



# ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL SOBRE A DEGRADAÇÃO TÉRMICA E OS GRADIENTES TÉRMICOS DA MADEIRA DE *Eucalyptus* DE USO ESTRUTURAL EXPOSTA AO FOGO

**Edna Moura Pinto  
Carlito Calil Junior**

Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC-USP

## Resumo

A redução da capacidade resistente na madeira exposta ao fogo ocorre essencialmente em função da diminuição gradual da seção resistente, substituída pelo carvão e pela redução das propriedades mecânicas de resistência e rigidez. As dimensões dos elementos estruturais de madeira e a baixa condutividade térmica do carvão resultam em um processo lento de degradação. Deste modo, a madeira, mesmo sem a proteção de produtos ignífugos, previne que as camadas mais internas sejam expostas às elevadas temperaturas externas. Este trabalho apresenta um estudo teórico e experimental sobre o processo de degradação térmica em vigas estruturais de madeira. Os resultados permitiram concluir que a massividade dos elementos estruturais de madeira contribuem para a proteção das camadas mais internas da seção por meio de seu aquecimento mais lento.

*Palavras-chave:* segurança contra incêndio, madeira, incêndio, gradiente térmico.

## Introdução

Uma estrutura é considerada segura contra incêndio quando apresenta grande probabilidade de resistir aos esforços resistentes às elevadas temperaturas. Em temperatura ambiente, as principais ações que causam esforços nas estruturas são as originadas pela ação gravitacional e eólica, (Vargas & Silva, 2003). Quando em temperaturas elevadas, novos esforços são gerados pela ação térmica, que promove a elevação da temperatura nos elementos estruturais, resultando na redução da capacidade resistente e propiciando eventualmente o surgimento de esforços adicionais.

Na madeira, a redução da capacidade resistente se deve principalmente a: 1) diminuição gradual da seção resistente, substituída pelo carvão, e 2) redução das propriedades mecânicas de resistência e rigidez.

Em nosso país, constata-se a inexistência de informações a respeito do comportamento das diferentes espécies de madeira sob a ação de incêndio. A insegurança diante de potenciais riscos relacionados à combustibilidade da madeira é considerada um dos pontos críticos para as restrições na aprovação de financiamento de habitações em madeira no Brasil e em outros países, fruto do

desconhecimento do comportamento das diferentes espécies perante o fogo.

Neste trabalho é apresentado breve estudo sobre o comportamento da madeira exposta a condições padronizadas de elevação de temperaturas, permitindo avaliar o efeito da massividade na elevação interna da temperatura de vigas estruturais de madeira.

## Revisão de Literatura

A madeira é um combustível sólido. Como tal, passa por processo de degradação térmica quando submetida à elevação da temperatura. Neste processo, diferentes resíduos são produzidos, entre eles: compostos químicos voláteis, gases, vapor d'água, fumaça, cinzas e carvão.

Combustíveis sólidos, como a madeira, são fontes compactas de armazenamento de energia, que passam por processo de gaseificação que responde por alimentar as reações de combustão. Este processo ocorre em etapas e sua compreensão auxilia no estudo do comportamento da carbonização da madeira para uso estrutural, permitindo, assim, a tomada de decisões para seu emprego racionalizado e seguro.

### A degradação térmica da madeira

A degradação térmica da madeira, bem como de outros materiais celulósicos, ocorre em etapas. As fases de degradação térmica da madeira são expressas por alguns autores por meio de faixas de temperaturas (Timber Engineering, Steep 1, s/d; Browne, 1958; Wiley & Sons, 1998; Jankowsky, 1986; Rowell, 1991; Williams, 1974; IPT, 1986; Juneja, 1975), ocorrendo por vezes diferenças entre os valores de algumas faixas. No entanto, as variações são mínimas e os processos envolvidos não apresentam variações significativas.

#### Até 200°C, zona A

Ao ser aquecida, a madeira libera inicialmente vapor de água e gases (Figura 1), perdendo massa de modo uniforme caso o aquecimento seja lento, processo denominado pirólise lenta (Figura 2). A temperaturas acima de 95°C a madeira carboniza. A madeira nessa zona normalmente não igniza.

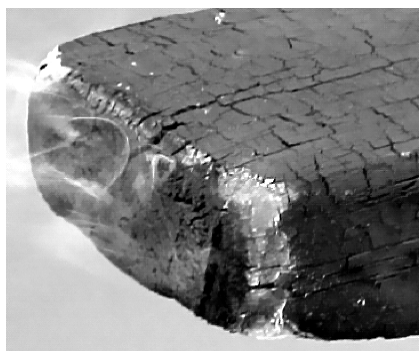


Figura 1 Liberação de vapores e gases, pirólise.

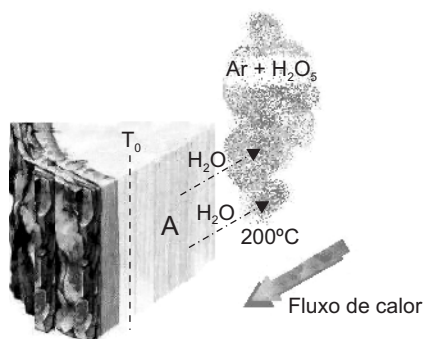


Figura 2 Reações de combustão, zona A, pirólise lenta.

