

ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE LA DEGRADACIÓN TÉRMICA DE VIGAS DE EUCALYPTUS

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE THERMAL DEGRADATION OF EUCALYPTUS TIMBER

Edna Moura Pinto¹, Ronaldo Regobello², Jorge Munaiar Neto³, Carlito Calil Junior⁴

RESUMEN

La acción térmica sobre la madera causa su degradación a través del proceso de combustión de sus componentes y de la liberación de vapor, gases combustibles y carbón. Esto reduce su capacidad de carga debido a la disminución de la sección transversal por carbonización y a las variaciones de sus propiedades de resistencia y rigidez, ocasionadas por la exposición a altas temperaturas. En este trabajo, se presenta un estudio numérico y experimental sobre el comportamiento de vigas de eucalipto expuestas a la acción del fuego, en el cual, la resistencia y la rigidez de la viga fueron evaluadas en función de los cambios de temperatura, permitiendo de esta forma, analizar el efecto del factor de sección sobre el aumento interno de temperatura de las vigas de eucalipto.

Palabras Clave: madera, gradiente térmico, eucalipto, análisis experimental, análisis numérico

ABSTRACT

Thermal action on timber causes it to degrade through combustion of its chemical components, which leads to the release of vapors, combustible gases and char. This diminishes its load capacity due to the reduction of its cross section by charring and to changes in its mechanical properties of strength and stiffness as a function of its exposure to high temperatures. This paper discusses a numerical and experimental study of the behavior of Eucalyptus beams exposed to fire, in which the properties of strength and stiffness were evaluated as a function of evolving temperatures, allowing for an analysis of the effect of the section factor on the internal rise in temperature of structural Eucalyptus beams.

Keywords: timber, thermal gradient, Eucalyptus, experimental analysis, numerical analysis.

INTRODUCCION

Existe una gran interacción entre los fenómenos físicos y químicos en la combustión de la madera, de modo que la presencia de componentes químicos interfiere en su proceso de carbonización influenciando la cinética de la pirolisis. La organización física de la pared celular tiene como base la

¹Ph.D., LaMEM/SET/EESC – Escola de Engenharia de São Carlos, USP – Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense 400, São Carlos 13666-590, SP, Brasil (emoura@sc.usp.br)

²Estudiante de Maestría, SET/EESC. Escola de Engenharia de São Carlos, USP – Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense 400, São Carlos 13666-590, SP, Brasil (ronbello@sc.usp.br)

³Ph.D., Profesor. SET/EESC – Escola de Engenharia de São Carlos, USP – Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense 400, São Carlos 13666-590, SP, Brasil (jmunaiar@sc.usp.br)

⁴Ph.D, Profesor Titular. LaMEM/SET/EESC – Escola de Engenharia de São Carlos, USP – Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense 400, São Carlos 13666-590, SP, Brasil (calil@sc.usp.br)

Autor para correspondencia: emoura@sc.usp.br

Recibido: 03 de septiembre, 2006. Aceptado: 04 de junio, 2007.

celulosa y comienza a descomponerse químicamente cerca de los 200°C. De entre los tres componentes, las hemicelulosas son las más susceptibles a la degradación térmica, seguida por la celulosa, por otro lado la lignina contribuye más a la formación del carbón y consecuentemente contribuye menos a la formación de las llamas cuando es comparada a la celulosa, (Rowell, 1991). En el proceso de degradación térmica la lignina se presenta como el componente más estable, comenzando a presentar cambios estructurales a temperaturas inferiores a 200°C.

La madera es un combustible sólido. Como tal, pasa por un proceso de degradación térmica cuando es sometida a temperatura elevadas. La comprensión de que el proceso de degradación térmica ocurre en etapas, así como el conocimiento de la reacción y de la resistencia al fuego de la madera permiten apoyar los estudios del comportamiento de la madera frente al fuego.

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.

Diferentes investigadores han realizado trabajos sobre el comportamiento de la madera con base en sus propiedades físico-químicas, entre ellos: Browne (1958), Truax (1959), Laplanche *et al* (1998), Kollman y Coté (1968), y con relación a su desempeño estructural al fuego White (1988), Poon (2003), König (1999), Schaffer (1967). En base de estos estudios es posible la elaboración de modelos numéricos y matemáticos para expresar el comportamiento de la madera expuesta al fuego. Los modelos numéricos reducen la necesidad de la realización de los costosos ensayos y posibilitan la extrapolación del comportamiento de la madera estructural al fuego.

