

ABSORÇÃO DE SUPERFÍCIE DE PAINÉIS COMPENSADOS

Vânia Aparecida de Sá¹, José Benedito Guimarães Júnior¹, Lina Bufalino¹, Allan Motta Couto²,
Lourival Marin Mendes³, Rosimeire Cavalcante dos Santos¹

RESUMO: Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito de diferentes temperaturas de prensagem sobre a absorção de superfície em painéis compensados de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. Foram confeccionados 8 painéis compensados de uso interior de 5 lâminas, colados pelo adesivo ureia-formaldeído, com gramatura de 320 g/cm², prensados a 12 kgf/cm² de pressão específica, com temperaturas crescentes de 130°C, 148°C, 166°C e 184°C, durante 10 minutos. Os tratamentos foram arranjados num esquema fatorial 2 x 4, sendo 2 espécies e 4 temperaturas de prensagem. As densidades aparentes dos painéis foram obtidas de acordo com os procedimentos descritos na Norma ABNT 31:000.05-001/2. O teste de absorção de superfície foi realizado em corpos-de-prova cortados nas direções paralela e perpendicular às fibras, em escala reduzida, utilizando um aparato específico adaptado da Norma EN 382-1 (1993) para particulados. Os compensados de *Eucalyptus* sp. apresentaram maior valor médio para densidade aparente. As distâncias percorridas pela gota de tolueno nos compensados submetidos aos ensaios nos sentido paralelo e perpendicular sofreram influências significativas dos fatores espécie e temperatura, porém, não houve interação destes. Os painéis de *Pinus* sp. apresentaram maior potencial de absorção. No geral, o aumento da temperatura de prensagem reduziu a capacidade de absorção superficial dos painéis.

Palavras-chave: Compensados de uso interior, gradiente de temperatura, densidade aparente.

SURFACE ABSORPTION OF PLYWOOD PANELS

ABSTRACT: This work aimed to evaluate the effect of different pressing temperatures on surface absorption of *Pinus* sp. and *Eucalyptus* sp. plywood panels. It was produced 8 interior use plywood panels containing 5 veneers, glued together by urea-formaldehyde adhesive at 320 g/cm², pressed at 12 Kg/cm², with increasing temperatures of 130°C, 148°C, 166°C and 184°C, during 10 minutes. The treatments were arranged in a factorial scheme 2x4, being 2 species and 4 pressing temperatures. The apparent densities of the panels were obtained according to procedures described by ABNT 31:000.05-001/2 standard. The surface absorption test was made in specimen cut both in parallel and perpendicular positions in relation to the fibers, in reduced scale, using an specific apparatus adapted from EN 382-1 (1993) standard for particleboards. The *Eucalyptus* sp. plywoods presented higher mean value for basic density. The distances achieved by the toluene drop in the plywoods submitted to parallel and perpendicular tests was influenced significantly by species and temperature factors, although the same ones did not present interaction. The *Pinus* sp panels presented higher absorption potential. In a general way, the increase of the pressing temperature reduced the capacity of panels' surface absorption.

Key words: Interior use plywood, temperature gradient, apparent density.

1 INTRODUÇÃO

Os painéis compensados são fabricados a partir da colagem de lâminas de madeira em número ímpar de camadas, com a direção da grã perpendicular entre as camadas adjacentes (IWAKIRI, 2005). Quanto à sua utilização, esses produtos podem ser empregados na construção civil, na construção naval e na indústria moveleira, dentre outras.