#### Faixa de 200°C a 280°C, zona B

Ainda que os gases rapidamente liberados não ignizem de imediato, uma condição exotérmica é atingida. A temperatura na qual as reações se tornam exotérmicas é considerada em muitas definições como o ponto de ignição da madeira. Ocorrem vários registros desta temperatura: 235°C a 240°C, 232°C a 260°C, 192°C a 220°C, e esta

variação se deve ao tempo e à temperatura envolvida na ignição a baixas temperaturas. Esta fase é conhecida como pirólise rápida (Figura 3).

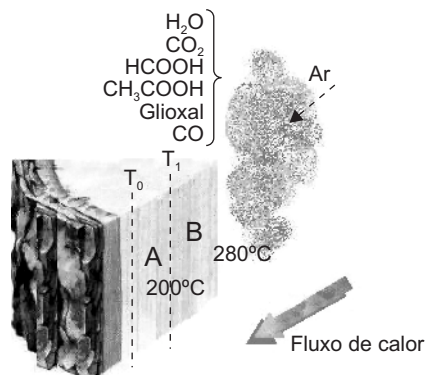


Figura 3 Reações de combustão, zona B, pirólise rápida.

#### Faixa de 280°C a 500°C, zona C

Nesta faixa de temperatura ocorre grande liberação de gases ricos em CO<sub>2</sub> e vapor d'água suficientes para manter a chama (Figura 4). Rapidamente estes gases se tornam combustíveis como resultado da pirólise secundária (Figura 5). A combustão flamejante de fase gasosa é exterior à madeira. Nessa faixa de temperatura (280°C a 500°C) ocorre grande liberação de gases ricos em CO<sub>2</sub> e vapor d'água suficientes para manter a chama (Figura 4). Rapidamente esses gases se tornam combustíveis, como resultado de pirólise secundária (Figura 5). Ao serem liberados e misturados ao oxigênio do ar em proporções adequadas podem ignizar, se forem expostos a uma chama piloto. A quantidade de oxigênio nessa fase é reduzida, dificultando a queima completa do carvão e gerando maior quantidade desse produto, cujo acúmulo retarda a penetração do calor e adia a chegada do ponto exotérmico para as camadas internas da madeira, A e B.

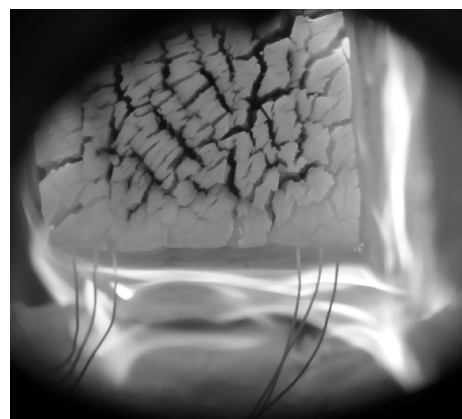
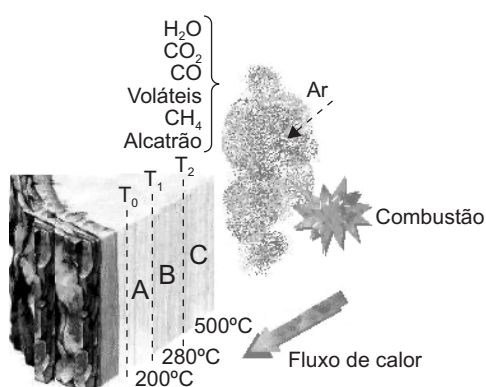


Figura 4 Combustão flamejante.

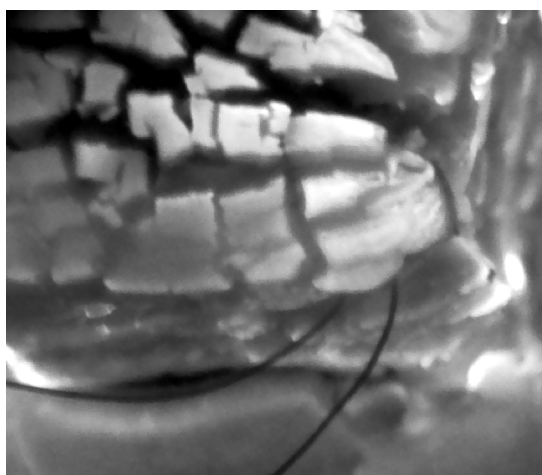


**Figura 5** Reações de combustão, zona C, combustão flamejante.

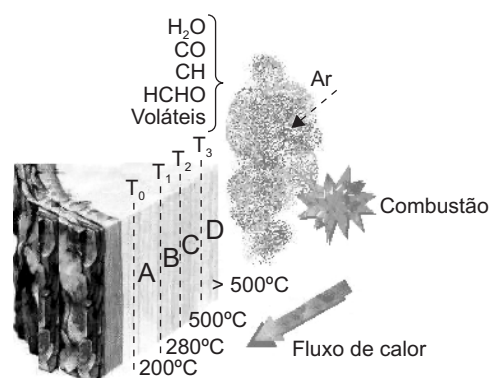
Além da formação de monóxido de carbono, metano, metanol, formaldeído, ácido fórmico e acético e hidrogênio, são também liberados alcatrões altamente inflamáveis, conduzidos para fora do corpo sólido pelos gases e vapores, formando uma suspensão de gotículas chamada fumaça. A perda de massa é da ordem de 70% em relação à massa original.

