

# Análise numérica da transferência de calor em madeiras brasileiras em situação de incêndio

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco<sup>1</sup>, Rodrigo Barreto Caldas<sup>2</sup>,  
Ana Lúcia Crespo Oliveira<sup>3</sup>, Ricardo Hallal Fakury<sup>4</sup>

**resumo** : A partir de resultados experimentais da elevação de temperatura em madeiras brasileiras expostas ao fogo, apresenta-se uma comparação com resultados numéricos para a distribuição de temperatura. Os modelos numéricos utilizam elementos finitos lineares de quatro nós para análise da transferência de calor em domínios sólidos com condições de contorno em convecção e radiação ou temperaturas prescritas em situação de incêndio. As propriedades da madeira adotadas para o cálculo das temperaturas são tomadas com base na normalização europeia. Os resultados obtidos neste trabalho indicam a necessidade de ajustes nas seguintes propriedades apresentadas pela normalização europeia: calor específico, condutividade térmica e variação de densidade, com o objetivo de adequar à análise de transferência de calor em espécies brasileiras.

Palavras-chave: Transferência de calor, análise numérica, estruturas de madeira, incêndio.

## numeric Analysis of Heat transfer in Brazilian Wooden Species Exposed to fire

**ABSTRACT:** From experimental results of the temperature increase in Brazilian wooden species exposed to fire, a comparison with numeric results for the temperature distribution is presented. The numeric models use 4-node linear quadrilateral finite elements for the heat transfer analysis in solid domains with boundary condition in convection and radiation or prescribed temperatures in fire condition. The wood properties adopted for the temperatures calculation take in account the principles of the European normalization. The obtained results indicate the need of adjustments in the following properties presented by the European normalization: specific heat, thermal conductivity and density variation, with the goal to adjust the heat transfer analysis in Brazilian species.

Key words: Heat transfer, numeric analysis, wooden structures, fire.

### 1 introdução

A madeira apresenta bom comportamento estrutural em situação de incêndio. Por ser um material combustível, é analisada com preconceito. No Brasil, essa situação ocorre por várias razões, como falta de normalização específica para dimensionamento de madeiras em situação de incêndio, carência de profissionais especializados em segurança contra incêndio e desconhecimento dos soldados dos corpos de bombeiros. Observa-se que os fatores convergem para a falta de informação fortemente ligada a poucas pesquisas nessa área.

A falha de elementos estruturais de madeira e de seus derivados ocorre, principalmente, pela redução da seção transversal resistente durante a exposição ao incêndio (PINTO, 2005). Essa redução pode ser calculada a partir da taxa de carbonização geralmente apresentada em unidades de comprimento por tempo (mm/min), representando a velocidade de carbonização (Figura 1).

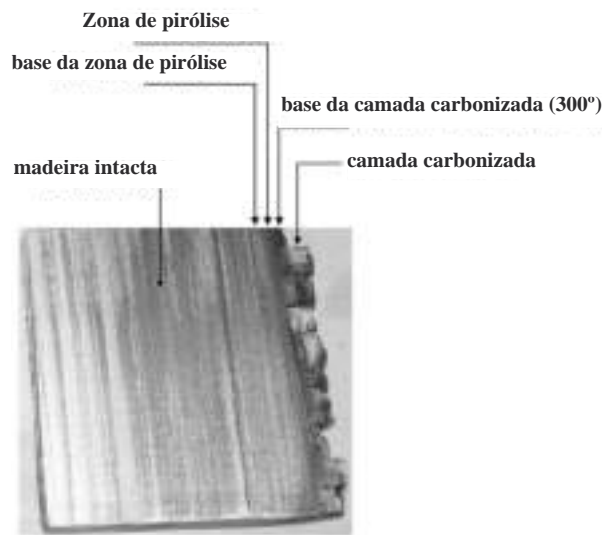
Resultados experimentais apresentam relação aproximadamente linear entre tempo e profundidade de carbonização, medida da superfície original até a isoterma de 300°C (CARRASCO, 2009). A taxa de carbonização correlaciona-se com a densidade e o teor