Com relação ao processo de produção de compensados, as interações entre as variáveis dos mesmos são muito abrangentes. As características inerentes à madeira e ao topo, quantidade e composição do adesivo, assim como os procedimentos empregados na colagem de lâminas, são de importância fundamental na qualidade dos painéis (BALDWIN, 1985; SELLERS, 1985). Eles são classificados como de uso exterior, sendo empregados, normalmente, na construção civil,

¹Engenheiro Florestal, Doutorando em Ciência e Tecnologia da Madeira – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – vania_desa@yahoo.com.br, jbguimaraesjr@hotmail.com, linabufalino@yahoo.com.br, meire_caico@yahoo.com.br

²Engenheiro Florestal, Mestrando em Ciência e Tecnologia da Madeira – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – allan_floresta@yahoo.com.br

³Engenheiro Florestal, Professor Dr. em Ciência e Tecnologia da Madeira – Departamento de Ciências Florestais/DCF – Universidade Federal de Lavras/UFLA – Cx. P. 3037 – 37200-000 – Lavras, MG – lourival@dcf.ufla.br

e como de uso interior, utilizados, principalmente, na indústria moveleira. O tipo de adesivo mais empregado na confecção dos compensados de uso interior é a ureia-formaldeído, que apresenta baixa resistência a água e menor custo, se comparado aos adesivos fenólicos e resorcínicos.

A definição de temperatura de prensagem está relacionada com os seguintes fatores: taxa de transferência de calor através da madeira, condução de calor no vapor formado na linha de cola úmida e umidade das lâminas e também com o tipo de adesivo (IWAKIRI, 2005). Para a cura do adesivo ureia-formaldeído, a temperatura ideal está na faixa de 150° a 200°C (PIZZI, 1994).

Tratando-se de painéis compensados de uso interior, a utilização de produtos de revestimento é frequente, antes de seu uso final. Para que a aplicação de pintura e vernizes diretamente na superfície de painéis de madeira seja de boa qualidade é necessário que as superfícies sejam lisas e pouco absorventes, pois quanto maior a capacidade de absorção do material, maior a quantidade e custo com o produto de acabamento, além de baixa qualidade do revestimento final.

Uma possibilidade para verificar o desempenho a aplicação de produtos de acabamento em painéis compensados é pela verificação da capacidade de absorção de superfície. Este ensaio consiste em adicionar uma gota da substância química tolueno sobre a amostra de painel e, posteriormente, medir a distância de escorrimento percorrida. Quanto menor a distância percorrida pela gota, menor o valor da propriedade absorção de superfície e, portanto, maior a sua capacidade de absorção.

Neste contexto, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a propriedade de absorção de superfície em painéis compensados de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp., em quatro diferentes temperaturas de processamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foram utilizadas lâminas de madeiras de *Eucalyptus* sp. (7 anos) e *Pinus* sp. (18 anos), procedentes, respectivamente, da Companhia Mineira de Metais, localizada no município de Vazante, MG, e de um plantio experimental do Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, MG.

A densidade básicas determinada para as madeiras

de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. foi de 0,560 g/cm³ e de 0,360 g/cm³, respectivamente.

Para a confecção dos compensados, foram utilizadas 5 lâminas cruzadas, secas em estufa até teor de umidade de 7%, base massa seca, com dimensões de 480,0 x 480,0 x 2,0 mm. O adesivo empregado foi a ureia-formaldeído. Os painéis foram produzidos com gramatura da linha de cola de 320 g/m² (linha dupla), pressão específica de 12 kgf/cm² e temperaturas variáveis crescentes de 130°, 148°, 166° e 184 °C, durante 10 minutos. Em seguida, retiraram-se os corpos-de-prova com dimensões nominais de 25,0 x 5,0 cm de comprimento e largura, respectivamente. Posteriormente, os mesmos foram acondicionados em câmara climática, à temperatura de 20±1°C e umidade relativa de 65±3%, até atingir o teor de umidade de equilíbrio.

O teste de absorção de superfície foi realizado em corpos-de-prova cortados em duas direções, paralela e perpendicular às fibras, em escala reduzida, utilizando um aparato específico adaptado da Norma EN 382-1 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 1993) para particulados. De acordo com trabalhos prévios realizados em laboratório com painéis particulados, a angulação de posicionamento do corpo-de-prova de 80° e a distância de queda da gota de 6 cm proporcionam menor coeficiente de variação estatístico para adaptação do teste de absorção de superfície, sendo, portanto, selecionados para o presente trabalho. O reagente utilizado para a determinação do escorrimento da gota foi o tolueno, adicionado numa bureta para controle do teste (Figura 1).

