

Modelización por métodos numéricos de la degradación térmica de un elemento estructural de madera en situación de incendio.

Rubén Regueira Gay

Ingeniero de Montes - Dpto Ingeniería Agroforestal - Universidad de Santiago de Compostela (Lugo, España)
ruben.regueira@usc.es



Verónica López López

Ingeniero Agrónomo - Dpto. Ingeniería, Agroforestal - Universidad de Santiago de Compostela (Lugo, España)
veronicaxestoso@yahoo.es



Manuel Guaita Fernández

Dr. Ingeniero Agrónomo - Dpto. Ingeniería, Agroforestal - Universidad de Santiago de Compostela (Lugo, España)
m.guaita@usc.es



Palabras clave – fuego, incendio, estructuras de madera, simulación numérica, elementos finitos

Keywords – fire, burning, timber structure, numerical simulation, finite elements, fem

RESUMEN

La cuantificación de la reducción de las propiedades resistentes y de la sección de un elemento estructural en situación de incendio es fundamental de cara a garantizar la estabilidad estructural en situación de incendio. Existen investigaciones que tratan de determinar la variación de las propiedades térmicas y mecánicas de la madera sometida a cargas térmicas, y la reducción de sección transversal de un elemento estructural de madera. La normativa europea en materia de construcción con madera, el Eurocódigo 5, propone unas simplificaciones para determinar la sección residual de un elemento estructural de madera en situación de incendio.

Los objetivos de este trabajo comprenden una revisión de algunos trabajos realizados en el campo de la variación en función de la temperatura de las propiedades térmicas de la madera (calor específico, densidad y conductividad térmica), y la construcción con los distintos valores propuestos de varios modelos de elementos finitos que se someterán a cargas térmicas definidas por la curva ISO 834-1. Los resultados se compararán con un modelo construido con los valores que el Eurocódigo propone y con un ensayo experimental. Como resultado final, se propone finalmente un modelo de elementos finitos que emule el comportamiento del ensayo experimental.

ABSTRACT

The quantification of the decrease of strength properties and section of a structural element in a fire situation is critical in order to guarantee the structural stability in such a fire event. There are some researches in literature trying to find the variation of thermal and mechanical properties of wood subjected to thermal loads, and the decrease of cross section of a wooden structural element. The European legislation on timber construction, Eurocode 5, proposes a simplification to determine the residual section of a wooden structural element in a fire situation.

This paper objectives consist in a review of some researches in the field of variations, depending on the temperature, of the thermal properties of wood (specific heat, density and thermal conductivity); and in the construction of a few finite element models of timber structural elements affected by thermal loads according to ISO 834-1. The results were compared with a model based in Eurocode 5 and with an experimental test. As final result, at last, we propose a finite element model that simulates the behavior of the experimental tested element.

1. Introducción

1.1. Composición química de la madera

La madera está compuesta de forma general por tres grupos de sustancias, las que conforman la pared celular, donde se encuentran las principales macromoléculas, celulosa, hemicelulosas y ligninas, que están presente en todas las maderas; el otro grupo lo conforman las sustancias de baja masa molar conocidas también como sustancias extraíbles que se encuentran en menor cantidad, y las sustancias minerales. La proporción y composición química de la lignina y las hemicelulosas difiere para las maderas de coníferas y frondosas, mientras que la celulosa es uniforme en composición en todas las maderas.

La proporción de estos componentes varía con la especie, entre la madera de árboles de la misma especie y en diferentes partes del propio árbol, en la madera de la albura y duramen, en dirección radial y longitudinal.

Los parámetros edafoclimáticos influyen en la composición química, así, se presentan diferencias entre maderas que provienen de zonas templadas con las que provienen de zonas tropicales.

La madera es un combustible sólido, y como tal, cuando es sometida a temperaturas elevadas pasa por un proceso de degradación térmica que ocurre en etapas. A esa reacción química que origina un proceso de descomposición de la madera por acción del calor se le llama pirolisis de la madera. Es necesario conocer el proceso de degradación térmica, así como la reacción y la resistencia al fuego de la madera para apoyar los estudios del comportamiento de la madera frente al fuego.

La presencia de componentes químicos interfiere en el proceso de carbonización durante la combustión de la madera, influenciando la cinética de la pirolisis. De entre los tres componentes, las hemicelulosas son las más susceptibles a la degradación térmica, seguida por la celulosa, en cambio la lignina contribuye más a la formación de carbón y menos a la formación de las llamas (Rowel, 1991). En el proceso de degradación térmica, la lignina actúa como el componente más estable, comenzando a presentar cambios estructurales a temperaturas inferiores a 200 °C.

A temperatura ambiente, las principales acciones que causan deformación son producidas por la gravedad y por el viento. A altas temperaturas, se generan nuevas deformaciones que pueden reducir la capacidad portante de la madera, induciendo deformaciones adicionales.

En la madera, la reducción de la capacidad portante se debe, principalmente, a la disminución gradual de la sección transversal, la cual se carboniza, y a la reducción de su resistencia y rigidez. En lo que respecta al estudio de la madera como material estructural, la formación de carbón es un parámetro crucial, teniendo en cuenta la pérdida de rigidez del miembro estructural, resultante de la reducción de su sección transversal.