Los estudios realizados por Truax (1959), han permitido hacer una estimación de la temperatura en la base del estrato carbonizado, ofreciendo una valiosa ayuda para la determinación de la tasa de conversión de madera en carbón (tasa de carbonización). De acuerdo con Truax (1959), la temperatura de carbonización varía entre 550°F y 615°F (288°C y 324°C). En este trabajo, con el propósito de simplificar, se adoptó un valor aproximado al utilizado por White (1988) que es 288°C, siendo considerada una temperatura de 290°C.

La tasa de carbonización, es por lo tanto, un importante factor dimensional para la evaluación de la estabilidad de los elementos estructurales de madera y de su capacidad portante, en situaciones en las cuales ésta se encuentra expuesta al fuego.

Aunque dentro de la sección, la madera no está expuesta a temperaturas suficientes para causar carbonización, las elevadas temperaturas provocan la reducción de sus propiedades mecánicas a través de la degradación de sus componentes químicos.

MÉTODOS

Este estudio fue realizado con madera *Eucalyptus citriodora*, cuyas propiedades físicas y mecánicas, la convierten en un material apropiado para aplicaciones estructurales. Tres vigas, cuyas características físicas se presentan en la Tabla 1, con tamaño (0,16m x 0,26m x 2,00m), fueron expuestas al calor de

acuerdo con la curva de calentamiento recomendada por la norma ASTM E119 (1995). Las dimensiones internas del horno son 4,00m x 3,07m x 0,91m, con sistema constituido por cuatro quemadores a gas GLP de baja presión y con conductos del agotamiento.

En las vigas de madera fueron hechos treinta y seis orificios, donde en cada orificio es colocada una termocupla de tipo K.

Tabla 1: Caracterización de las muestras de Eucalyptus.

Muestra	Densidad de referencia (g/cm ³)	Densidad específica (g/cm ³)	Humedad (%)
D3	0,97	0,81	19,3
D1	1,08	0,83	30,6
C2	1,07	0,86	27,5

Doce termocuplas fueron colocadas en cuatro cuadrantes (A, B, C y D), a tres profundidades diferentes (10mm, 20mm y 30mm), de acuerdo con la Figura 1. Una temperatura de 290°C, fue asumida para la base del estrato carbonizado y el tiempo de exposición fue de aproximadamente una hora. Después que la última termocupla registró la temperatura base del estrato carbonizado, el experimento fue terminado y el horno abierto. Las vigas recibieron chorros de agua, para interrumpir el proceso de carbonización y secado en ambiente cubierto por 48 horas.

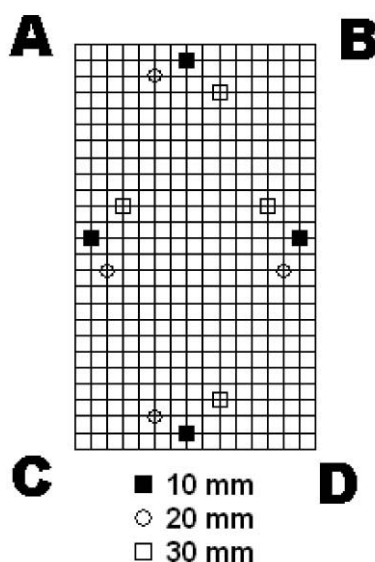


Figura 1: Sección nominal transversal de la viga mostrando la profundidad de implantación de las termocuplas

Evaluación de la resistencia a la compresión

El módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión en la dirección de las fibras fueron determinados en pequeñas muestras (50mmx50mmx150mm) removidas de las vigas según la Norma NBR 7190 (1997) antes y después de ser expuestas al fuego un tiempo promedio de cincuenta y cinco minutos.