Antes da realização do teste de absorção de superfície, determinou-se a densidade aparente dos painéis, de acordo com os procedimentos descritos na norma ABNT (2001).

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, arranjado num esquema fatorial 2x4, cujos fatores foram a espécie de madeira e a temperatura de prensagem dos painéis (Tabela 1). Para cada tratamento (painel), foram produzidos 6 corpos-de-prova (repetição), totalizando 48 amostras para cada teste.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade.

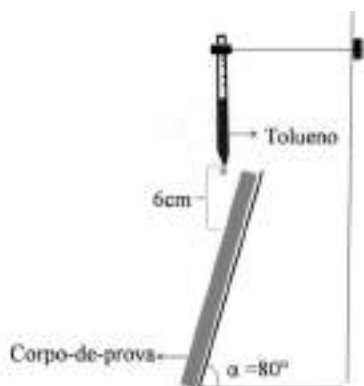


Figura 1 – Esquema do teste de absorção de superfície (vista lateral).

Figure 1 – Scheme of surface absorption test (lateral view).

Tabela 1 – Descrição dos tratamentos adotados na manufatura dos painéis compensados.

Table 1 – Description of treatments used for manufacturing of the plywood panels.

Tratamento	Madeira	Temperatura, °C
T1 - P ₁₃₀	<i>Pinus</i> sp.	130
T2 - P ₁₄₈	<i>Pinus</i> sp.	148
T3 - P ₁₆₆	<i>Pinus</i> sp.	166
T4 - P ₁₈₄	<i>Pinus</i> sp.	184
T5 - E ₁₃₀	<i>Eucalyptus</i> sp.	130
T6 - E ₁₄₈	<i>Eucalyptus</i> sp.	148
T7 - E ₁₆₆	<i>Eucalyptus</i> sp.	166
T8 - E ₁₈₄	<i>Eucalyptus</i> sp.	184

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No gráfico da Figura 2 é possível observar os valores médios de densidade aparente dos compensados.

Para o teste de densidade aparente, os compensados confeccionados a partir da madeira de *Eucalyptus* sp. foram estatisticamente superiores aos de *Pinus* sp., os quais apresentaram valores médios de 0,701 g/cm³ e 0,538 g/cm³, respectivamente. Segundo Kollmann, Kuenzi e Stamm (1975), a densidade aparente do compensado depende da espécie da madeira, da umidade das lâminas, da temperatura e da pressão de prensagem utilizada na manufatura e é cerca de 5% maior do que a da madeira que o originou, quando não são aplicadas pressões elevadas.

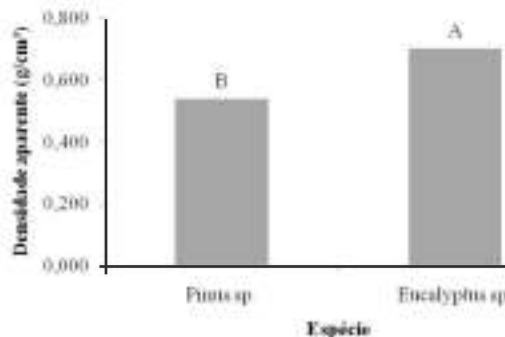


Figura 2 – Densidade aparente dos compensados, de acordo com a espécie de madeira utilizada.

Figure 2 – Apparent density of plywood panels according to wood species used.

Para os testes de absorção de superfície nas direções paralela e perpendicular às fibras, não houve interação significativa entre os fatores, pela análise de variância, a 95% de probabilidade.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios da distância percorrida pela gota de tolueno nas superfícies dos compensados nas direções paralela e perpendicular às fibras. Verifica-se que os fatores, isoladamente, influenciaram significativamente as propriedades avaliadas.