#### Faixa acima de 500°C, zona D

A 500°C o carvão incandesce (Figura 6) e se consome. No interior da madeira permanecem as zonas de temperatura A, B e C. Quando a temperatura da superfície atinge aproximadamente 1000°C, o carbono é rapidamente consumido na superfície e as regiões de degradação penetram na madeira. As chamas desaparecem dando lugar à queima luminosa do monóxido de carbono e hidrogênio, combustão incandescente. Enfim, o carvão remanescente brilha com pouca ou nenhuma chama (Figura 7).



**Figura 6** Combustão incandescente.



**Figura 7** Reações de combustão, zona D, acima de 500°C.

Os gases emitidos pela pirólise da madeira são prontamente diluídos a compostos não inflamáveis. Resultados de ensaios envolvendo a madeira norte-americana Birch (*Betula spp.*) submetida a pirólise por 8 horas em pressão atmosférica indicou que, para os 0,028 m<sup>3</sup> de madeira seca, resultaram 64,4% de vapor d'água, 22,9% de gases inflamáveis e 12,7% de dióxido de carbono (Browne, 1958). Uma mistura nestas proporções não conduz à inflamabilidade; o que efetivamente contribui para a formação de chamas é a presença de alcatrões. Há, portanto, estreita relação entre a formação de chamas e a produção de alcatrões.

#### Diminuição Gradual da Seção Resistente

No que concerne ao estudo da madeira como material estrutural, a formação do carvão representa importante parâmetro de estudo, em face da perda de resistência do elemento estrutural por meio da redução do módulo de seção.

A madeira sã é degradada pela ação da temperatura, resultando em carvão formado sob condições limitadas de fornecimento de oxigênio. Este, por sua vez, não possui capacidade de suportar carregamento.

O carvão representa 1/6 da condutividade térmica da madeira. Sua constituição é de aproximadamente 20% a 25% de material volátil, 70% a 75% de carbono fixo e 5% de cinzas (Truax, 1959).

A razão em que a madeira se converte em carvão, em função do tempo e da temperatura, é portanto um valor dimensional importante para a avaliação da estabilidade de elementos estruturais de madeira durante a ocorrência de incêndio e o mais importante fator a ser considerado na avaliação da capacidade resistente de um elemento estrutural exposto à condição de incêndio.

Estudos conduzidos por Truax (1959) permitiram estimar a temperatura referente à base da camada carbonizada, denominada temperatura de carbonização da madeira. Utilizando MLC da conífera Douglas-fir com 19,5 cm de

espessura exposta à curva de aquecimento proposta pela ASTM E-119, Truax concluiu que a temperatura base da camada carbonizada se localiza no intervalo entre 615°F e 550°F ou 288°C; por simplificação é utilizado o valor de 290°C.

A princípio, quanto mais rapidamente uma madeira atinge esta temperatura, mais rápida será a taxa de formação de carvão e mais rápido ela se degrada. No entanto, em razão da baixa taxa de carbonização, os elementos estruturais de madeira mantêm considerável parcela de sua capacidade de carregamento, apresentando satisfatória resistência à exposição ao fogo.

Estudos sobre a taxa de carbonização da madeira, tanto folhosa como conífera, exposta a curvas de aquecimento padronizadas, vêm sendo realizados por pesquisadores de diferentes países, como Estados Unidos: Schaffer (1967), White (1988); Suécia: König (1999); Austrália: Gardner (1991); Nova Zelândia; e Malásia.

Para a madeira serrada e MLC de uso estrutural, o valor de taxa de carbonização geralmente usado nos EUA e Canadá é de 0,635 mm/minuto. A taxa de 0,60 mm/minuto foi utilizada como base no desenvolvimento dos atuais procedimentos de cálculo para elementos estruturais de madeira (Lie, 1977; TR10, 1983).

As normas Eurocode 5 (2002) e AS 1720.4 (1990) admitem uma taxa de carbonização que decresce linearmente com o tempo. O Eurocode fixa valores tabelados (ver Tabela 1) para as taxas em função da densidade da madeira, enquanto a Norma Australiana propõe a Equação 1 para o cálculo da taxa de carbonização:

$$\beta = 0,4 + \left( \frac{280}{\rho_{12}} \right)^2 \quad (1)$$

em que:

$\beta$  = taxa de carbonização (mm/min.);

$\rho_{12}$  = densidade aparente a 12% de umidade ( $\text{kg/m}^3$ ).

Schaffer (1967) e White (1988) relacionaram em seus estudos a temperatura característica à fase de transição da carbonização na madeira (288°C ou 550°F) como meio para definir a velocidade de avanço do carvão usando leituras de temperaturas fornecidas por termopares posicionados no interior da peça e adotando a superfície inicial exposta como referência.