<sup>1</sup>Engenheiro Civil, Professor Dr. em Engenharia de Estruturas – Departamento de Engenharia de Estruturas/DEES – Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG – Belo Horizonte, MG – mantilla@dees.ufmg.br

<sup>2</sup>Engenheiro Civil, Professor Dr. em Engenharia de Estruturas – Departamento de Engenharia de Estruturas/DEES – Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG – Belo Horizonte, MG – caldas@dees.ufmg.br

<sup>3</sup>Engenheira Civil, Doutoranda em Engenharia de Estruturas – Departamento de Engenharia de Estruturas/DEES – Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG – Belo Horizonte, MG – lucia@dees.ufmg.br

<sup>4</sup>Engenheiro Civil, Professor Dr. em Engenharia de Estruturas – Departamento de Engenharia de Estruturas/DEES – Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG – Belo Horizonte, MG – fakury@dees.ufmg.br



**figura 1** – Carbonização da madeira (15 minutos de exposição ao incêndio padrão).

*Figure 1* – Wood charring (15 minutes of standard fire exposure).

de umidade para cada espécie de madeira (SCHAFFER, 1984; PINTO 2005). A permeabilidade, o teor de lignina e certos extrativos também influenciam a carbonização, justificando as diferenças entre as espécies (WHITE, 2000). A direção da carbonização em relação às fibras também exerce influência. Estudos demonstraram que, na direção longitudinal, a velocidade de carbonização é o dobro da velocidade na direção transversal às fibras (WHITE; DIETENBERGER, 1980; SCHAFFER, 1984).

A norma europeia EN 1995-1-2 (2004) apresenta, para folhosas, valores de taxa de carbonização iguais a 0,50 para madeira serrada ou madeira laminada colada (MLC), com densidade característica  $\geq 450 \text{ kg/m}^3$  e 0,65 mm/min para madeira serrada ou MLC, com densidade característica de  $290 \text{ kg/m}^3$ , e valores iguais a 0,65 mm/min para coníferas na forma de madeira serrada ou MLC, com densidade característica  $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ .

Neste trabalho, os resultados experimentais da elevação de temperatura em corpos-de-prova da espécie brasileira conhecida popularmente como vinhático (CARRASCO, 2009) são comparados com os resultados obtidos numericamente, via método dos elementos finitos

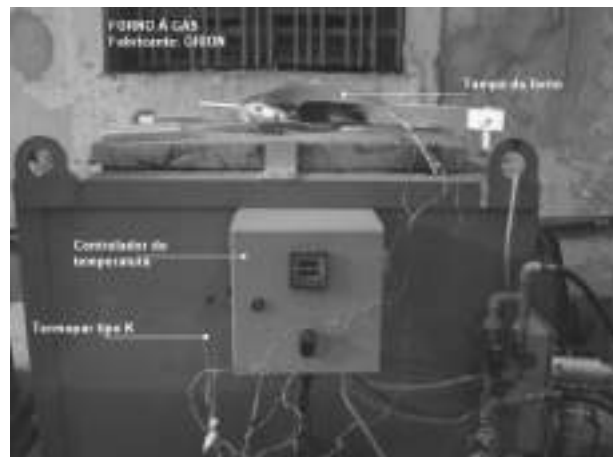
ou MEF. As propriedades da madeira para cálculo das temperaturas foram tomadas com base na normalização europeia.

## 2 mATerIAL e métodos

### 2.1 Análise experimental

Os corpos-de-prova de madeira ensaiados tinham a forma cúbica com 150 mm de aresta. As espécies estudadas foram: *Plathymenia reticulata* (vinhático), *Cedrela fissilis* (cedro), *Tabebuia serratifolia* (ipê), *Manikara* spp (paraju), *Peltogyne* sp. (roxinho), *Dipteryx odorata* (cumaru), *Cordia hipoleuca* (louro) e *Eucalyptus grandis* (eucalipto).

