

Determinação da taxa de carbonização de vigas estruturais de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis*

*Dra. Edna Moura Pinto*¹, *Carlito Calil Junior*²

Trabalho recebido em 25/08/2005 e aprovado para publicação em 28/10/2005.

Resumen

A madeira é um material combustível e a insegurança frente aos potenciais riscos relacionados à sua combustibilidade é considerada uma das restrições ao uso estrutural deste material e um dos pontos restritivos na aprovação de financiamento de habitações em madeira no Brasil. Conhecer o comportamento da madeira sob ação do fogo é necessário para sua utilização racional e segura, em vista de sua potencialidade e por representar fonte de matéria-prima renovável para o setor construtivo. No que diz respeito ao desempenho ao fogo, a madeira de uso estrutural possui como principal parâmetro a taxa de carbonização. Neste trabalho são apresentados resultados de ensaios de carbonização realizados em seis vigas de madeira das espécies de *E. citriodora* e *E. grandis*.

Palavras-chave: *Eucalyptus*, incêndio, taxa de carbonização, fogo, combustibilidade.

¹ Dra. LaMEM/SET/EESC/USP. Av. Trabalhador São Carlense, 400. CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brasil. Tel. +55 16 3373 8227. E-mail: emoura@sc.usp.br

² Professor Dr. LaMEM/SET/EESC/USP. Av. Trabalhador São Carlense, 400. CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brasil. Tel. +55 16 3373 9320. E-mail: calil@sc.usp.br

1. Introdução

A madeira é um material combustível e a insegurança frente aos potenciais riscos relacionados à sua combustibilidade é considerada um dos preconceitos em relação ao uso estrutural deste material e um dos pontos restritivos na aprovação de financiamento de habitações em madeira no Brasil.

É notório o aumento de interesse pela utilização da madeira de espécies de *Eucalyptus* como fonte de matéria-prima na indústria madeireira e construção civil. Por serem espécies de rápido crescimento, de curta rotação (idade ideal para o corte) e com propriedades adequadas para a aplicação estrutural.

O desenvolvimento e o emprego dos materiais construtivos estão sendo gradualmente atrelados às normas de desempenho. O estabelecimento de padrões mínimos com relação ao comportamento dos materiais coincide nas décadas de 50 e 60, com o estabelecimento de padrões mínimos de qualidade e desempenho dos materiais e processos construtivos voltados à reconstrução das cidades européias do pós-guerra e com o caráter científico que os estudos sobre incêndio passaram a ter na década de 50. Desta forma as propriedades dos materiais passaram a ser exaustivamente estudadas.

A segurança das estruturas é um dos componentes passivos do sistema de proteção contra incêndio. Com respeito à madeira de uso estrutural, o principal parâmetro, no que concerne ao estudo de seu comportamento ao fogo é a taxa de carbonização. Ela é um valor dimensional determinante para a avaliação da resistência ao fogo, visto que o colapso de elementos de madeira e de seus derivados ocorre principalmente pela redução da área resistente, ou seja, pela redução gradual da seção transversal exposta ao fogo.

No entanto, a realização de ensaios com elementos e sistemas estruturais expostos ao fogo envolvem elevados custos, seja com relação aos equipamentos necessários, seja com custos de realização dos ensaios, o que dificulta a realização e reprodução de pesquisas nesta área. Neste sentido, as normas adotam valores fixos com base na densidade das espécies. Ao mesmo tempo, modelos, expressões matemáticas ou estatísticas, tornam-se cada vez mais refinados.

Sua determinação pode ser feita tanto por meio de modelos empíricos baseados em dados experimentais como por modelos teóricos fundamentados em princípios físicos e químicos. É caracterizada tanto pela perda de massa (g/s), também denominada taxa de queima, como pelo aumento da camada carbonizada (mm/min.) denominada de taxa de carbonização.

O último método é mais difundido por conduzir diretamente a análise da seção residual, atendendo aos interesses do estudo de peças estruturais em situação de incêndio que se baseia na redução da área resistente e na perda das propriedades de resistência e rigidez da madeira exposta a elevados gradientes de temperatura.