Para o fator madeira, observa-se, pelos ensaios de absorção nos sentidos paralelo e perpendicular às fibras, que o *Eucalyptus* sp. apresentou a maior distância média percorrida pela gota. Possivelmente, isso ocorreu devido à maior densidade dos painéis compensados de *Eucalyptus* sp. (0,701 g/cm³) em relação aos de *Pinus* sp. (0,538 g/cm³) que, conseqüentemente, promoveu menor potencial de absorção, em função da sua menor porosidade. Portanto, nos compensados de *Pinus* sp., por apresentarem superfícies mais absorventes, a quantidade de produto de acabamento a ser aplicado supostamente seria superior.

Para o fator temperatura, a prensagem dos painéis a 130°C forneceu a menor distância média percorrida nos dois ensaios, tendo, no sentido paralelo às fibras esta diferido estatisticamente somente da temperatura de 166°C. Já no ensaio no sentido perpendicular às fibras, as distâncias médias percorrida à temperatura de prensagem de 166° e 184°C foram superiores estatisticamente aos dos compensados prensados a temperatura de 130°C.

Tabela 2 – Distância média percorrida pela gota de tolueno em painéis compensados, para cada fator.*Table 2* – Average distance spreaded by toluene drop in the plywood panels for each factor.

Fatores	Distância percorrida (mm)	
	Paralelo	Perpendicular
Madeira	72,2*	37,3*
<i>Pinus</i> sp.	29,3 B	20,2 B
<i>Eucalyptus</i> sp.	39,9 A	27,1 A
Temperatura (°C)	3,4*	4,1*
130	31,2 B	20,5 B
148	35,7 AB	23,4 AB
166	35,9 A	24,8 A
184	35,7 AB	25,7 A
Madeira x temperatura	2,3 ^{ns}	0,7 ^{ns}
Média geral	34,6	23,6
CV (%)	12,42	16,60

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo Teste de Tukey, a 5% de significância.

e*: valor calculado de F significativo, a 5% de significância; e^{ns}: valor calculado de F não significativo, a 5% de significância.

Considerando-se todos os tratamentos, a distância média percorrida pela gota foi de 34,6 mm. Este valor, encontrado para painéis compensados, é consideravelmente menor aos valores de absorção de superfície encontrados por Akbulut e Ayrimis (2006) para painéis MDF, tendo 255,778 e 317,95 mm, foi a distância percorrida pela gota em painéis com maior e menor teor de madeira de compressão, respectivamente. É importante ressaltar, ainda, que os autores utilizaram o ângulo de posicionamento dos corpos de prova, o tamanho dos corpos-de-prova e a quantidade da gota de tolueno propostos pela norma EN 328-1 9 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 1993), sendo estes de 60±5°, 400 x 100 mm e 1 g, respectivamente. No entanto, os coeficientes de variação determinados por eles, por tratamento, foram de 39,07% e 49,08%, enquanto, neste trabalho, a adaptação da norma possibilitou obter um coeficiente de variação de 12,42%.

As correlações entre a temperatura de prensagem e a distância percorrida pela gota de tolueno dos

compensados de *Pinus* sp. e de *Eucalyptus* sp. são apresentadas na Figura 3.

As distâncias percorridas pela gota nos painéis de *Pinus* sp. responderam de forma crescente e linear às temperaturas de prensagem, nos ensaios paralelo ($R^2 = 0,98$) e perpendicular ($R^2 = 0,94$) às fibras. Esse comportamento indica que, possivelmente, o aumento da temperatura de prensagem provocou um entupimento dos poros, provocando uma redução da capacidade de absorção superficial.