O modelo empírico linear para a velocidade de carbonização da madeira desenvolvido por Schaffer é baseado em três espécies: white oak (*Quercus* spp.), douglas fir e southern pine (*Pinus* spp.), com teor de umidade de 15% (White, 1988; Equação 2):

$$t = mx_c \quad (2)$$

em que:

t = tempo em minutos;

$x_c$  = espessura da camada carbonizada a partir da superfície original;

m = taxa de carbonização.

sendo:

$$m = [(28,726 + 0,0578u) \rho + 4,187] + 0,079 \quad (2.1)$$

(douglas fir)

$$m = [(5,832 + 0,12u) \rho + 12,862] + 0,079 \quad (2.2)$$

(southern pine)

$$m = [(20,036 + 0,403u) \rho + 0,403] + 0,079 \quad (2.3)$$

(white oak)

em que:

u = teor de umidade (%);

$\rho$  = densidade ( $\text{kg/m}^3$ ).

**Tabela 1** Taxa de carbonização para cálculo de projetos de madeira,  $\beta_0$  e  $\beta_n$  (Eurocode 5, 2002).

Especificação	Material	$\beta_0$ (mm/min.)	$\beta_n$ (mm/min.)
coníferas	MLC, densidade of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
	Madeira serrada, densidade $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
folhosas	Madeira serrada ou MLC, densidade $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
	Madeira serrada ou MLC, densidade $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,5	0,55

$\beta_0$ : taxa de carbonização básica para exposição em uma dimensão;

$\beta_n$ : taxa de carbonização nominal, incluindo o efeito de arredondamento das quinas e aparecimento de frestas;

MLC: Madeira Laminada Colada.

Posteriormente, Robert White, fundamentado no estudo empírico, desenvolveu um modelo não-linear e unidimensional para a taxa de carbonização válido para peças de grandes dimensões, com base em oito espécies norte-americanas: Engelm spruce (*Picea engelmannii*); Western red cedar (*Thuja plicata*); Southern pine (*Pinus* sp.); Redwood (*Sequoia sempervirens*); Hard maple (*Acer* sp.); Yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*); Red oak (*Quercus* sp.) e Brasswood (*Tilia* sp.), quatro coníferas e quatro folhosas.

A análise de regressão das propriedades da madeira foi usada para obter o modelo de taxa de carbonização, originando as seguintes equações:

$$t = mx_c^a \quad (3)$$

ou:

$$t = mx_c^{1,23} \quad (3.1)$$

ou:

$$\ln t = \ln m + 1,23 \ln x_c \quad (3.2)$$

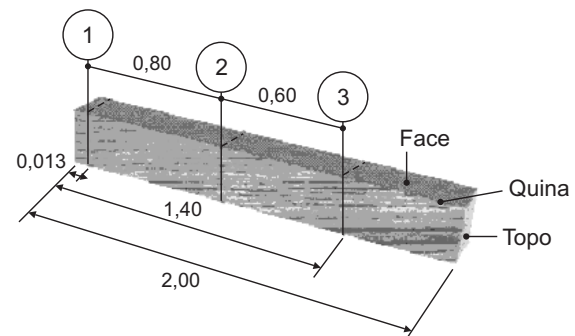
O parâmetro  $\ln m$  estimado por regressão da Equação 3.2 foi utilizado para relacionar as propriedades da madeira com a taxa de carbonização, e as seguintes variáveis foram incorporadas ao modelo, resultando na Equação 3.3:

$$\ln m = 1,3349\rho - 0,009887\rho d + 0,1176c - 0,00387cd + 0,01717u - 1,2521 \quad (3.3)$$

em que:

$\ln m$  = parâmetro a ser estimado;  
 $\rho$  = densidade aparente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  
 $d$  = permeabilidade (tratabilidade);  
 $c$  = espécies, conífera e folhosa;  
 $u$  = teor de umidade (%).

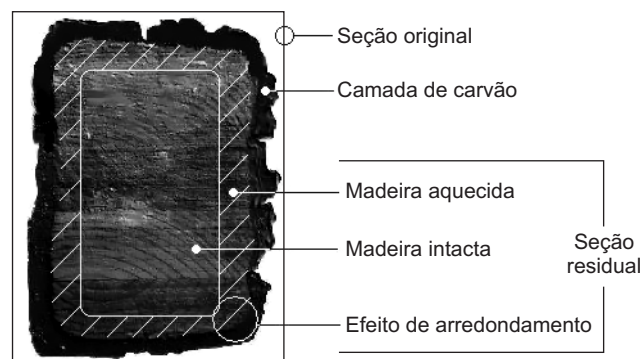
Em estudo realizado por Pinto (2005), utilizando a madeira oriunda do gênero *Eucalyptus grandis* e *citriodora*, foram determinadas taxas de carbonização em três posicionamentos em vigas estruturais (Figura 8). Deste modo, a taxa de carbonização do topo é  $\beta = 0,73 \text{ mm}/\text{min.}$ , na da quina,  $\beta = 0,71 \text{ mm}/\text{min.}$  e na face,  $\beta = 0,58 \text{ mm}/\text{min.}$



**Figura 8** Seções de implantação dos termopares, medidas em metros.

### Redução das Propriedades Mecânicas de Resistência e Rigidez

Abaixo da camada carbonizada encontra-se uma faixa de madeira que, embora não tenha sido exposta a temperaturas elevadas o bastante para promover a carbonização, é afetada pela temperatura por meio da redução das propriedades mecânicas resultante da degradação dos componentes químicos da madeira (Figura 9).