Resultados experimentais realizados com espécies coníferas e folhosas de origem Norte-Americanas têm demonstrado uma relação aproximadamente linear entre tem-

po e profundidade de carbonização, com velocidade média de carbonização de 0,63 mm/min, (White e Nordheim 1992).

O valor difundido adota a taxa de carbonização transversal à grã de 0,60 mm/min. para todas as madeiras submetidas a exposição padronizada ao fogo, embora existam diferenças entre as espécies, relacionadas às respectivas densidades, teor de umidade e permeabilidade. Lie (1997) recomenda dois valores, um para madeiras de baixa densidade e secas: 0,8 mm/min. e outro para madeiras coníferas de média densidade: 0,6 mm/min.

Levando a termo as considerações apresentadas, é patente a necessidade de maiores conhecimentos sobre o comportamento da madeira sob ação do fogo, em vista de sua potencialidade e por representar fonte de matéria prima renovável com emprego no setor construtivo, garantindo sua utilização racional e segura.

Neste trabalho, considerado a primeira abordagem sobre o tema no Brasil, são apresentados resultados experimentais abordando a carbonização da madeira de uso estrutural realizados em seis vigas de madeira das espécies de *E. citriodora* e *E. grandis*.

2. A taxa de carbonização da madeira

Estudos sobre a taxa de carbonização da madeira de árvores folhosas como coníferas 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.

As taxas de carbonização adotadas pelas normas, Eurocode 5 (2002) e AS 1720.4 (1990) admitem um valor que decresce linearmente em função do tempo. O Eurocode fixa valores tabelados para as taxas em função da densidade da madeira, enquanto a Norma Australiana propõe um modelo matemático para determinação da taxa de carbonização considerando a densidade aparente a 12% de umidade:

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

Onde β é a taxa de carbonização; ρ_{12} é a densidade aparente a 12% de umidade (kg/m^3).

Estudos conduzidos para diferentes espécies resultaram em diferentes expressões matemáticas para traduzir a velocidade de carbonização da madeira, Tabela 1.

Tabela 1: Modelos matemáticos para expressar a velocidade de carbonização da madeira.

Autores	Características	Modelos
Lawson, Webmester; Aston, 1950.	Madeira: Spruce Vigas com seção 38x50 mm, $u=12\%$, ASTM E 119.	$\frac{\partial x}{\partial t} = 1,041^{-0,2}$ t é o tempo; x é a localização da frente de carbonização.
Vorreiter, 1956.	Madeira: Spruce Placas de seção 10 mm de espessura.	$x = 0.345 \frac{t^{1,3}}{\rho - \rho_c}$ t é o tempo; x é a localização da frente de carbonização; ρ densidade da madeira; ρ_c densidade do carvão.
Schaffer, 1967.	Madeira Douglas-fir, southern pine e <i>White oak</i> . MLC com 75mm de espessura, $u = 6$ a 18%, exposição a ASTM E 119.	$t = [(2,27 + 0,046u)\rho + 0,33]x$ t é o tempo; x é a localização da frente de carbonização; ρ densidade da madeira;
White, 1988.	Madeira Engelm spruce; Western red cedar; Southern pine; Redwood; Hard maple; Yellow poplar; Red oak e Brasswood, MLC com 63 mm de espessura, $u = 6$ a 16%, exposição a ASTM E 119.	$\ln(m) = -1,7418 + 0,8485f_{car} + 0,9388\rho + 0,002u$ x localização da frente de carbonização; ρ densidade da madeira; u teor de umidade; f_{car} fator de contração do carvão.

Fonte: White (1988).

Os trabalhos experimentais feitos por Lawson, Vorreiter, Schaffer e White, resultaram em modelos empíricos similares entre si para descrever a taxa de carbonização da madeira, estes modelos apresentam o seguinte formato Lau et al. (1999):

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \eta_1 t^n \quad (2)$$

ou

$$x = \eta_2 t^n \quad (3)$$

onde x = localização da frente de carbonização; $\frac{\partial x}{\partial t}$ = taxa instantânea do avanço da carbonização; η_1 e η_2 constantes de regressão. Os expoentes (n) determinam: $n > 0$ ocorre aumento da carbonização; $n = 0$ a carbonização é constante; $n < 0$ a carbonização diminui.