O procedimento foi adaptado do ASTM E 119 (1995), utilizando-se um forno a gás de diâmetro interno de 600 mm e altura de 700 mm (Figura 2) (CARRASCO, 2009).



**figura 2** – Forno e seus componentes.

*Figure 2* – Furnace and its components.

Sensores foram utilizados para medir a temperatura no interior do forno, na superfície e em cinco profundidades nos corpos-de-prova, os quais foram expostos ao fogo em apenas uma face e no sentido transversal às fibras. As demais superfícies foram protegidas por material isolante térmico (placa de fibra cerâmica e manta de fibra de vidro) e, em seguida, os

corpos-de-prova foram inseridos em uma caixa metálica (Figura 3).

Para validação da análise numérica foram utilizados os resultados da espécie vinhático. Além da elevação da temperatura, foram determinadas experimentalmente a densidade aparente (considerando as dimensões reais do corpo-de-prova) e o teor de umidade (ABNT NBR 7190, 1997, Anexo B). Para o vinhático, os valores obtidos foram de 12%, para o teor de umidade média e 594 kg/m<sup>3</sup>, para a densidade aparente média.

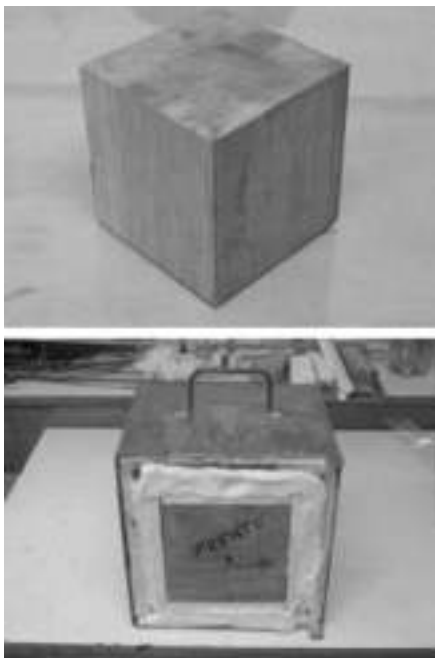


figura 3 – Corpo-de-prova.

Figure 3 – Specimen

## 2.2 Análise numérica

A condução de calor em meios sólidos e em três dimensões (Figura 4) é governada pela equação diferencial,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \dot{\psi} = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

em que  $\dot{\psi}$  é a taxa de calor interno gerado;  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$  e  $\lambda_z$  são as condutividades térmicas nas direções x, y e z, respectivamente; c é o calor específico;  $\rho$  é a densidade do material;  $\theta(x, y, z, t)$  é o campo de temperaturas e t, o tempo. O campo de temperaturas que satisfaz a expressão 1 de condução de calor no domínio  $\Omega$  deve satisfazer a certas condições de contorno, que podem ser: temperaturas prescritas numa parte  $\Gamma_\theta$  do contorno; fluxo de calor prescrito  $\varphi_p$  numa outra parte  $\Gamma_{\varphi_p}$ ; transmissão de calor por convecção entre uma parte  $\Gamma_{\varphi_c}$ , à temperatura  $\theta$ , e os gases à temperatura  $\theta_g$ , dado por

$$\varphi_c = \alpha_c (\theta - \theta_g), \quad (2)$$

em que  $\alpha_c$  é o coeficiente de transmissão de calor por convecção; transmissão de calor por radiação no contorno  $\Gamma_{\varphi_r}$  à temperatura  $\theta$ , dado por

$$\varphi_r = \varepsilon_{res} \beta (\theta^4 - \theta_g^4), \quad (3)$$

em que  $\varepsilon_{res}$  é a emissividade resultante da superfície e  $\beta$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

O desenvolvimento de elementos finitos para análise de transferência de calor por condução pode ser visto em Caldas (2008). Neste trabalho, o programa ABAQUS (DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA, 2007) foi utilizado para calcular-se a elevação de temperatura via elementos finitos. Inicialmente, foi desenvolvido um modelo tridimensional (Figura 5a), com elementos lineares de 8 nós, DC3D8. Porém, devido à simetria, um modelo bidimensional com elementos lineares de 4 nós, DC2D4, foi adotado, possibilitando tempos menores de processamento (Figura 5b).