Modelamiento Numérico

Los modelos numéricos fueron construidos con base en el Método de Elementos Finitos (MEF), utilizando el programa ANSYS versión 8.0. La densidad fue determinada mediante análisis termogravimétrico, de acuerdo con el procedimiento descrito por Pinto (2005). En la curva de la Figura 2 está representada la densidad relativa de la madera en función de la elevación de la temperatura. Para su incorporación en el modelo numérico, la curva fue calibrada, adoptando un valor mínimo de 0,1 g/cm³ en 1000°C, lo que no representa la realidad a partir de 500°C.

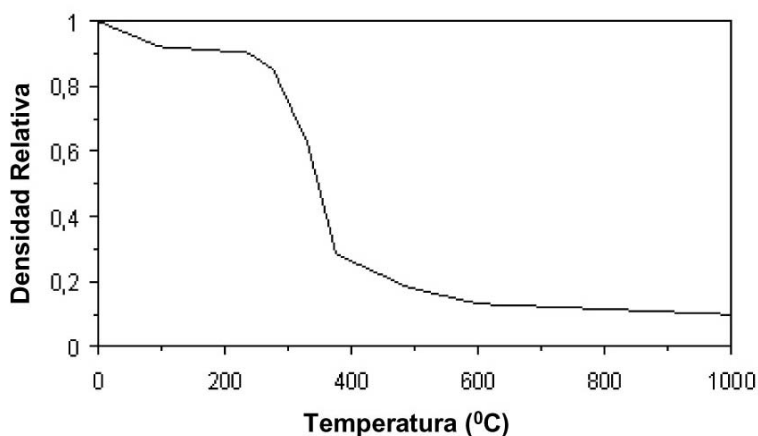


Figura 2: Densidad Relativa en función de la temperatura para *Eucalyptus citriodora*

Calor Específico

El calor específico de la madera está representado en la curva de la Figura 3. Entre 0 y 200°C, la curva sigue la ecuación presentada por Poon (2003), Ec.1, donde c está en kJ/kg.K, y θ es la temperatura en °C.

$$c = 1,125 + 0,00452 \theta \quad (1)$$

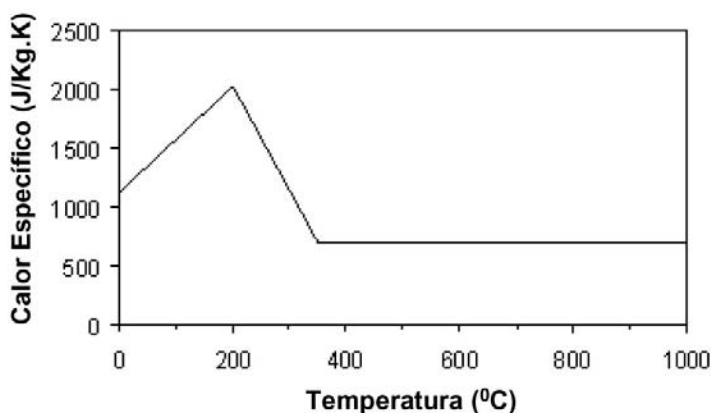


Figura 3: Curvas de Capacidad calorífica de la madera en función de la temperatura (adoptada en este trabajo)

Los valores propuestos para temperaturas que superen los 350°C son iguales a los de la curva presentada por Knudson et al. (1975), referenciado por Jones (2001). Fue adoptada una interpolación lineal para los valores de calor específico que varían entre 200 y 350°C. Esta aproximación es similar a la adoptada por Laplanche et al. (2004) en sus modelos numéricos.

Conductividad Térmica

La conductividad térmica adoptada en este trabajo (ver Figura 4) fue calibrada para obtener una correlación entre los resultados experimentales y el modelo numérico. La conductividad inicial de 0.20 W/m.K, extraída de la curva publicada por Urakami y Fukayama (1981), referenciado por Harada et al. (1998), correlaciona los valores de conductividad térmica a temperatura ambiente con la densidad de la madera.