1.2. Propiedades Térmicas de la Madera

En este trabajo se considerarán como propiedades térmicas de la madera las siguientes: calor específico, conductividad térmica y, a efectos de este trabajo, densidad; aun no siendo esta última tradicionalmente considerada como tal. Estos parámetros varían según la especie maderable que se trate, no existiendo unos valores universalmente aceptados de estas propiedades aún a igualdad de especie: varían considerablemente según la literatura. Los valores que se conocen fueron obtenidos por diferentes autores, bien por mediciones directas o bien determinados numéricamente. Además, estas propiedades son función de la temperatura a la que se encuentre el material: si una probeta de madera es sometida a una acción térmica que provoque un incremento en su temperatura, se produce la secuencia siguiente:

- la humedad es evaporada a 100 °C,
- a los 200 °C aproximadamente la madera empieza a sufrir una rápida descomposición térmica,
- la madera se convierte en carbón a una temperatura aproximada de 300 °C (Janssens, 1994; König, 2005).

La densidad de la madera varía significativamente entre las especies, entre árboles de la misma especie e incluso dentro de cada árbol individualmente en función de la zona de que se trate. Trabajos de Vorreiter, 1969 mostraron que la cantidad de masa perdida era proporcional a la densidad. Hawley, 1952 explicó que densidades más bajas permiten una mayor penetración del calor y además proporcionan una mayor área de superficie por unidad de peso. Schaffer, 1967 también llegó a la conclusión de que las especies con menor densidad tendían a tener grietas o fisuras en el estrato carbonizado de tal manera que la profundidad de carbón en esa situación era ligeramente mayor. La densidad se reduce a aproximadamente al 90% de su valor original (aquel que presenta a 20° C) cuando la temperatura supera los 100° C, y aproximadamente al 20% de su valor original cuando la madera se convierte en carbón por encima de 300 °C.

La conductividad térmica de la madera varía mucho entre los distintos estudios de distintos autores, pero varios estudios han demostrado que tiene un importante efecto en el proceso de carbonización. La baja conductividad térmica de la madera reduce la tasa a la que se transmite el calor a su interior.

El calor específico es también función de la temperatura, variando sustancialmente en la literatura. Algunos autores consideran un valor localmente muy elevado de conductividad térmica en el entorno de los 100 ° C, que representa el calor consumido en evaporar el agua retenida en la madera.

1.3. Comportamiento de la madera ante el fuego

El comportamiento de la madera ante el fuego se puede descomponer en los siguientes procesos:

- a) Pirolisis
- b) Encendido
- c) Alimentación térmica
- d) Formación de carbón/oxidación

La pirolisis transforma la madera en carbón y gases reduciendo su densidad. Los gases que se desprenden de la pirolisis pueden producir una combustión si hay el oxígeno suficiente en el ambiente y unas temperaturas elevadas. El carbón sufrirá una combustión con los gases desprendidos. Las distintas capas o zonas (carbón, zona de pirolisis y madera residual) se muestran en la Figura 1.

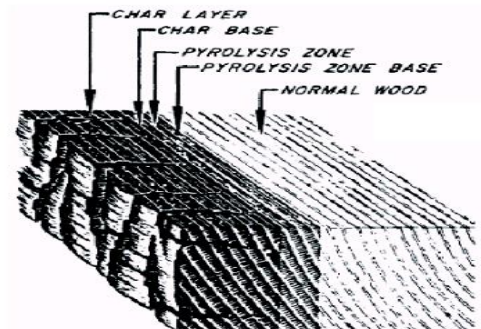


Figura 1 – Zonas de degradación en una sección de madera (Schaffer 1984)

Cuando se aplica suficiente calor a la madera, ocurre un proceso de degradación térmica (pirolisis) produciendo gases combustibles, acompañado de una reducción de la masa. Se forma una capa de carbón en la superficie expuesta al fuego, que incrementa su espesor a medida que progresa el fuego, reduciendo la sección de la pieza de madera (Buchanan, 2000). Esta capa carbonizada protege la sección restante de madera intacta contra el propio fuego dado que, una vez carbonizada, la madera presenta propiedades térmicas distintas a las de la madera en estado normal, particularmente en lo que respecta a la conductividad térmica, lo que ayuda a ofrecer esa protección a la madera intacta. La resistencia de los elementos estructurales de madera ante la exposición al fuego sufre una variación debida a la pérdida de sección causada por la carbonización, así como por la reducción de resistencia de la madera en zona de pirolisis.

La velocidad con que avanza la carbonización en los materiales se denomina tasa de carbonización y se considera un parámetro esencial de la resistencia de estructuras de madera ante el fuego porque permite llevar a cabo la medición de pérdida de sección debida a la carbonización así como la sección residual de madera que se considera resistente. La tasa de carbonización de la madera depende de numerosos factores, entre ellos la especie, densidad, humedad, permeabilidad, composición o dirección de las fibras.

1.4 Revisión bibliográfica

Konig, J. (2005) propone asumir como constante en el tiempo la tasa de carbonización es constante con el tiempo. El Eurocódigo 5 (2008) da un valor de 0,65 mm/min para madera maciza, y un valor de 0,70 mm/min para madera laminada encolada. Schaffer, E. L. (1967) o Frangi, A. et al, (2003) obtuvieron valores similares en ensayos experimentales.

