Niemz, Mechanical behaviour of finger joints at elevated temperatures, *Wood Sci. Technol.* 46 (2012) 793–812.
- [21] R.H. White, Tensile Strength of Fire-Exposed Wood Members, *Proc. Int. Wood Eng. Conf. 2* (1996) 385–390.
- [22] K. Yue, F. Wang, W. Lu, Z. Tang, Z. Chen, W. Liu, Tensile properties of finger-jointed lumber under high-temperature and oxygen-free conditions, *Holzforschung* 75 (2021) 838–846.
- [23] S.L. Zelinka, K. Sullivan, S. Pei, N. Ottum, N.J. Bechle, D.R. Rammer, L.E. Hasburgh, Small scale tests on the performance of adhesives used in cross laminated timber (CLT) at elevated temperatures, *Int. J. Adhes. Adhes.* 95 (2019) 102436.
- [24] M. Klippel, S. Clauß, A. Frangi, Experimental analysis on small-scale finger-jointed specimens at elevated temperatures, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 72 (2014) 535–545.
- [25] F. Kollmann, F. Schulz, Versuche über den Einfluß der Temperatur auf die Festigkeitswerte von Flugzeugbaustoffen, 2. Teilbericht, *Reichsanstalt Für Holzforsch.* 131 (1944).
- [26] H. Kuronen, E. Mikkola, S. Hostikka, Tensile strength of wood in high temperatures before charring, *Fire Mater.* 45 (2021) 858–865.
- [27] P. Lau, J. Barrett, Modelling Tension Strength Behaviour Of Structural Lumber

- Exposed To Elevated Temperatures, *Fire Saf. Sci.* 5 (1997) 1177–1188.
- [28] M.J. Manríquez Figueroa, Influência da temperatura sobre a resistência mecânica do paricá (Dissertação mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico, 2008.
- [29] P.C. Nielsen, F.B. Olesen, Tensile Strength of Finger Joints at Elevated Temperatures, Institute of Building Technology Structural Engineering, Aalborg University Center. Report No. 8205, 1982.
- [30] B.A.L. Östman, Wood tensile strength at temperatures and moisture contents simulating fire conditions, *Wood Sci. Technol.* 19 (1985) 103–116.
- [31] R.H. White, S.M. Cramer, D.K. Shrestha, Fire Endurance Model for a Metal-Plate-Connected Wood Truss, Res. Pap. FPL-RP-522 (1993).
- [32] P. Glos, D. Henrici, Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen, Untersuchungsbericht Des Instituts Für Holzforsch. 87505 (1990).
- [33] T.P. Khmelidze, Influence of temperature on strength and stiffness of wood of pine and larch, *Derevoobrab. Promyshlennost* (Wood Ind. 10 (1986) 15–16.
- [34] R.M. Knudson, A.P. Schniewind, Performance of Structural Wood Members Exposed To Fire., *For. Prod. J.* 25 (1975) 23–32.
- [35] C. Nyman, The effect of temperature and moisture on the strength of wood and glue joists, in: *Symp. Fire Resist. Wood Struct.*, VTT Technical Research Centre of Finland, 1980.
- [36] R.I. Rykov, Strength characteristics of timber at high temperatures, in: *Symp. Fire Resist. Wood Struct.*, VTT Technical Research Centre of Finland, 1980.
- [37] E.L. Schaffer, Effect of Pyrolytic Temperatures on the Longitudinal Strength of Dry Douglas-Fir, *J. Test. Eval.* 1 (1973) 319–329.
- [38] E.L. Schaffer, Structural fire design: Wood. Res. Pap. FPL 450, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 1984.
- [39] CEN, Eurocode - Basis of structural design (EN 1990), European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2002.
- [40] S. Thelandersson, H.J. Larsen, eds., *Timber engineering*, Wiley, 2003.
- [41] SFPE (Society of Fire Protection Engineering), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Fifth Edit, Springer New York, New York, NY, 2016.
- [42] J.M. Franssen, T. Gernay, Modeling structures in fire with SAFIR ®: theoretical background and capabilities, *J. Struct. Fire Eng.* 8 (2017) 300–323.