Dois modelos foram analisados: um com temperaturas prescritas e outro com fluxos, devido à convecção e à radiação na superfície exposta. No modelo com temperatura prescrita, as temperaturas medidas experimentalmente na superfície do corpo-de-prova foram utilizadas. No outro modelo, os fluxos de calor devido à convecção e à radiação foram obtidos em função da temperatura do incêndio padrão (ABNT NBR 5628, 1980; ABNT NBR 14432, 2000).

Na Figura 6 são apresentadas as divisões que foram utilizadas para a geração da malha estruturada, juntamente com as profundidades em que foram medidas as temperaturas.

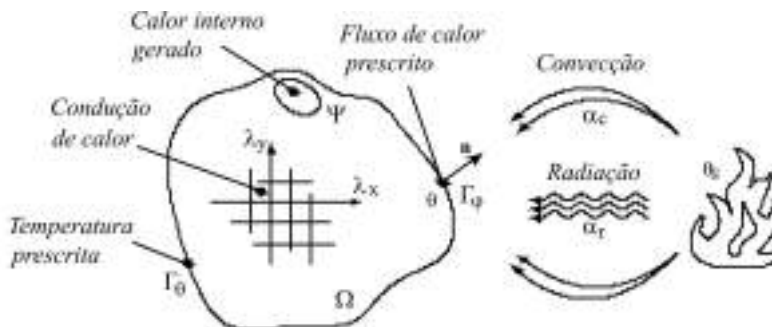


figura 4 – Condições de contorno em problemas de condução de calor (CALDAS, 2008).

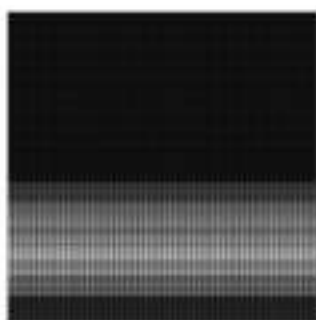
Figure 4 – Boundary conditions in heat conduction problems (CALDAS, 2008).

### 2.3 Propriedades térmicas do material

Segundo o EN 1995-1-2 (2004), o modelo de transferência de calor deve levar em conta a variação das propriedades térmicas do material com a temperatura. Para modelos que não consideram a transferência de massa, por exemplo, devido à vaporização da umidade, ou o aumento da transferência de calor devido à fissuração, as



(a)



(b)

figura 5 – Modelos: (a) tridimensional; (b) bidimensional.

Figure 5 – Models: (a) three-dimensional (b) two-dimensional.

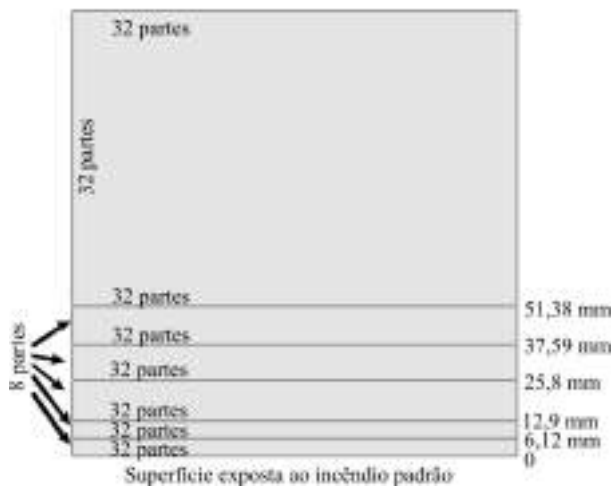


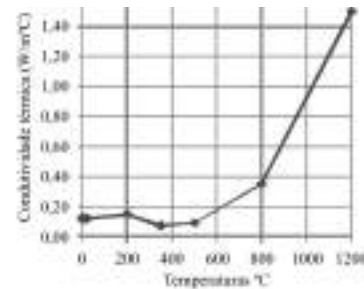
figura 6 – Discretização do modelo e profundidades nas quais as temperaturas foram medidas.