Algunos de los trabajos que estudian el comportamiento de las estructuras de madera frente al fuego son los siguientes: Browne, F. L. (1958), Truax, T. R. (1959), Laplanche *et al* (2004), Kollman F.F.P. y Coté J. R. (1968), White R.H. (1988), Poon L. y Englando, J. P. (2003), Konig J. y Walleij, L- (1999).

2. Objetivo

Se pretende desarrollar un modelo de elementos finitos que permita simular el comportamiento de un elemento estructural de madera sometido a cargas térmicas.

3. Metodología

Se siguió el procedimiento siguiente:

- Se revisaron algunos estudios en que investigadores diversos proponen valores de los parámetros que conforman las propiedades térmicas de la madera: densidad, calor específico y conductividad térmica. Concretamente se consideraron 4 trabajos existentes en la literatura, que propone cada uno de ellos unos determinados valores para las propiedades térmicas mencionadas.
- Se construyeron 4 modelos de elementos finitos iguales entre sí en sus propiedades geométricas y diferentes en sus propiedades térmicas (1 modelo por cada trabajo tomado de la bibliografía)
- Se construyó un 5º modelo de elementos finitos, con idénticas propiedades geométricas a los 4 anteriores, y diferente en sus propiedades térmicas, que fueron tomadas de las que indica el eurocódigo 5 (PNE-EN 1995-1-2) para una madera de conífera.
- Se realizó un ensayo experimental en el que se sometió una probeta de madera laminada de conífera a las acciones térmicas que indica la curva normalizada ISO 834-1. Esta probeta contenía diversos termopares en su interior que registraron la temperatura en esos puntos a lo largo de los 30 minutos de duración del ensayo.
- Se compararon los valores de temperatura a lo largo del tiempo registrados por los termopares ubicados en la probeta ensayada experimentalmente con los valores de temperatura a lo largo del tiempo que resultaron en los puntos de coordenadas geométricas análogas en los 5 modelos de elementos finitos.
- Se compara la tasa de carbonización de los 5 modelos de elementos finitos entre sí y con la tasa de la probeta ensayada experimentalmente.
- Para determinar la tasa de carbonización se hace necesario establecer una temperatura límite indicadora del inicio del estrato carbonizado, es decir, la isoterma que separa lo que comúnmente se denomina “madera” de lo vulgarmente llamado “carbón”. A efectos de simplificar, y en base a los trabajos de Truax, T. R. (1959) y White R.H. (1988) se propone la isoterma de 300°C de temperatura como la frontera entre la capa carbonizada y la madera que aún no ha sufrido dicho proceso.
- Se propone un nuevo modelo de elementos finitos con propiedades geométricas idénticas a los 5 anteriores y con unas propiedades térmicas tales que el comportamiento del modelo sea semejante al de la probeta ensayada experimentalmente.

3. 1. Valores de las propiedades térmicas de la madera en la literatura

Se consideraron 4 investigaciones:

- Knudson (1975).

- Fredlund (1993)
- Janssens (2004)
- Pinto (2007)

Cada uno de estos autores propone una serie de valores de densidad, conductividad térmica y calor específico para la madera en función de la temperatura:

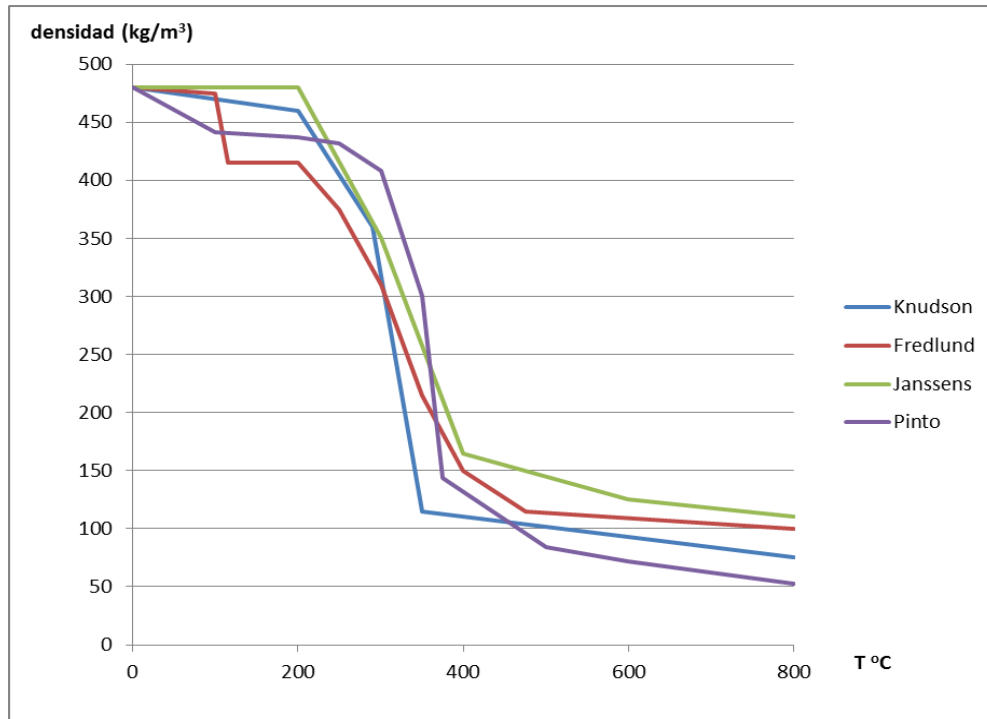


Figura 2 – Densidad

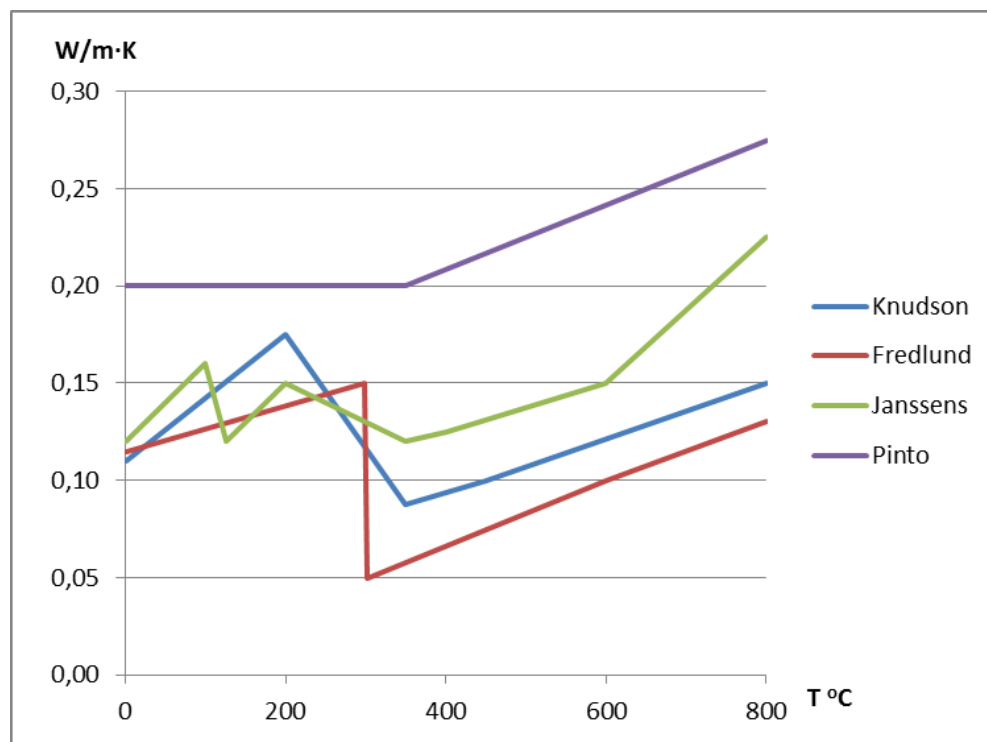


Figura 3 – Conductividad térmica

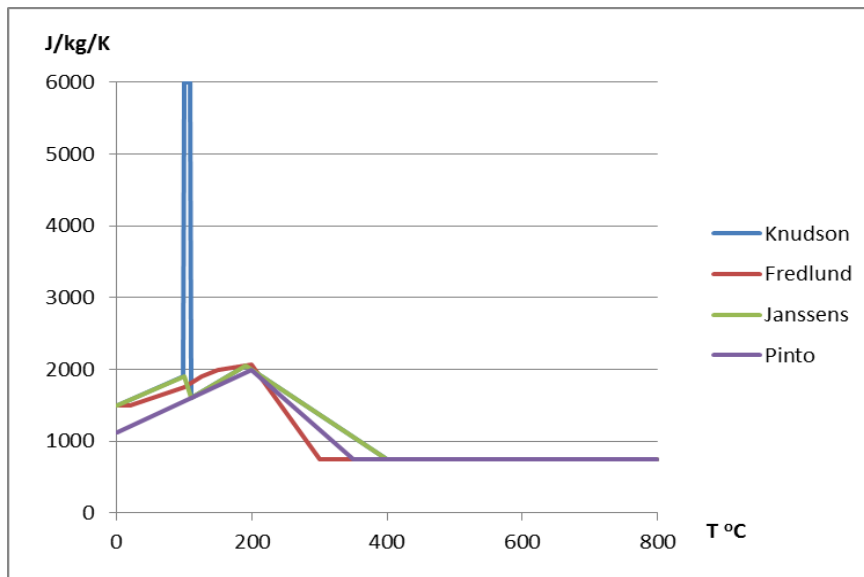


Figura 4 – Calor específico

3. 2. Valores de las propiedades térmicas de la según el Eurocódigo 5

El eurocódigo 5 (PNE-EN 1995-1-2) propone estos valores para los 3 parámetros anteriormente mencionados:

T (°C)	Cond. Térm. (W/m·K)
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

T (°C)	Calor Específ. (J/Kg·K)
20	1530
99	1770
99	13600
120	13500
120	2120
200	2000
250	1620
300	710
350	850
400	1000
600	1400
800	1650
1200	1650

T ^a (°C)	Densidad Kg/m ³
20	425,6
99	425,6
120	380
200	380
250	353,4
300	288,8
350	197,6
400	144,4
600	106,4
800	98,8
1200	0

Tablas 1,2 y 3 – Conductividad térmica, calor específico y densidad según el proyecto de Eurocódigo 5 para una conífera clase C18 y humedad del 12%

3. 3. Modelo de elementos finitos.