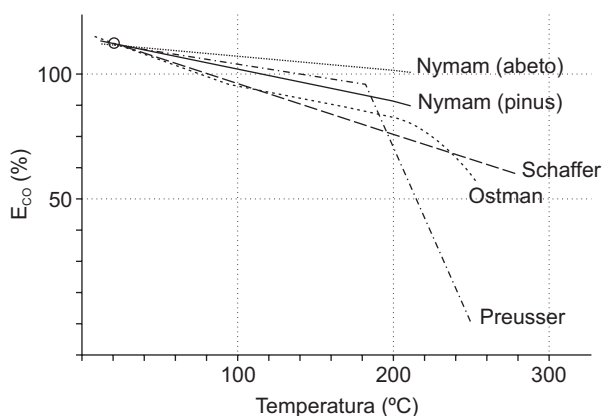
**Figura 9** Seção carbonizada de uma MLC, em exposição ao fogo por 30 minutos, taxa de carbonização de 0,6 mm/min.

A diminuição da resistência é estimada com base em modelos empíricos e teóricos (Buchanan, 1999), assumindo-se a seção remanescente como material homogêneo ou como um composto de camadas com diferentes propriedades, em função dos gradientes térmicos internos.

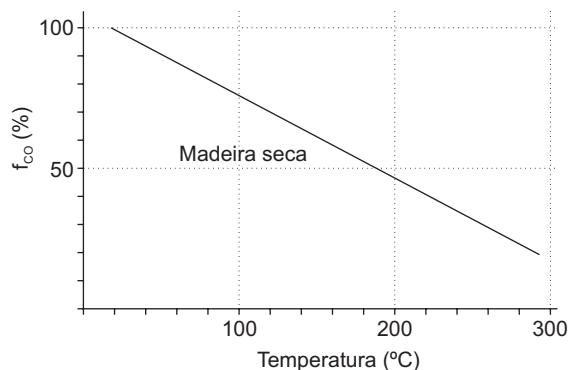
A redução da capacidade resistente foi constatada por Almeida & Sanches (1998) ao estudar a madeira de ipê, jatobá e pinus (3,00 cm × 3,00 cm × 9,00 cm), notando que a temperaturas superiores a 300°C a resistência da madeira sofre redução significativa devido à carbonização, precedida de considerável aumento da resistência à compressão no intervalo de temperatura de 100°C a 170°C.

Vital *et al.* (1983), estudando amostra de *E. saligna* com dimensões de 2,00 cm × 2,00 cm × 30,00 cm em combinação de diferentes temperaturas: 105°C, 130°C e 155°C, com diferentes tempos de aquecimento: 10 h, 20 h, 30 h, 40 h, 80 h e 160 h, observaram aumento das propriedades de resistência da madeira nos períodos iniciais de exposição. Contudo, a combinação do aumento da temperatura e do tempo de exposição ocasionou a redução da resistência a temperaturas superiores a 130°C, em que o efeito se mostrou linear, e a 155°C, em que o efeito se mostrou quadrático.

Buchanan (1999) apresenta uma combinação de resultados experimentais conduzidos por diversos autores sobre a redução de resistência e módulos de elasticidade da madeira com a elevação da temperatura. Esses ensaios de compressão paralela às fibras foram realizados na mesma faixa de temperatura utilizada por Almeida & Sanches (1998), mas em outras espécies de madeira, a saber: abeto (*Piceas abies*) e pinus (*Pinus spp.*) (Figuras 10 e 11).



**Figura 10** Efeito da temperatura no módulo de elasticidade da madeira, paralela a grã. *Fonte:* Buchanan (1998).



**Figura 11** Efeito da temperatura na resistência à compressão paralela a grã. *Fonte:* Buchanan (1998).

O módulo de elasticidade (Figura 10) mostra que, embora haja variações nos resultados experimentais, principalmente nos resultados de Preusser, fica evidente a perda linear de elasticidade que se acentua a partir dos 200°C. A resistência à compressão paralela a grã para a madeira seca mostra igualmente perda linear (Figura 11), e por volta dos 180°C a resistência é reduzida em 50%.

Bin *et al.* (2002), estudando peças fletidas de *Pinus radiata* expostas ao aquecimento padronizado e à elevação do teor de umidade, observaram que para temperaturas superiores a 60°C a redução do módulo de elasticidade é maior que em temperaturas inferiores.

Quando a temperatura da superfície da madeira está em torno de 970°C a 980°C, a temperatura interna na zona de carbonização é de 290°C, e a 6 mm de distância esta temperatura é igual ou inferior a 180°C (Wiley *et al.*, 1998).

Visando compensar a perda de resistência, a redução do módulo de elasticidade e o efeito do arredondamento dos cantos (Figura 9), algumas normas adotam taxas de carbonização com valores elevados para o cálculo de resistência, algumas superiores a 1,0 mm/min (Konig, 1999), enquanto os valores adotados pelo Eurocode 5 (2002) são 0,8 mm/min. para coníferas e 0,55 mm/min. para folhosas.