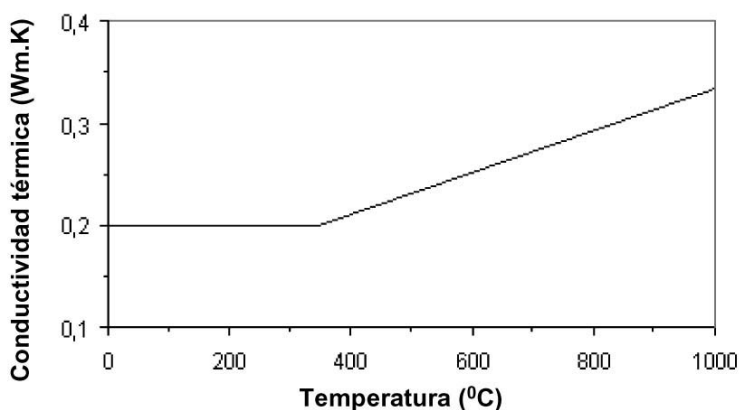


Figura 4: Curvas de Conductividad térmica adoptadas para la madera.

Emisividad Relativa y Coeficiente de Convección

En este estudio, fue empleado un procedimiento similar al presentado por Thomas (1997), referenciado por Jones (2001), del cual resultó un coeficiente de emisividad de 0,6. El coeficiente de transferencia de calor por convección empleado fue de 13,5, de acuerdo con lo sugerido por Poon (2003).

Elementos finitos utilizados

Dos tipos de elementos finitos fueron utilizados en la simulación numérica: un elemento bidimensional (PLANE77), para modelar la sección transversal discretizada de la viga; y un elemento de superficie (SURF151), para aplicar las condiciones de contorno, de convección y de radiación al modelo. La sección transversal de la viga fue dividida en elementos de 1,0 x 1,0 cm. Dos capas de elementos SURF151 fueron aplicadas en la superficie, una para los efectos de radiación y la otra para los efectos de convección.

RESULTADOS Y DISCUSION

El promedio de duración de los ensayos fue de 55 minutos, a una temperatura de horno máxima de 955°C. El experimento fue interrumpido, cuando la última termocupla alcanzó una temperatura isotérmica de 290°C.

Gradiente de Temperatura

Los resultados demostraron que la temperatura cerca de la superficie de la viga tendía a alcanzar un estado de equilibrio con la temperatura del ambiente externo. Dentro de la sección, las propiedades aislantes del carbón y la baja conductividad térmica, contribuyeron para mantener lento y a una temperatura prácticamente constante el proceso de degradación.

Evaluación de la Resistencia

Los resultados indican que la resistencia de la madera disminuyó aproximadamente un 20%, mientras que, su módulo de elasticidad aumentó cerca de 12.3%. En la Tabla 2, para comparación son presentados los valores de resistencia y rigidez obtenidos con los definidos en la norma NBR 7190 (1997). La resistencia de la madera utilizada es ligeramente mayor que la descrita por la norma y el módulo de elasticidad es poco menor, después de la exposición al fuego es posible notar la disminución de la resistencia y el aumento en el módulo de elasticidad. Un análisis de varianza de los resultados, a un nivel de 5% de significancia, coloca en evidencia la diferencia entre la resistencia y la rigidez de la madera antes y después de su exposición al fuego.

Tabla 2: Valores medios de resistencia y rigidez para el *E. citriodora*.

Resistencia ⁽¹⁾	E ⁽¹⁾	Antes de la Exposición		Después de la Exposición	
		Resistencia ⁽²⁾	E ⁽²⁾	Resistencia ⁽²⁾	E ⁽²⁾
62,0	18421	65,3	17072	50,0	20673

(1) valores medios de la especie (MPa), NBR 7190 (1997);

(2) Valores medios de las muestras (MPa).

Modelamiento Numérico

La Figura 5, muestra los campos de temperatura obtenidos, con el programa ANSYS v8.0, para 30 y 60 minutos de exposición al fuego, según la recomendación de la norma ASTM E119 (1995).