Figure 6 – Discretization of the model and depths where temperatures were measured.

propriedades térmicas são frequentemente modificadas para dar resultados que podem ser verificados por ensaios.

Na Figura 7, têm-se os dados e o gráfico da condutividade térmica, em função da temperatura utilizada na análise numérica do vinhático, obtidos conforme o EN 1995-1-2 (2004).

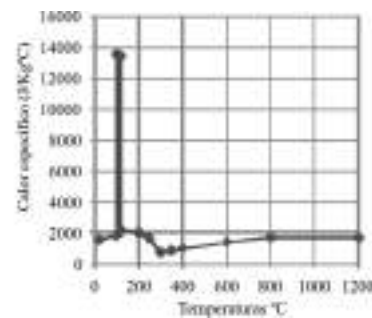
Condutividade térmica W/m°C	Temperatura C°
0,12	0
0,12	20
0,15	200
0,07	350
0,09	500
0,35	800
1,50	1200



**figura 7** – Dados e gráfico da condutividade térmica, em função da temperatura, utilizados na análise numérica.

*Figure 7 – Data and graph of temperature-thermal conductivity relationship, used in numerical analysis.*

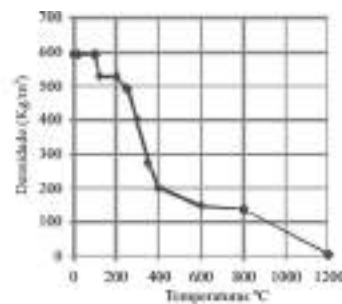
Calor específico J/kg K	Temperatura C°
1530	0
1530	20
1770	90
13000	100
13500	110
2120	120
2000	200
1620	250
710	300
850	350
1000	400
1400	800
1650	800
1600	1200



**figura 8** – Dados e gráfico de calor específico, em função da temperatura, utilizados na análise numérica.

*Figure 8 – Data and graph of temperature-specific heat relationship, used in numerical analysis.*

Densidade kg/m³	Temperatura C°
594	0
594	20
594	90
530	120
530	200
495	250
403	300
276	350
201	400
148	600
138	800
5	1200



**figura 9** – Dados e gráfico da variação da densidade, em função da temperatura, utilizados na análise numérica.

*Figure 9 – Data and graph of temperature-density relationship, used in numerical analysis.*

### 3 resultados e discussão

Os resultados numéricos e experimentais são comparados para o modelo com temperatura prescrita igual à obtida experimentalmente e para o modelo com fluxos de calor por convecção e radiação, em função da temperatura do incêndio padrão.

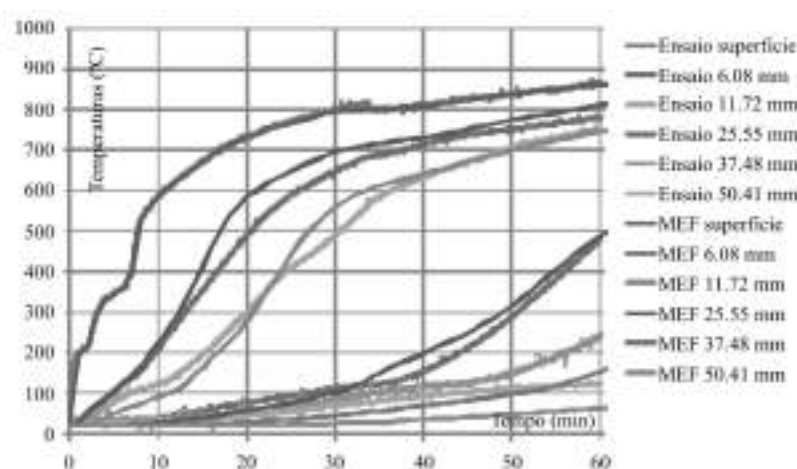
Na Figura 10 são apresentadas as temperaturas para o modelo com temperatura prescrita. Nota-se que as temperaturas na superfície do ensaio são praticamente as mesmas calculadas via MEF. o que era de se esperar, já que elas foram prescritas no modelo numérico.