Pesquisas conduzidas por White e Nordheim (1992), Schaffer (1967), White (1988) demonstraram que as propriedades da madeira (densidade, teor de umidade, permeabilidade, anatomia) afetam a taxa de carbonização. Como resultado de suas investigações sobre a taxa de carbonização de oito espécies de madeira norte americanas, White (1988) concluiu que as duas mais importantes propriedades que influenciam a taxa de carbonização da madeira são: a densidade (ρ) e o teor de umidade (u).

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, baseado em três espécies white oak (*Quercus spp.*), douglas fir e southern pine (*Pinus spp.*), com teor de umidade de 15%, White (1995, 1988) é dado pela Equação (4):

$$t = mx_c \quad (4)$$

onde t = tempo em minutos; x_c = espessura da camada carbonizada a partir da superfície original; m = parâmetro a ser estimado.

$$m = [(28,726 + 0,0578u)\rho + 4,187] + 0,079 \quad (\text{white oak}) \quad (4.1)$$

$$m = [(5,832 + 0,120u)\rho + 12,862] + 0,079 \quad (\text{douglas fir}) \quad (4.1)$$

$$m = [(20,036 + 0,403u)\rho + 0,403] + 0,079 \quad (\text{Southern pine}) \quad (4.1)$$

onde u = teor de umidade; ρ = densidade (kg/m³).

Posteriormente White (1988) fundamentado no estudo empírico desenvolveu um modelo não-linear e unidimensional para a taxa de carbonização válido para peças de grandes dimensões, baseado em 8 espécies: 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 se obter o modelo de taxa de carbonização originando as seguintes equações:

$$t = mx_c^a \quad (5)$$

$$t = mx_c^{1,23} \quad (6)$$

$$\ln t = \ln m + 1,23 \ln x_c \quad (7)$$

onde t é tempo de carbonização em minutos; x_c é a espessura do carvão medido a partir da superfície original da seção; m parâmetro a ser estimado tanto para folhosas como para coníferas.

O parâmetro $\ln m$, estimado por regressão da Equação (7), foi utilizado para relacionar as propriedades da madeira com a taxa de carbonização onde as seguintes variáveis foram incorporadas ao modelo, resultando na Equação (7.1):

$$\ln m = 1,3349 \rho - 0,009887 \rho d + 0,1176 c - 0,00387 cd + 0,01717 u - 1,2521 \quad (7.1)$$

A Tabela 2 apresenta valores comparativos para taxa de carbonização obtida dos modelos linear e não-linear de coníferas e folhosas. Como é notório, o valor obtido da equação não linear se mostra próximo de valores recomendados pelo Eurocode 5 (2002) e por Lie (1997).

Tabela 2: Taxa de carbonização para algumas espécies de madeira Norte-Americanas de coníferas e folhosas, obtidas através de ensaio padronizado ASTM E -119 (1995).

Espécies	ρ (g/cm ³)	f_{car}	Taxa de Carbonização Linear (min./mm) ⁽¹⁾	Taxa de Carbonização Não-Linear (min./ mm ^{1,23}) ⁽²⁾
Southern Pine	0,51	0,6	1,24	0,56
Western red cedar	0,31	0,83	1,22	0,56
Oak, red	0,66	0,70	1,59	0,72
Yellow poplar	0,50	0,67	1,36	0,61

Fonte: Woodhandbook (1999).

⁽¹⁾ conforme Equação (4)

⁽²⁾ conforme Equação (6)

3. Materiais e métodos

Para a realização do experimento foram necessários ensaios complementares orientados pela NBR 7190 (1997) para a determinação do teor de umidade (u), da densidade aparente a 12% (ρ_{12}), densidade aparente (ρ) e densidade básica (ρ_{bas}).