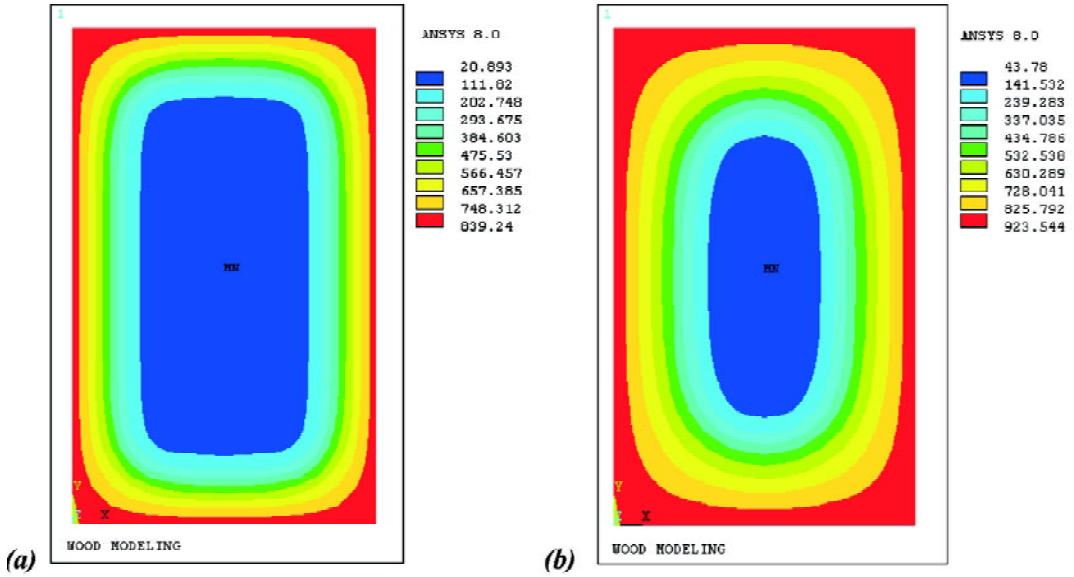


Figura 5: Campos de temperatura (°C) del modelo: (a) t = 30 minutos, y (b) t = 60 minutos

En las Figuras 6, 7 y 8, se comparan los resultados experimentales y numéricos obtenidos con ANSYS v8.0, para cada posición de las termocuplas.

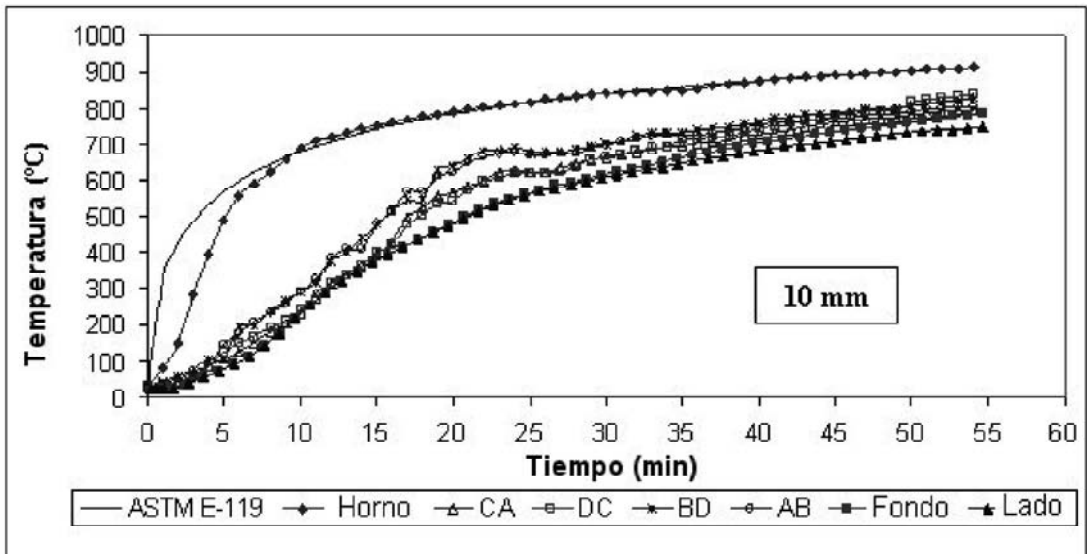


Figura 6 – Evolución de la temperatura en función del tiempo a 10mm de profundidad