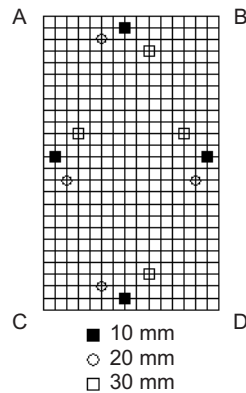
## Materiais e Métodos

Para a avaliação das temperaturas e do gradiente térmico no interior da madeira, seis peças estruturais de *Eucalyptus* (dimensões nominais: 0,16 m × 0,26 m × 2,00 m) (ver Tabela 3), foram expostas ao aquecimento segundo a curva proposta pela norma ASTM E 119 – “Standard test methods for fire tests of building construction and materials” (1995), em forno com sistema constituído por quatro queimadores a gás GLP, de baixa pressão e exaustão

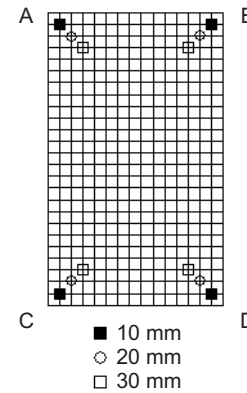
por dutos. O forno possui dimensões internas de 4,00 m × 3,07 m × 0,91 m e volume interno de 11,17 m<sup>3</sup>.

As vigas de madeira utilizadas foram aparelhadas, possibilitando o melhor esquadrihamento para a furação e colocação dos termopares. Em cada corpo de prova foram feitos trinta e seis orifícios com broca para madeira, Ø 2,7 mm e Ø 1,5 mm, para a introdução dos termopares do tipo K, com bainha de 1,5 m, a três diferentes profundidades: 10 mm, 20 mm e 30 mm.

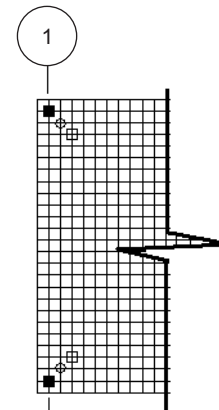
Os termopares foram instalados ao longo de 3 pontos da viga, seções 1, 2 e 3. Cada seção corresponde a 12 pontos de leitura distribuídos em 4 diferentes quadrantes (A, B, C e D) e a 3 diferentes profundidades, conforme ilustram as Figuras 12 a 14, totalizando 36 termopares por viga.



**Figura 12** Seção nominal da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seção 2.



**Figura 13** Seção da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seções 1 e 3.



**Figura 14** Seção longitudinal da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seção 1.

**Tabela 2** Caracterização dos corpos de prova da madeira de *Eucalyptus*.

Espécie		CP	$\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{bas}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{ap 12\%}$ (g/cm <sup>3</sup> )	u (%)
Anterior	citriodora	D3	0,97	0,81	0,96	19,3
		D1	1,08	0,83	1,05	30,6
		C2	1,07	0,86	1,05	27,5
	grandis	D1	0,94	0,65	0,83	35,7
		I	0,83	0,66	0,79	25,6
		E2	0,74	0,51	0,63	30,6

Deste modo, o monitoramento das leituras obtidas da seção 1 permite a avaliação da temperatura no topo das peças; o da seção 2 possibilita a avaliação da temperatura na face; e da seção 3 permite avaliar o efeito de arredondamento nas quinas da viga. As leituras foram determinadas para três tempos de exposição: 15 min., 30 min. e 45 minutos, correspondentes às três seções de implantação de termopares. Estes tempos correspondem, respectivamente, à temperatura de aquecimento de 760°C, 843°C e 892°C, segundo a curva-padrão ASTM E-119 (1995).

## Resultados e Discussões

A Figura 15 apresenta as temperaturas no interior das vigas, obtidas em três tempos de duração de ensaio: 15 min., 30 min. e 45 min. A Figura 16 apresenta os gradientes térmicos obtidos por meio da exposição das vigas: a Figura 16 (a), (b), (c) se refere à seção 1 ou topo da viga, a Figura 16 (d), (e), (f) faz referência à seção 2, ou ponto médio da face, e a Figura 16 (g), (h), (i) corresponde ao monitoramento da quina das vigas. As temperaturas são apresentadas em graus Celsius (°C) e os valores das temperaturas foram tomados por média aritmética dos quadrantes (A, B, C, D).

Podemos observar que para o tempo de 15 min. as diferenças de temperatura entre as três profundidades se apresentam distintas. Entre 10 mm e 20 mm, esta diferença é em média de 65%. Enquanto a diferença da temperatura dos 30 mm até os 20 mm é de 55%.

Quando o tempo de exposição atinge 30 minutos, a diferença de temperatura entre a primeira e a segunda camadas é menor que a diferença entre a terceira camada em relação à segunda. As temperaturas são em torno de 40% menores entre a primeira e a segunda camadas, e 55% menores entre a segunda e a terceira camadas. Após 45 min. de exposição, a diferença de temperatura entre a primeira e a segunda camadas cai para 30% em média, e entre a segunda e a terceira camadas se mantém em torno de 50% em média.

Demonstra-se, assim, que próximo à superfície da madeira a temperatura tende a se equilibrar com a do ambiente externo, enquanto no interior da seção as propriedades isolantes do carvão e a baixa condutividade térmica colaboram para que o processo de degradação seja mais lento e mantenha graduação de temperatura constante.