Os ensaios de carbonização foram realizados em seis peças estruturais de *Eucalyptus*, dimensões nominais: 0,16 m x 0,26 m x 2,00 m, expostas à elevação de temperatura segundo a curva de aquecimento proposta pela norma ASTM E 119 – “Standard test methods for fire tests of building construction and materials” (1995) em forno com sis-

tema de aquecimento constituído por quatro queimadores a gás GLP, de baixa pressão, exaustão por dutos e dimensões internas de 4,00m x 3,07m x 0,91m, volume interno de 11,17 m³, Figura 1.

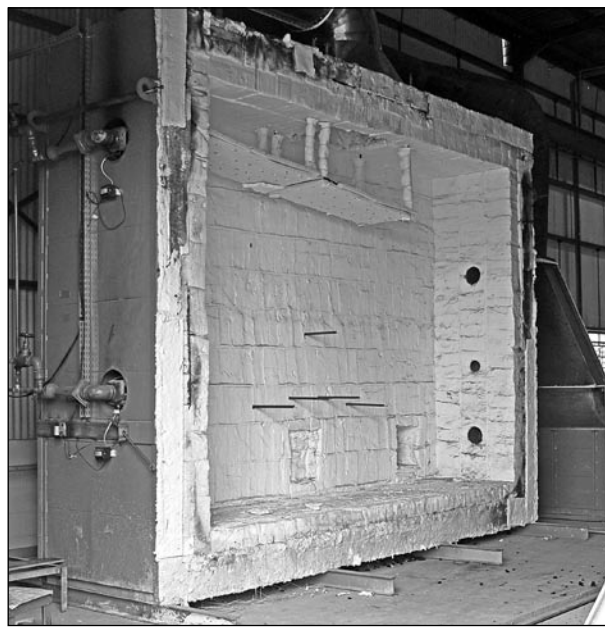


Figura 1: Forno para realização do ensaio de carbonização

Os seguintes critérios foram considerados na determinação das dimensões dos corpos de prova: 1) utilizar dimensões similares a ensaios anteriormente descritos na literatura para uso estrutural; 2) adotar dimensões compatíveis ao forno utilizado para o ensaio.

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

Os termopares foram instalados ao longo de três pontos da viga, seções: **1** (topo), **2** (face) e **3** (quina). Cada seção corresponde a 12 pontos de leitura distribuídos em quatro diferentes quadrantes (A,B,C e D) e a três diferentes profundidades, conforme ilustram as Figuras 2 e 5, totalizando 36 termopares.

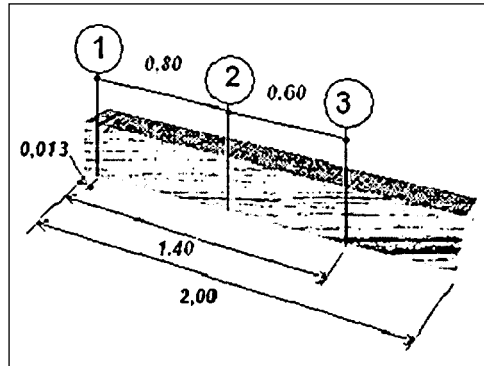


Figura 2: Seções de implantação dos termopares (1), (2), (3), medidas em metros.

Deste modo, as leituras obtidas da seção 1 permitem a avaliação da velocidade de carbonização no topo das peças, ver, Figura 6; as da seção 2, possibilitam a avaliação da velocidade de carbonização a partir das faces e as da seção 3, permitem avaliar o efeito de arredondamento nas quinas da viga.

Os ensaios foram executados com o acionamento de 3 queimadores a gás. O controle da temperatura feito manualmente a partir da leitura da temperatura fornecida por cinco termopares, posicionados nas proximidades da viga ensaiada.