Empleando el software de elementos finitos Ansys se elaboraron 5 modelos de elementos finitos, idénticos entre sí en cuanto a propiedades geométricas, mallado, condiciones de contorno y cargas aplicadas. La única diferencia entre los 5 modelos radica en sus propiedades térmicas, poseyendo el material principal en cada modelo las propiedades térmicas de una de las investigaciones expuestas anteriormente o las propuestas por el eurocódigo 5.

El modelo, geoméricamente hablando, consta de dos cuerpos:

- Cuerpo 1: representa a un elemento estructural de madera de conífera, prismático, de 400 mm de largo x 100 mm de ancho x 200 mm de ancho. Sus

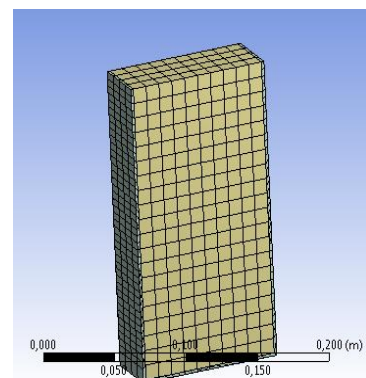


Figura 7 – Modelo mallado de elementos finitos

propiedades térmicas varían en función de la temperatura y serán las indicadas anteriormente. Para disminuir el tiempo de cálculo, se tomó una rebanada transversal de 20 mm de espesor del elemento estructural. En color amarillo en la figura 7.

- Cuerpo 2: representa el aire que rodea al cuerpo 1. Para disminuir el tiempo de cálculo, se consideró un espesor de 2 mm para este cuerpo en las 3 caras de exposición al fuego del cuerpo 1 (2 laterales y 1 inferior). En color verde en la figura 7.

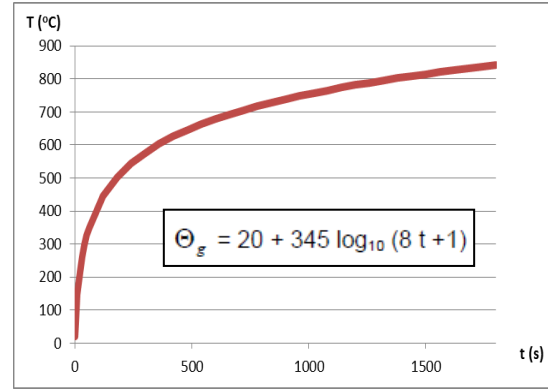


Figura 8 – Curva normalizada tiempo – temperatura

Se establecieron superficies de conexión entre los cuerpos 1 y 2.

Se mallaron los cuerpos 1 y 2 con elementos finitos hexaédricos de 5 mm de arista para el cuerpo 1 y de entre 2 y 5 mm de arista para el cuerpo 2.

El tipo de análisis realizado fue de tipo transitorio térmico. Se establecieron las condiciones de contorno iniciales: una temperatura para el entorno, así como para los 2 cuerpos participantes del análisis, de 20 °C.

El tiempo total del análisis se estableció en 30 minutos (1800 segundos), y se fijaron 35 pasos de carga: los 6 primeros pasos de 10 segundos de duración cada uno y los 29 restantes de 60 segundos cada uno.

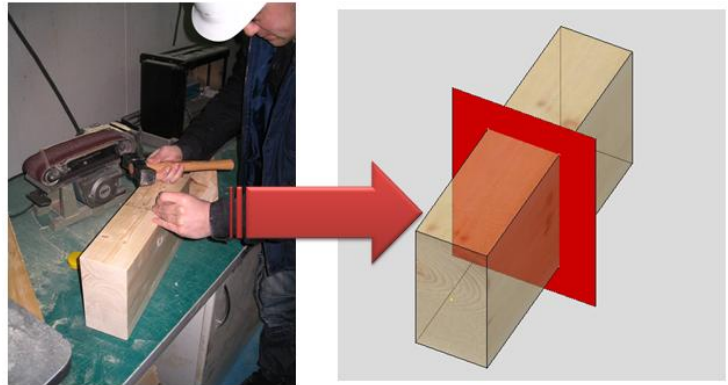


Figura 9 – Plano transversal en el que se localizan los termopares

Al inicio de cada paso de carga se estableció la temperatura del cuerpo 2 conforme a la expresión de la curva tiempo-temperatura normalizada (ISO 834-1), y que se muestra en la figura 8

En cada uno de los 5 modelos de elementos finitos se ubicaron además sensores en unas coordenadas determinadas que captan la variación de temperatura a lo largo del tiempo en esos puntos concretos.

3. 4. Ensayo experimental.