Os compensados de *Eucalyptus* sp. no ensaio paralelo apresentaram comportamento quadrático ($R^2 = 0,72$), no qual a distância percorrida aumentou até a temperatura de 148°C e, em seguida, apresentou redução a partir desta. Já no ensaio perpendicular às fibras, os painéis apresentaram comportamento linear crescente ($R^2 = 0,92$), no qual as distâncias percorridas aumentaram com o aumento da temperatura de prensagem.

De forma geral, pelos resultados obtidos neste trabalho, é possível inferir que o aumento da temperatura de prensagem dos painéis aglomerados pode facilitar a aplicação de produtos de acabamento.

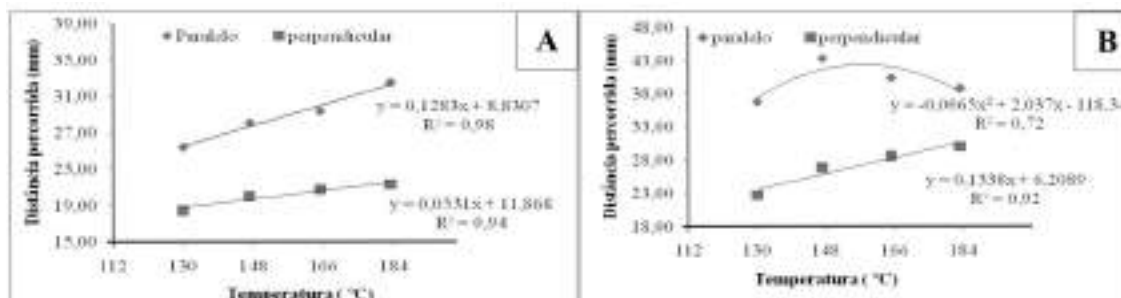


Figura 3 – Distâncias percorridas pela gota de tolueno em compensados, em função das temperaturas de prensagem: A) Correlação entre as diferentes temperaturas de prensagem e distância percorrida do tolueno em compensados de *Pinus* sp. nas direções paralela e perpendicular às fibras; B) Correlação entre as diferentes temperaturas de prensagem e distância percorrida do tolueno em compensados de *Eucalyptus* sp. nas direções paralela e perpendicular às fibras.

Figure 3 – Distances spread by toluene drop in the plywood in relation to pressing temperatures: A) Correlation between the different pressing temperatures and distance spread by toluene drop in *Pinus* sp. plywood panels in both parallel and perpendicular to fibers directions; B) Correlation between the different pressing temperatures and distance spread by toluene drop in *Eucalyptus* sp. plywood panels in both parallel and perpendicular to fibers directions

4 CONCLUSÕES

Os painéis de *Pinus* sp. apresentaram menor densidade aparente e maior potencial de absorção superficial em relação aos painéis de *Eucalyptus* sp.

A temperatura de prensagem a 130°C forneceu as maiores distâncias percorridas pelas gotas de tolueno nos dois ensaios.

No geral, o aumento da temperatura de prensagem provocou a diminuição da absorção de superfície dos painéis, tanto no sentido paralelo quanto no perpendicular às fibras.

5 RECOMENDAÇÕES

O teste de absorção de superfície mostrou-se rápido e de fácil aplicação. No entanto, recomendam-se estudos futuros para comprovar sua real potencialidade de prever o comportamento de produtos de acabamentos em painéis compensados. Uma possibilidade seria realizar os testes de espessura e adesividade de produtos de acabamento.

6 REFERÊNCIAS

AKBULUT, T.; AYRILMIS, N. Effect of compression wood on surface roughness and surface absorption of medium

density fiberboard. *Silva Fennica*, Helsinki, v. 40, n. 1, p. 161-167, Nov. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT CB-31**: projeto de normas 31.000.05.001/1: chapas de madeira compensada. Rio de Janeiro, 2001.