Nota-se que, nas profundidades de 6,08 mm, 11,72 mm e 25,55 mm, os resultados numéricos apresentam boa concordância com os experimentais. Para a temperatura

de 300°C, os tempos de exposição são bem próximos, indicando que a carbonização (medida para essa isoterma) é bem predita pelo modelo numérico. Para as profundidades de 37,48 mm e 50,41 mm, o modelo numérico apresenta temperaturas menores do que as observadas no ensaio, indicando a necessidade de ajustes nas propriedades adotadas na simulação.

Na Figura 11 observa-se o campo de temperaturas calculadas para os tempos de 15 minutos, 30 minutos, 45 minutos e 60 minutos. A escala de temperaturas foi limitada ao máximo de 300°C, indicando a profundidade da camada carbonizada.

Na figura 12 observam-se, novamente, os resultados experimentais em comparação aos resultados obtidos com o modelo com fluxo por convecção e



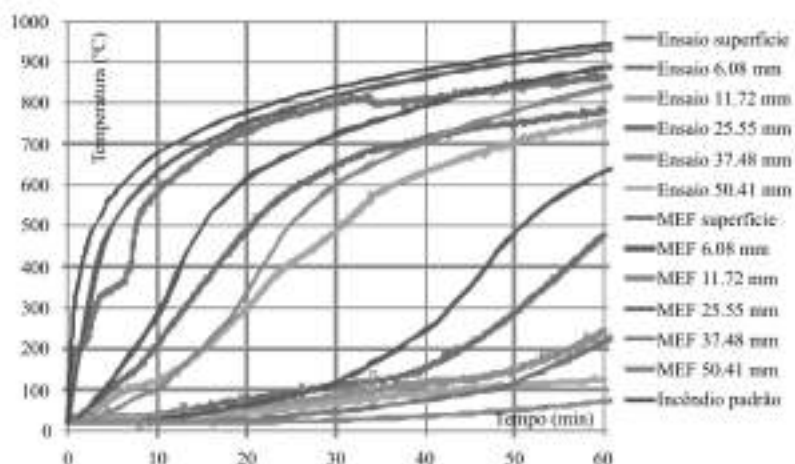
**figura 10** – Temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente para o modelo com temperatura prescrita.

*Figure 10* – Experimental temperatures and temperatures calculated with the model with prescribed temperature.



**figura 11** – Aumento da temperatura, em graus Celsius, e da camada carbonizada da madeira, para os tempos de exposição ao incêndio de 15, 30, 45 e 60 minutos, respectivamente, da esquerda para direita.

*Figure 11* – Increasing temperature, degrees Celsius, and char layer for the fire exposure time of 15, 30, 45 and 60 min, respectively, from left to right.



**figura 12** – Temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente para o modelo com fluxos por convecção e radiação.

*Figure 12* – Experimental temperatures and temperatures calculated with the model with flows by convection and radiation.

radiação, em função da temperatura do incêndio padrão. Na simulação, o coeficiente de transmissão de calor por convecção foi tomado igual a  $25 \text{ W/m}^2\text{C}$  e a emissividade resultante igual a 0,67, resultado da consideração das emissividades das superfícies do corpo-de-prova e das paredes do forno igual a 0,8 (EN 1991-1-2, 2002; EN 1995-1-2, 2004).