Además de los 5 modelos de elementos finitos, se realizó un ensayo experimental sobre una probeta de madera de *Picea abies* laminada. La probeta tiene unas dimensiones de 403 mm de largo x 100 mm de ancho x 200 mm de alto, y fue sometida

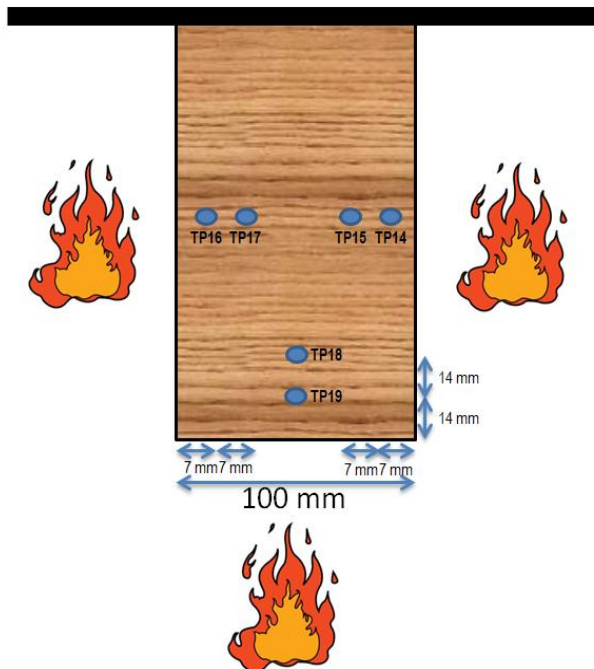


Figura10 – Localización de los termopares en el plano de la Fig. 9

durante 30 minutos en un horno de ensayos normalizado de 1 m³ de capacidad a las cargas térmicas que indica la curva normalizada tiempo-temperatura descrita en la ISO 834-1 (figura 8).

En la probeta se ubicaron 6 termopares tipo K que, conectados al pertinente hardware de captación de datos, recogieron la variación de temperatura a lo largo del tiempo en esos puntos en los que se encontraban cada uno de ellos.

Los 6 termopares se ubicaron en el plano central transversal de la probeta, a distintas profundidades, tal y como se puede ver en las figuras 9 y 10. Los 6 termopares se denominaron TP14, TP15, TP16, TP17, TP18 y TP19.

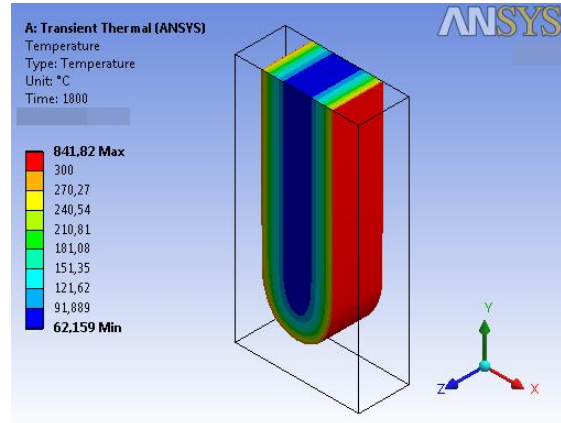


Figura 11 – Sección residual vs. sección inicial tras el ensayo virtual de un modelo de elementos finitos

4. Resultados

4. 1. Tasa de carbonización.

En los cinco modelos de elementos finitos se localizó la isoterma de 300 °C al final del ensayo y se midió su distancia al borde de la probeta (figura 11). Esta distancia, dividida entre los 30 minutos de duración del ensayo, permitió determinar las tasas de carbonización de cada modelo.

En el caso del ensayo experimental, finalizado el ensayo se retiró toda la capa carbonizada del mismo y se midió la sección residual. Restando esta sección de la original, y nuevamente dividiendo esta distancia por el tiempo de ensayo se pudo calcular la tasa de carbonización. Los 6 resultados se recogen en la tabla 4.

Modelo / ensayo	Tasa de carbonización (mm/min)
Knudson	0,71
Fredlund	0,69
Janssens	0,86
Pinto	1,28
Eurocódigo 5	0,71
Experimental	0,53

Tabla 4 – Tasa de carbonización

4. 2. Variaciones puntuales de temperatura en el tiempo.

En los 6 modelos se recogió en los puntos indicados en la figura 10 la variación de la temperatura a lo largo de los 1800 segundos de duración del ensayo. En la figura 12 se recogen, a modo de ejemplo, las 6 gráficas para el termopar 19.

Teniendo en cuenta los 6 termopares, las curvas construidas con los valores propuestos por el eurocódigo 5, son en promedio las más similares a las del ensayo experimental, si bien cada termopar tiene sus particularidades. Por ejemplo, en el termopar 19

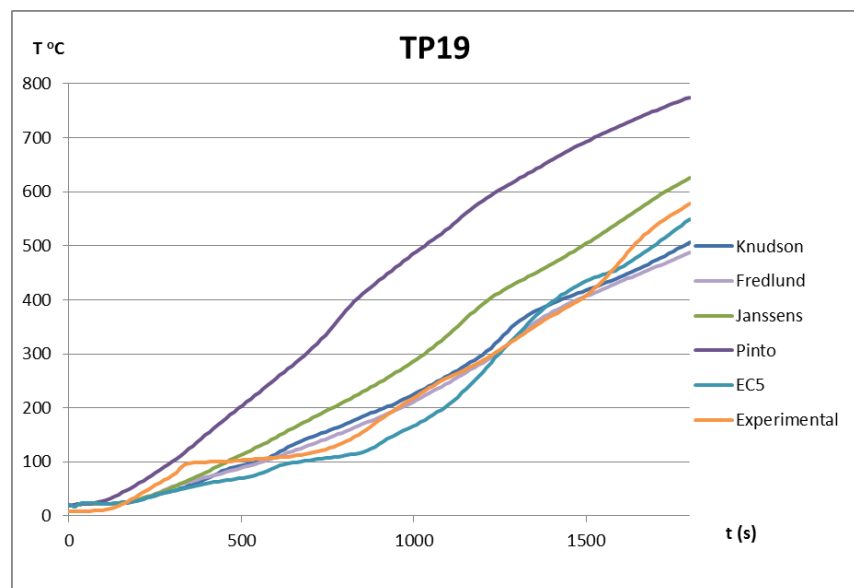


Figura 12 – Curvas temperatura / tiempo en el TP19

la curva más semejante a la experimental es la construida con los valores propuestos por Knudson.