BALDWIN, R. F. **Plywood manufacturing practices**. San Francisco: Miller Freeman, 1995. 388p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 382-1**: fiberboards – determination of surface absorption, part 1- test methods for dry process fiberboard. Brussels, 1993.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstruída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247p.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of wood science and technology, vol II: Wood based materials**. New York: Berlin-Heidelberg, 1975, 703p.

PIZZI, A. Urea-formaldehyde adhesives. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, 1994. p. 393-403.

SELLERS, T. **Plywood and adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, 1985. 661p.

ANÁLISE NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM MADEIRAS BRASILEIRAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco¹, Rodrigo Barreto Caldas²,
Ana Lúcia Crespo Oliveira³, Ricardo Hallal Fakury⁴

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.

NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER IN BRAZILIANS WOODEN SPECIES EXPOSED TO FIRE

ABSTRACT: From experimental results of the temperature increase in Brazilians 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 Brazilians 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

¹Engenheiro 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

²Engenheiro 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

³Engenheira 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

⁴Engenheiro 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

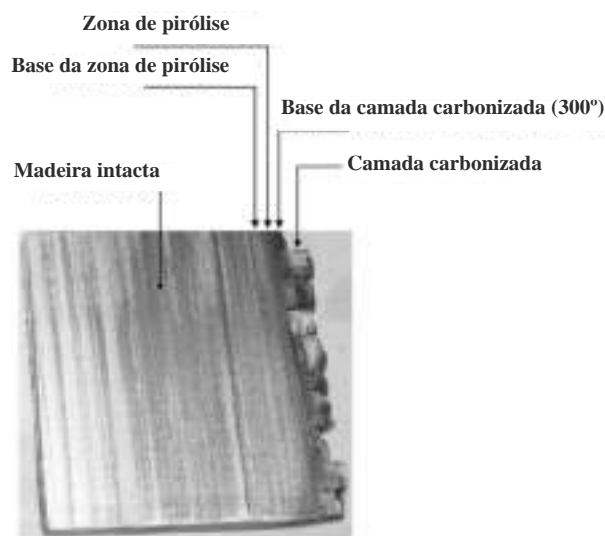


Figura 1 – Carbonização da madeira (15 minutos de exposição ao incêndio padrão).

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 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).

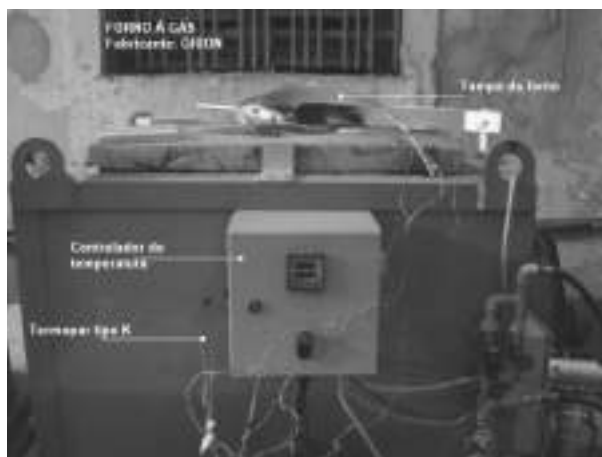


Figura 2 – Forno e seus componentes.

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/m³, para a densidade aparente média.

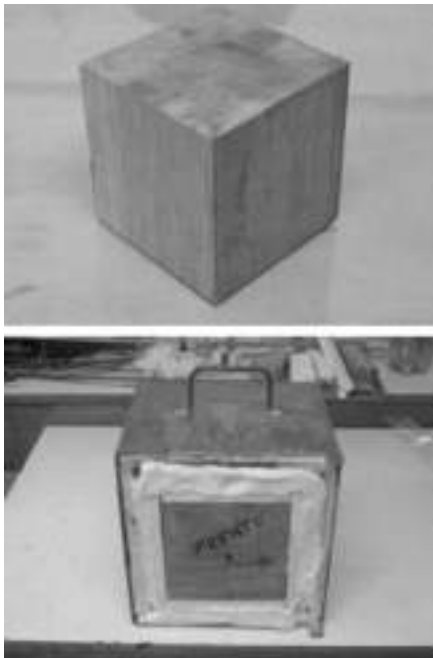


Figura 3 – Corpo-de-prova.