Observa-se que as temperaturas calculadas na superfície são superiores às medidas experimentalmente. Uma das justificativas para as diferenças, que ocorrem principalmente nos primeiros 10 minutos e depois dos 30 minutos de exposição, é a dificuldade de controlar as temperaturas no forno. Outras possibilidades são os coeficientes de transmissão de calor adotados nos cálculos. Observa-se que, além da temperatura na superfície, as calculadas para as profundidades de 6,08 mm e 11,72 mm também foram superiores às obtidas experimentalmente. Para a profundidade de 25,55 mm, as temperaturas calculadas são bem próximas às experimentais até o tempo de 30 minutos, a partir do qual aquelas superam as do ensaio. Para maiores profundidades, as temperaturas calculadas são sempre inferiores às obtidas experimentalmente, concordando com os resultados do modelo com temperatura prescrita.

#### 4 conclusões

Apresentou-se uma comparação dos resultados experimentais da elevação de temperatura na madeira da espécie vinhático, com resultados obtidos via MEF. As condições do ensaio conduzem a uma transferência de calor unidimensional a partir da exposição ao incêndio padrão de apenas uma face do corpo-de-prova. Dois modelos foram utilizados: um com temperatura prescrita igual à obtida no ensaio e outro com os fluxos de calor por convecção e radiação, considerando a temperatura do incêndio padrão.

As temperaturas do modelo numérico com temperatura prescrita foram mais próximas às obtidas experimentalmente, indicando que, para maiores profundidades, as temperaturas calculadas são inferiores às obtidas experimentalmente. Para o modelo numérico com fluxos de calor por convecção e radiação, as diferenças nas temperaturas calculadas e observadas experimentalmente foram maiores, porém, para maiores profundidades, o comportamento foi similar.

Ambos os modelos numéricos demonstram que, para maiores profundidades, as propriedades apresentadas pelo EN 1995-1-2 (2004) levam a temperaturas

inferiores às observadas experimentalmente, indicando a necessidade de adequação.

### 5 AgrAdecimentos

Ao CNPq e à Fapemig, pelo apoio material e financeiro.

### 6 referênciAs

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

**Astm e 119:** standard tests for fire tests of building construction and materials. Philadelphia, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

**nbr 5628:** componentes construtivos estruturais, determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

**nbr 7190:** projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

**nbr 14432:** exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Rio de Janeiro, 2000.

CALDAS, R. B. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio.** 2008. 226p.

Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

CARRASCO, E. M. **determinação de parâmetros**

**experimentais para estruturas de madeira em situação de incêndio:** taxa de carbonização da madeira para uso estrutural. Belo Horizonte: Fapemig, 2009. (TEC, Relatório Técnico Final).

DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA. **software AbAQuS/cAe:** versão 6.7. Rising Sun Mills, 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **en**

**1991-1-2:** Eurocode 1, actions on structures, Part 1.2: general actions, actions on structures exposed to fire. Brussels, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **en**

**1995-1-2:** Eurocode 5: Design of timber structures, Part 1.2: General rules, structural fire design. Brussels, 2005.

PINTO, E. M. **determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal à grã para o eucalyptus citriodora e eucalyptus grandis.** 2005. 1134p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SCHAFFER, E. L. **charring rate of selected woods-transverse to grain.** Madison: U. S. Department of Agriculture, 1967. (Forest Products Laboratory, 69).

SCHAFFER, E. L. **structural fire design:** wood. Madison: U. S. Department of Agriculture, 1984. (Forest Products Laboratory, 450).

WHITE, R. Fire performance of hardwood species. In: IUFRO WORLD CONGRESS, 21., 2000, Kuala Lumpur. **Proceedings...** Kuala Lumpur: IUFRO, 2000. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2000/white00c.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2010.

WHITE, R. H.; DIETENBERGER, M. A. Fire safety. In: ROBINSON, J. L.; RECORDS, J. L. **Wood handbook:** wood as an engineering material. Madison: U. S. Department of Agriculture, 1980. p. 17.1-17.13. (Forest Products Laboratory, 113).