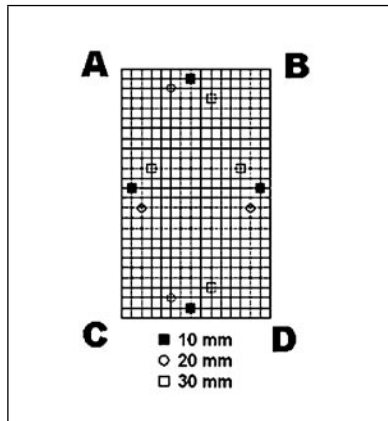


Figura 3: Seção nominal da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seção 2.

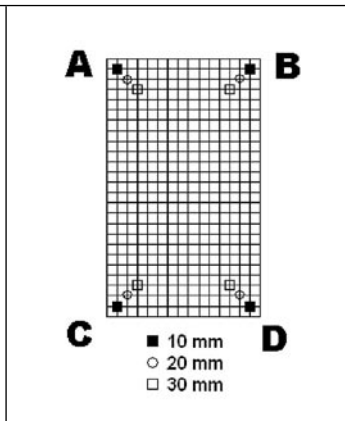


Figura 4: Seção da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seções 1 e 3.

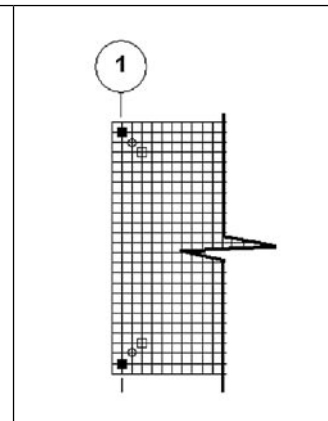


Figura 5: Seção longitudinal da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seção 1.

Os ensaios foram executados com o acionamento de 3 queimadores a gás. O controle da temperatura feito manualmente a partir da leitura da temperatura fornecida por cinco termopares, posicionados nas proximidades da viga ensaiada.

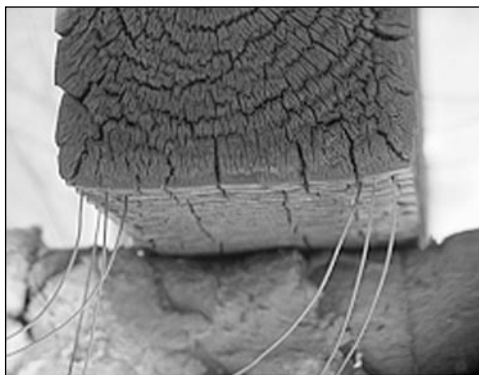


Figura 6: Viga em processo de degradação e termopares de topo .

4. Resultados e discussões

Na Tabela 3 são apresentados os valores da caracterização pelo teor de umidade, densidades e massa dos corpos-de-prova e nas Figuras 7a-f são apresentadas as seções das vigas após a execução dos ensaios.

Tabela 3: Caracterização dos corpos-de-prova para ensaio de Carbonização.

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

* CP Corpo-de-prova



Figura 7a: Citriodora D3.



Figura 7b: Citriodora D1.



Figura 7c: Citriodora C2.

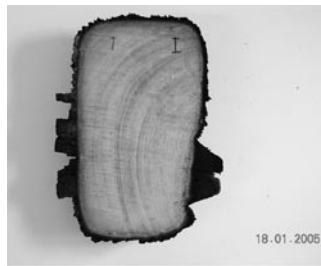


Figura 7d: Grandis I.



Figura 7e: Grandis D1.



Figura 7f: Grandis E2.

A taxa de carbonização apresentada na Tabela 4 é obtida da razão entre o posicionamento do último termopar (30mm) pelo tempo necessário para que este atinja a temperatura adotada como base da camada carbonizada (290°C).

Tabela 4: Tempo de carbonização (t) e Taxa de carbonização (β) das diferentes espécies por média referente às seções.