4. 3. Propuesta de modelo de elementos finitos.

Teniendo en cuenta los puntos anteriores, se propone un modelo de elementos finitos que emule el comportamiento del ensayo experimental, esto es, un elemento estructural de *Picea abies* laminado en situación de incendio.

Los valores de las propiedades térmicas de la madera del modelo, basadas en la *Picea abies* ensayada, son las representadas en las figuras 13, 14 y 15:

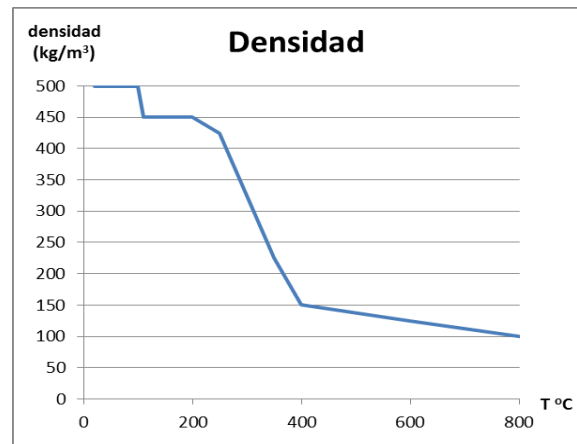


Figura 13 – Densidad en el modelo propuesto

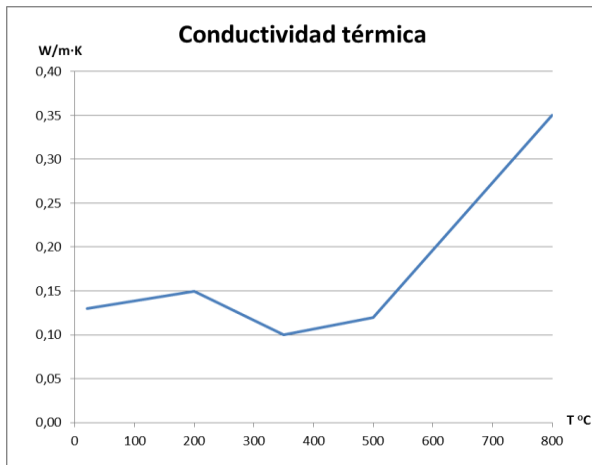


Figura 14 – Conductividad térmica en el modelo propuesto

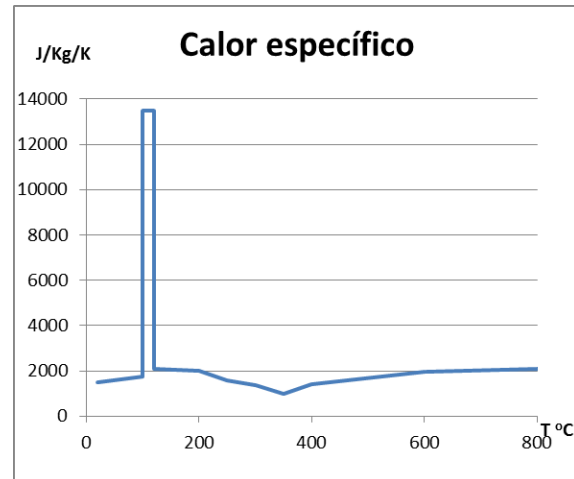


Figura 15 – Calor específico en el modelo propuesto

La curva tiempo/temperatura en el modelo propuesto se asemeja razonablemente al ensayo experimental:

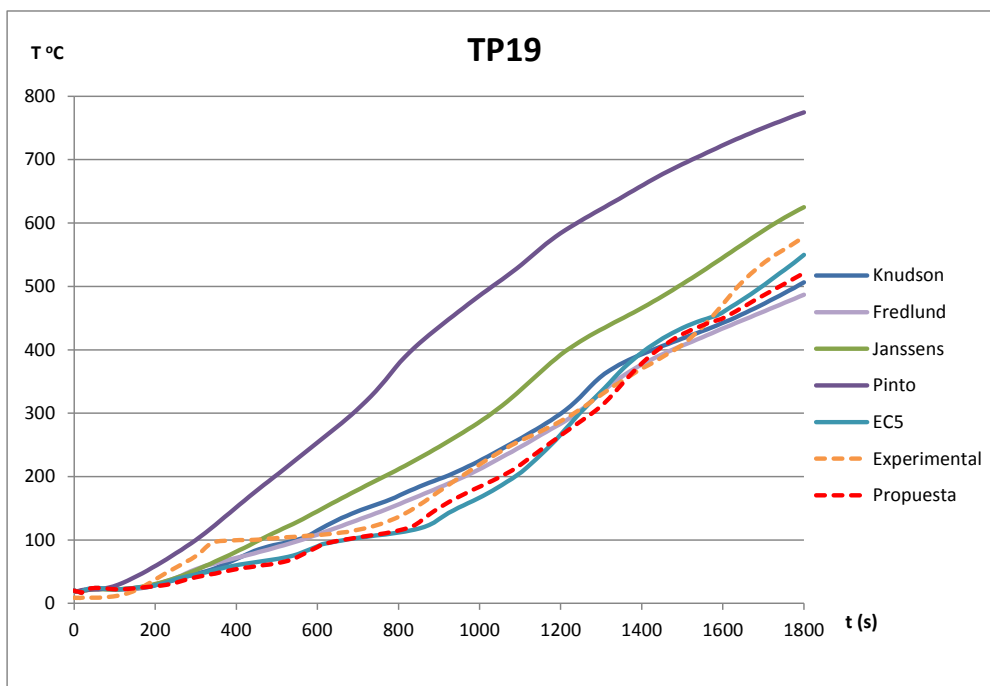


Figura 16 – Curvas temperatura / tiempo en el TP19

5. Conclusiones

Es posible modelizar con el método de los elementos finitos el comportamiento de una probeta de madera en situación de incendio. Un modelo de elementos finitos construido con los parámetros propuestos en el punto 4.3 simulan con cierta precisión el comportamiento de una probeta de Picea abies sometida a las cargas térmicas que indicala norma ISO-834-1

Agradecimientos

Plan Nacional del Ministerio de Ciencia y Tecnología (España), proyecto de investigación AGL2009-11311.

Los autores agradecen el apoyo del centro tecnológico CIDEMCO – TECNALIA, que permitió realizar los ensayos experimentales, así como el centro tecnológico CETEMAS que aportó el software necesario para poder realizar los modelos numéricos.

Referencias Bibliográficas

- Knudson R.M, Schniewind A.P, “*Performance of structural wood members exposed to fire*”, Forest Products Journal, Vol. 25, No. 2, 1975.
- Fredlund, B. “*Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire*”, Fire Safety Journal Volume 20, Issue 1, 1993, Pages 39-69
- Janssens,M. “*Modeling of the Thermal Degradation of Structural Wood Members Exposed to Fire*”, Journal of Fire and Materials, Vol 28, pp 199-207, 2004.
- Pinto E. M. et al. “*Estudio teórico-experimental sobre la degradación térmica de vigas de Eucalyptus*” Maderas. Ciencia y Tecnología,, año/vol. 9, número 002 Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile pp. 135-144
- PNE-EN 1995-1-2 (inédito) “*Eurocódigo 5- Diseño de estructuras de madera. Parte 1-2: Reglas generales. Estructuras sometidas al fuego*”. AENOR. Proyecto de norma en fase de Información Pública, anulará a la norma vigente UNE-ENV 1995-1-2:1999.
- Rowell, R. M. (1991). “*Chemical Modification of Wood*”. In: Wood and cellulosic chemistry. New York, cap.15 p. 703-756. David Hon & Nobuo Shiraishi editors.
- Konig, J. (2005). “*Effective thermal actions and thermal properties of timber members in natural fires*”. Journal of Fire and Materials, Volume 30, Issue 1, pages 51–63, January/February 2006. Article first published online: 28 JUL 2005.
- Janssens M. (1994) “*Thermo-physical properties for wood pyrolysis models*”. In Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast, Australia,; 607–618.
- Vorritter, L. (1956) “*Combustion and heat insulating losses of wood and fibreboards*”. Holzforschung 10(3), 73-80
- Hawley, L. F. (1952) “*Combustion of wood*”, Chapter 19 in Wood Chemistry, Vol II, by Louis E. Wise and Edwin C. Jahn, 2nd edition, Reinhold Pub. Co., N.Y.
- Schaffer, E. L. (1967) “*Charring rate of selected woods – transverse to grain*”, Research Paper FPL-69. USDA Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, USA.
- Frangi, A. et al (2003) “*Charring rates and temperature profiles of wood sections*”, Fire and Materials Volume 27, Issue 2, pages 91–102, March/April 2003
- Browne, F.L. (1958). “*Theories of the combustion of wood and its control, a survey of the literature.*” FPL Report 2136.
- Truax, T.R. 1959. “*Fire Research and results at U.S. Forest Products Laboratory*”. US. Forest Service; FPL rep. n. 1999, 63p. Madison, Wisconsin.
- Laplanche, K.; Dhima, D.; Racher, P. 2004. “*Predicting the behaviour of dowelled connections in fire: fire tests results and heat transfer modeling*”. In: Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2004, Lathi, Finland, p. 335-340.
- Kollmann, F.F.P.; Côte, Jr. 1968. “*Principles of wood science and technology*”, V. 1, Heidelberg Germany, 592p.
- White, R.H. 1988. “*Charring rates of different wood species*”. Thesis for degree of PhD. University of Wisconsin-Madison, EUA.
- Poon, L.; England, J.P. 2003. “*Literature Review on the Contribution of Fire Resistant Timber Construction to Heat Release Rate*”. Warrington Fire Research, 178p. Victoria.
- Konig, J.; Walleij, L. 1999. “*Performance of timber frame assemblies*”. In Walford, G.; Gaunt, G. (Ed.). Rotorua, New Zealand Forest Research Institute. Forest Research Bulletin, 212