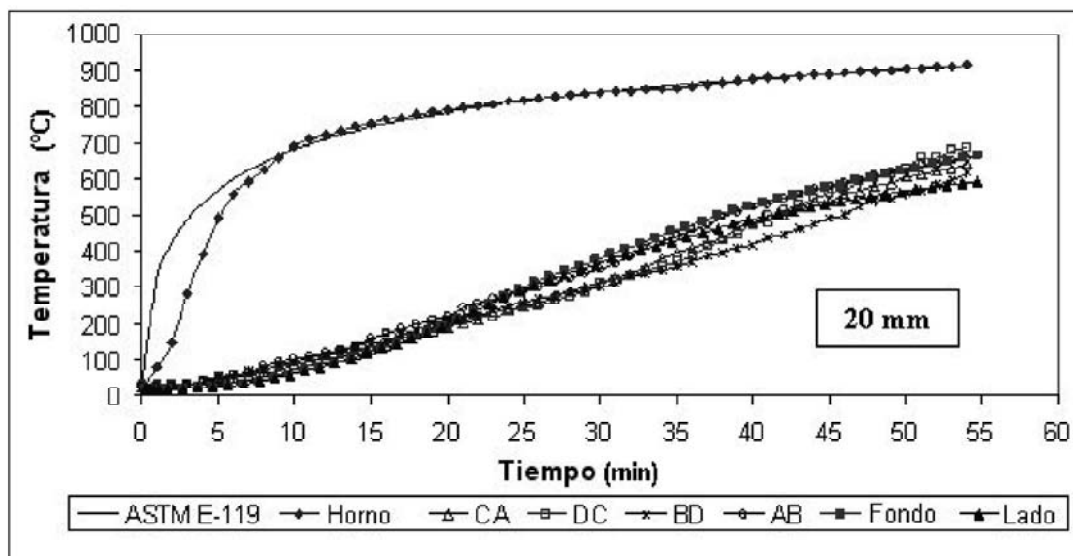


Figura 7 – Evolución de la temperatura en función del tiempo a 20mm de profundidad

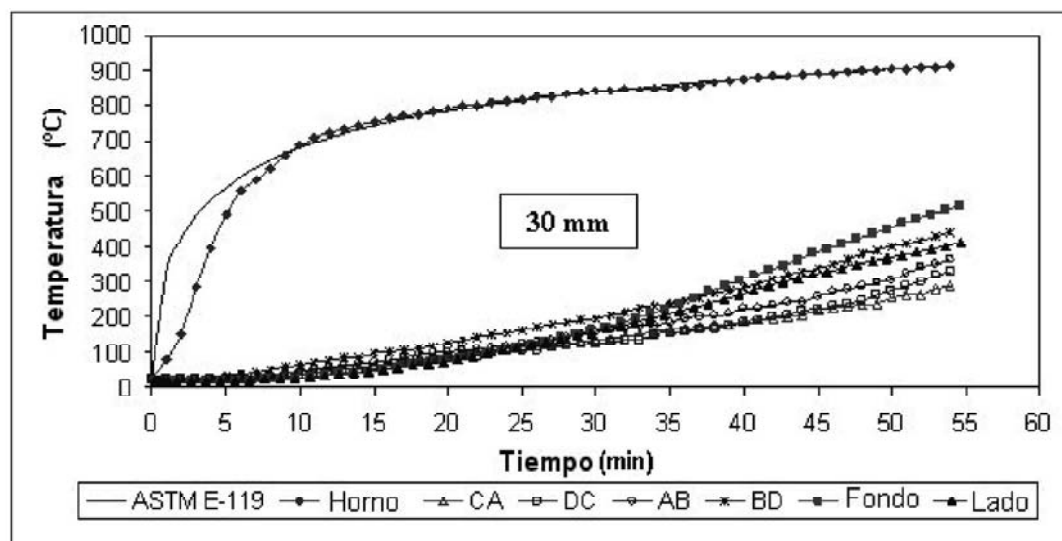


Figura 8 – Evolución de la temperatura en función del tiempo a 30mm de profundidad

Las curvas indican la evolución de la temperatura en función del tiempo para las tres profundidades de instalación de las termocuplas (10, 20, 30mm). Los segmentos CA, DC, BD y AB, en las leyendas de dichas figuras, hacen referencia a los resultados experimentales para cada lado de la viga, como se indica en la Figura 1. En los resultados numéricos, fondo, se refiere a la cara superior e inferior del modelo, mientras que lado, se refiere a las caras derecha e izquierda del modelo.