Espécie	CP	Face t (min.)			Face β (mm/min.)		
		10 mm	20 mm	30 mm	10 mm	20 mm	30 mm
citriodora	D3	9,96	25,86	49,83	1,00	0,77	0,60
	D1	10,13	31,23	55,83	0,98	0,64	0,54
	C2	12,56	29,53	50,61	0,79	0,67	0,59
grandis	D1	11,17	33,91	54,29	0,89	0,59	0,55
	I	10,55	30,55	57,97	0,95	0,65	0,52
	E2	12,12	27,64	45,26	0,82	0,72	0,66

β : é a taxa de carbonização com base em dados experimentais.

Em média os valores experimentais para a carbonização da face: 0,58 mm/min., são mais próximos dos valores tabelados pelo Eurocode 5: 0,55 mm/min., que os valores calculados por meio da norma Australiana AS 1720.4: 0,51 mm/min, Figura 8. A menor taxa é de $\beta=0,52$ mm/min. e o maior valor $\beta= 0,66$ mm/min.

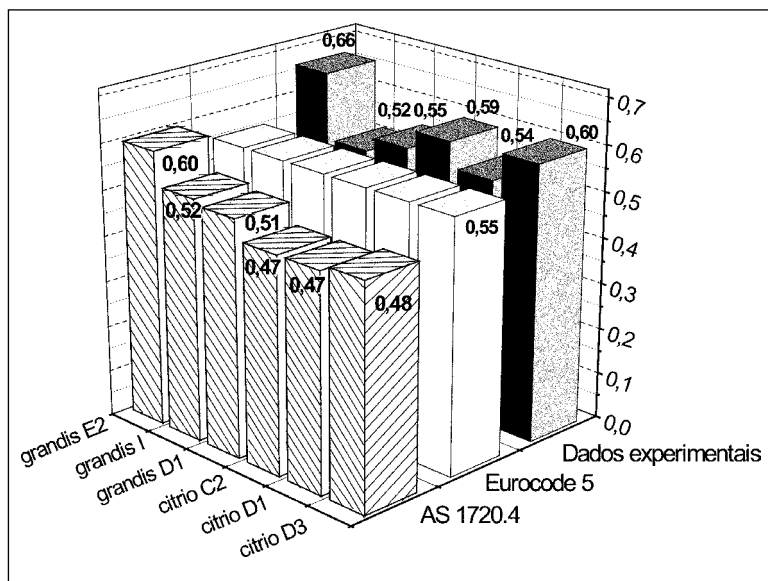


Figura 8: Valores de Taxa de Carbonização segundo normas e dados experimentais.

A degradação térmica foi maior para o topo e quina, Figuras 9 a 11. O desvio padrão e o coeficiente de variação reduzem em função a profundidade, os dados tendem a homogeneidade em função da profundidade: 10mm ($s = 0,0595$, $CV=23,55$); 20 mm ($s = 0,0318$, $CV=16,39$); 30mm ($s = 0,0219$, $CV=13,78$).

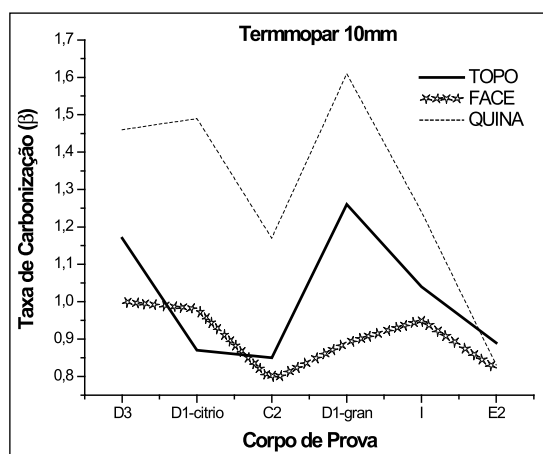


Figura 9: Taxa de Carbonização, profundidade 10mm.