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; λ_x , λ_y e λ_z são as condutividades térmicas nas direções x, y e z, respectivamente; c é o calor específico; ρ 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 Ω deve satisfazer a certas condições de contorno, que podem ser: temperaturas prescritas numa parte Γ_θ do contorno; fluxo de calor prescrito φ_p numa outra parte Γ_{φ_p} ; transmissão de calor por convecção entre uma parte Γ_{φ_c} , à temperatura θ , e os gases à temperatura θ_g , dado por

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

em que α_c é o coeficiente de transmissão de calor por convecção; transmissão de calor por radiação no contorno Γ_r à temperatura θ , dado por

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

em que ε_{res} é a emissividade resultante da superfície e β 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.

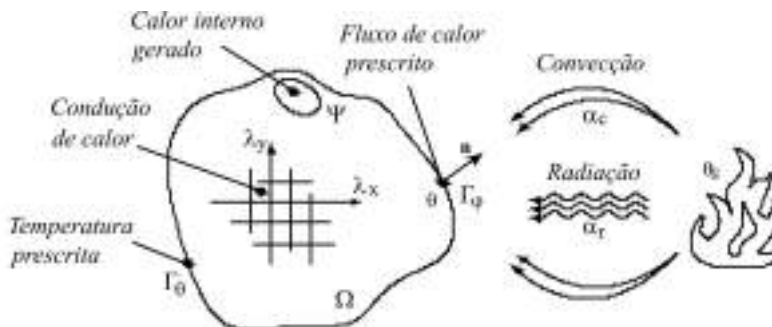


Figura 4 – Condições de contorno em problemas de condução de calor (CALDAS, 2008).

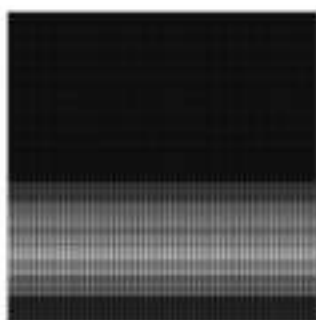
Figure 4 – Boundary conditions in heat conduction problems (CALDAS, 2008).

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.

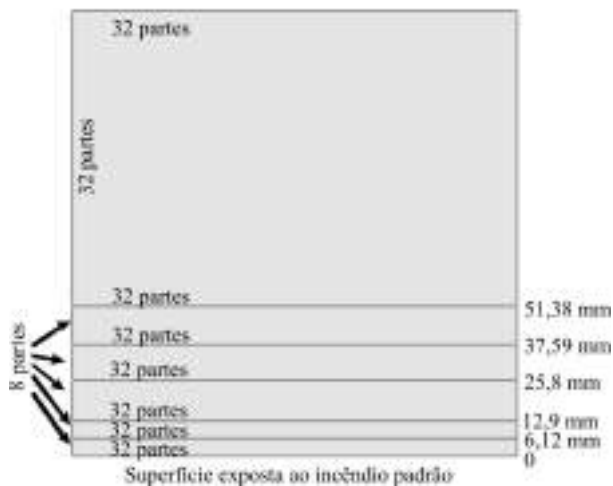


Figura 6 – Discretização do modelo e profundidades nas quais as temperaturas foram medidas.

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

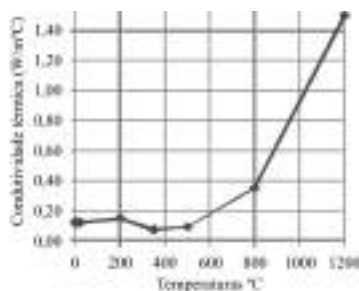


Figura 7 – Dados e gráfico da condutividade térmica, em função da temperatura, utilizados na análise numérica.