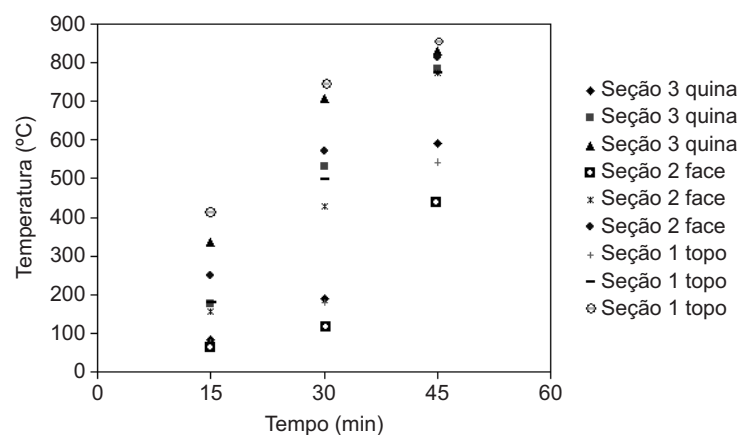
Tomando como referência a temperatura base da camada carbonizada (290°C), podemos estimar que durante os primeiros 15 minutos de exposição as vigas perdem aproximadamente 20% de seção devido à formação de carvão. Após 30 minutos de exposição a perda é de cerca de 36% da seção e, finalmente, aos 45 minutos de exposição à curva padronizada de incêndio a perda é de 52% da seção.

## Conclusões

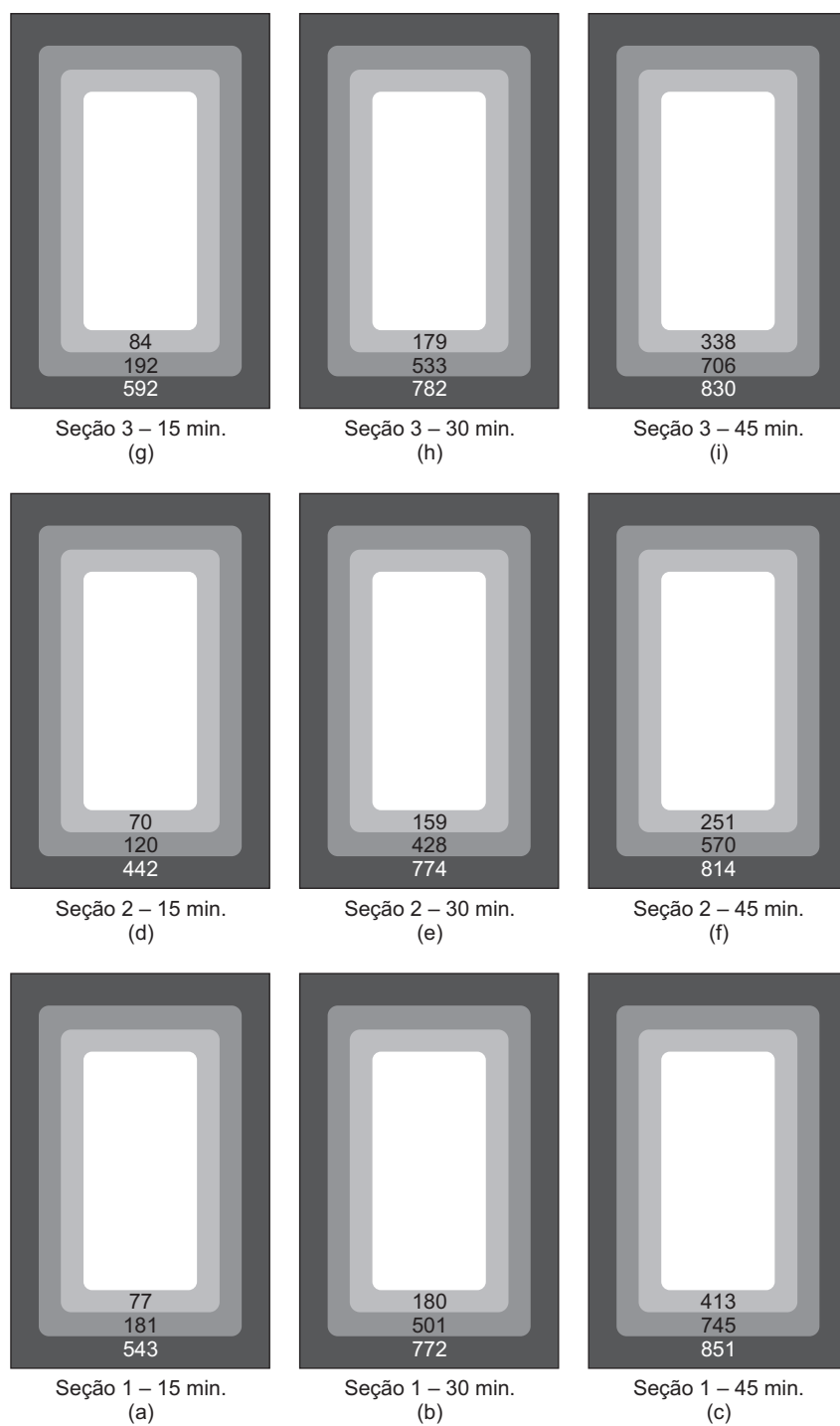
A massividade dos elementos estruturais de madeira e a baixa condutividade térmica do carvão resultam em aquecimento lento. Deste modo, a madeira, mesmo sem a proteção de produtos ignífugos, protege as camadas interiores da seção das elevadas temperaturas externas.