Para la profundidad de 10 mm, las curvas resultantes del modelo numérico (fondo y lado) están por debajo de las curvas referentes a los datos experimentales. Para las profundidades de 20 y 30 mm, la figura muestra igual comportamiento durante los primeros 20 minutos y, a partir de ahí, las curvas describen una trayectoria arriba de la media de los resultados experimentales. Teniendo en cuenta que el modelo numérico adoptado fue construido empleando una estrategia numérica simplificada, en la

cual no se consideran las posibles variaciones de las propiedades de la madera y se emplean las herramientas básicas del programa ANSYS para realizar los análisis térmicos y estructurales, se puede concluir que, los resultados numéricos muestran una concordancia bastante satisfactoria con los datos experimentales.

CONCLUSIONES

Las temperaturas simuladas numéricamente, para la profundidad de 10mm, fueron ligeramente menores que las medidas experimentalmente. Sin embargo, el resultado alcanzado puede ser considerado satisfactorio, teniendo en cuenta las dificultades enfrentadas para obtener los parámetros térmicos de la madera carbonizada o parcialmente carbonizada. Para las profundidades de 20 y 30mm, los resultados del modelo numérico presentan un buen ajuste con los resultados experimentales, indicando que el modelo puede ser aplicado para estimar, con una buena aproximación, la profundidad de la carbonización en miembros estructurales de madera fabricados con *Eucalyptus citriodora*, bajo condiciones de fuego.

El programa ANSYS resulta ser una buena herramienta para el modelamiento de la dinámica de la carbonización de la madera.

La velocidad de la carbonización es mayor para los primeros 10mm de la viga y sufre una reducción alrededor del 30% cuando esta es observada en la profundidad de 30mm. Es posible notar el comportamiento no lineal de la carbonización de la madera.

El análisis de varianza de los resultados, a un nivel de 5% de significancia, permite concluir, que la resistencia y la rigidez de la madera, antes y después de ser expuesta al fuego, difieren, revelando una reducción de la resistencia a la compresión y un incremento del módulo de elasticidad después de la exposición, reduciendo así la resistencia de la madera y ocasionando su fragilización.

REFERENCIAS

Ansys Inc., 2003. Ansys Release 8.0.

American Society for Testing and Materials, 1995. ASTM E119-95a – *Fire tests of building construction and materials* (CD ROM). Philadelphia.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997. NBR 7190 – *Design of timber structures*. ABNT. Rio de Janeiro.

Browne, F.L. 1958. Theories of the combustion of wood and its control, a survey of the literature. FPL Report 2136.

Harada, T.; Hata, T.; Ishihara, S. 1998. Thermal constants of wood during the heating process measured with the laser flash method. *J. Wood Science* 44:425-431.

Jones, B. H. 2001. Performance of Gypsum Plasterboard Assemblies Exposed to Real Building Fires. 156p. A research report for the degree of Master of Engineering in Fire Engineering Department of Civil Engineering University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

Kollmann, F.F.P.; Côte, Jr. 1968. *Principles of wood science and technology*, V. 1, Heidelberg Germany, 592p.

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

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.

Pinto, E. M. 2005. Determination of a charring rate model transversal to grain to *Eucalyptus citriodora* and *Eucalyptus grandis*. 119 p. PhD. Thesis- Institute of Physics of São Carlos,

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.

Schaffer, E.L. 1967. Charring rate of selected woods-transverse to grain. FPL. 69. Madison, WI: US Department of agriculture, Forest Products Laboratory.

Rowell, R. M. 1991. *Chemical Modification of Wood*. In: Wood and cellulosic chemistry. New York, cap.15 p. 703-756. David Hon & Nobuo Shiraishi editores.

Truax, T.R. 1959. Fire Research and results at U.S. Forest Products Laboratory. US. Forest Service; FPL rep. n. 1999, 63p. Madison, Wisconsin.

White, R.H. 1988. Charring rates of different wood species. Thesis for degree of PhD. University of Wisconsin-Madison, EUA.