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	121
2000	200
1620	250
710	300
850	350
1000	400
1400	800
1650	800
1600	1200

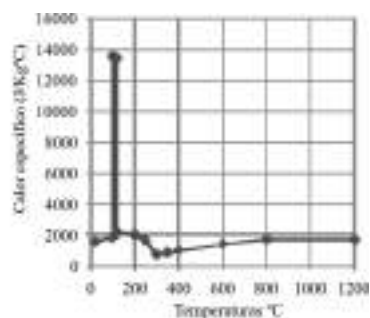


Figura 8 – Dados e gráfico de calor específico, em função da temperatura, utilizados na análise numérica.

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

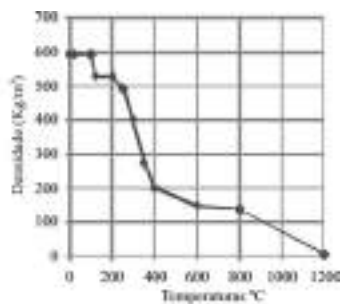


Figura 9 – Dados e gráfico da variação da densidade, em função da temperatura, utilizados na análise numérica.

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

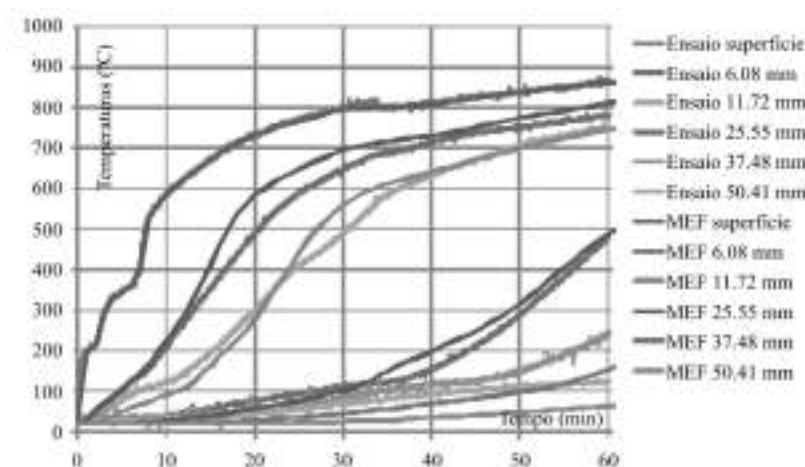


Figura 10 – Temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente para o modelo com temperatura prescrita.

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.

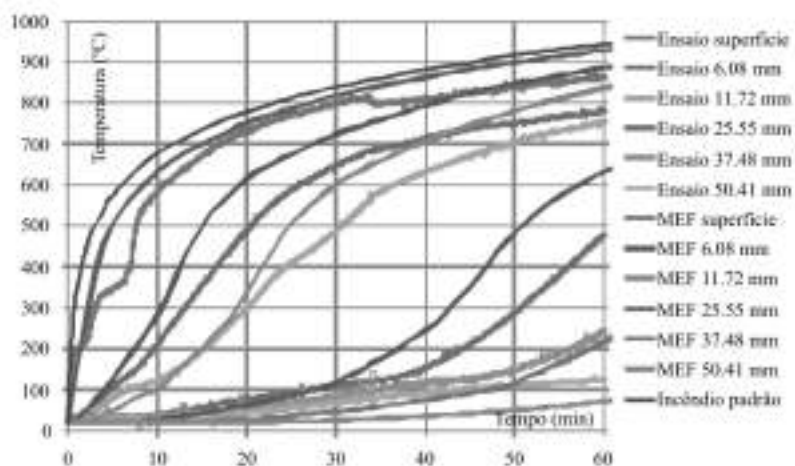


Figura 12 – Temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente para o modelo com fluxos por convecção e radiação.

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).