A carbonização se processa com mais velocidade no topo da viga, seguida da quina e, por fim, na face. A importância em conhecer o comportamento da degradação no topo da viga se justifica quando do estudo dos apoios. Próximo à superfície da madeira, a temperatura tende a se equilibrar com a do ambiente externo, enquanto no interior da seção as propriedades isolantes do carvão e a baixa condutividade térmica colaboram para que o processo de degradação seja mais lento e mantenha graduação constante da temperatura.

A degradação da quina está relacionada ao efeito de arredondamento, que resulta da maior exposição deste local a elevadas temperaturas. O monitoramento dos termopares na face das vigas apresentou como resultado menores temperaturas de degradação.



**Figura 15** Temperaturas no interior das vigas, para os tempos: 15 min., 30 min. e 45 min.



**Figura 16** Gradientes de temperatura para vigas de madeira (16 cm x 26 cm).

A temperatura de interesse para o estudo da resistência estrutural é inferior à temperatura da base de carbonização da madeira, visto que a temperaturas próximas e superiores a esta a madeira se converte em carvão, o qual não possui capacidade de suportar carregamento.

Após 45 minutos de exposição à curva padronizada de incêndio e tendo como referência a temperatura base da camada carbonizada, a perda de seção das vigas é de cerca de 52%.

### Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, P. A. de O.; SANCHES, S. B. O efeito da temperatura nas resistências da madeira e do concreto. *Revista Técnica*, mar./abr., n. 33, ed. PINI, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E119-95a – *Fire tests of building construction and materials* (CD ROM). Philadelphia, 1995.
- BIN, Y.; BUCHANAN, A. H.; MOSS, P. J. Elevated temperature and mechanical properties for use in fire simulations. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 7., WCTE 2002, aug. 12-15, Shah Alam, Malaysia, 2002. p. 243-247.
- BROWNE, F. L. *Theories of the combustion of wood and its control, a survey of the literature*. FPL Report 2136, 1958.
- BUCHANAN, A. H. Mechanical Properties of Wood Exposed to fires. In: CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 5., Montreux, Switzerland, 1998, *Proceedings...* Montreux, Switzerland, 1998. p. 238-245.
- BUCHANAN, A. H. Burning issues in timber engineering. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, Rotorua, New Zealand, 1999. *Proceedings...* Rotorua, New Zealand Forest Research Institute. v. 3, p. 1-11, 1999. (Forest Research Bulletin, 212).
- EUROPEAN STANDARD EUROCODE. *Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-2: General rules-Structural fire design*. European Committee for standardization, Brussels, 2002.
- GARDNER, W. D.; SYME. *Charring of glued-laminated beams of eight australian-grown species and effect of 13 mm gypsum plaster board protection on their charring*. Technical report n. 5. Sydney, 1991.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. *Manual de preservação de madeiras*. São Paulo: Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo, Publicação IPT, 1986.
- JANKOWSKY, I. P. *Potencialidade de creosoto de Eucalyptus spp. como preservativo para madeiras*. 1986. 159 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- JUNEJA, S. C. Combustion of cellulosic materials and its retardance – status and trends. Part 1. Ignition, combustion process and trends. *Wood Science*, v. 7, n. 3, p. 201-208, 1975.
- KONIG, J.; WALLEIJ, L. Performance of timber frame assemblies. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, Rotorua, 1999. *Proceedings...* Rotorua, New Zealand Forest Research Institute. v. 3, p. 14-18, 1999. (Forest Research Bulletin, 212).
- LIE, T. T. A method for assessing the fire resistance of laminated timber and columns. *Can. J. of Civil Eng.*, v. 4, p. 161-169, 1977.
- PINTO, E. M. *Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal à grã para o Eucalyptus citriodora e Eucalyptus grandis*. 2005. Tese (Doutorado) – Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROWELL, R. M. Chemical Modification of Wood. In: *Wood and cellulosic chemistry*. New York: David Hon & Nobuo Shiraishi, 1991. cap.15, p. 703-756.
- SCHAFFER, E. L. *Charring rate of selected woods-transverse to grain*. FPL. 69. Madison, WI: US Department of agriculture, Forest Products Laboratory, 1967.
- TIMBER ENGINEERING, STEEP 1 (s/d). *Basis of design, material properties, structural components and joints*. Behavior of timber and wood-based materials in fire. A13.
- TRUAX, T. R. *Fire research and results at U.S.* Forest Products Laboratory. US. Forest Service; FPL rep. n. 1999. Madison, Wisconsin, 1959.
- VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. *Resistência ao fogo das estruturas de aço*. Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS/ Centro Brasileiro da Construção em Aço – CBCA, 2003.
- VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; EUCLIDES, R. F. Efeito de aquecimento em algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Revista Árvore*, v. 7, n. 2, p. 136-146, 1983.
- WHITE, R. H. *Charring rates of different wood species*. Thesis (PhD) – University of Wisconsin-Madison, EUA, 1988.
- WILEY, J. & Sons. *Enciclopedia of chemical technology*, 4. ed. 1998. v. 25.