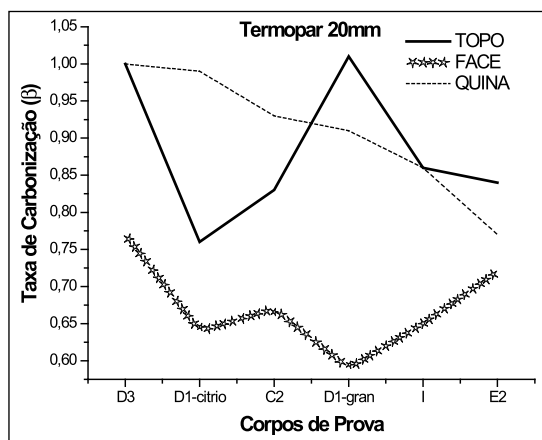


Figura 10: Taxa de Carbonização, profundidade 20mm.

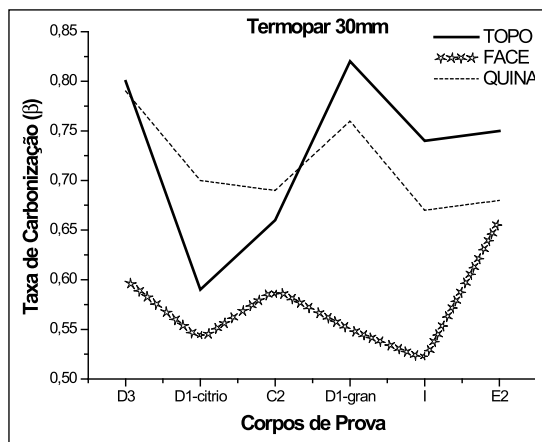


Figura 11: Taxa de Carbonização, profundidade 30mm.

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 a que o processo de degradação seja lento e mantenha uma graduação constante da temperatura.

5. Conclusões

Com base nos resultados dos ensaios de carbonização realizado em seis vigas de *Eucalyptus* pode-se concluir que:

- A taxa de carbonização obtida individualmente para as duas espécies é similar: $\beta=0,58$ mm/min. Embora fosse esperado um melhor desempenho da espécie *citriodora* em função de sua densidade superior;

- A taxa obtida é ligeiramente superior aos valores descritos pelo Eurocode 5 (2002) e pela norma Australiana AS 1720.4 (1990). Considerando os valores de ensaio obtidos das vigas, não é adequada a adoção dos valores tabelados pelo Eurocode para determinar a taxa de carbonização das espécies estudadas;
- A velocidade de carbonização é maior nos primeiros 10 mm da viga e reduz para 30% aos 30 mm de profundidade. Constatando a não-linearidade da carbonização da madeira, cuja velocidade é maior para os primeiros milímetros e reduz com a profundidade, assumindo um comportamento próximo da linearidade;
- A degradação térmica é superior no topo da viga ($\beta=0,73$ mm/min.) seguida da quina da viga ($\beta=0,71$ mm/min) e menor na superfície $\beta=0,58$ mm/min.

6. Referências bibliográficas

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). *Projeto de estruturas de madeira*. NBR 7190. Rio de Janeiro.

Australian Standard (1990). *Timber structures. Part 4: Fire resistance of structural timber members*. AS 1720.4 –1990. Sidney.

E. C. (2002). *Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-2: General rules-Structural fire design*. European Committee for standardization, Brussels.

Gardner, W. D. and SYME (1991) 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.

Lau, P. W. C.; ZEELAND, I. and WHITE, R. (1998). Modeling the char behavior of structural timber Proceedings of the Fire and Materials. 98 Conference 23-24 February. 5 th International Conference, San Antonio-Texas.

Lie, T.T (1997). A Method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns. Canadian J. Civil Engineering, v. 4, p. 161-169.

Pinto, E. M. (2005). *Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal à grã para o Eucalyptus citriodora e Eucalyptus grandis*. São Carlos. Tese (Doutorado) – Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais- Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.

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

White, H. R. and Nordheim (1992). Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure. Fire technology, v. 28, n. 1, p. 5-27.

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

White, R.H. (1995). *Analytical methods for determining fire resistance of timber members. The SFPE handbook of fire protection engineering*. 2.ed. Boston, Society of fire protection engineers. Seção 4, Cap. p.217-29.

Determination of charring rate of *Eucalyptus Citriodora* and *Eucalyptus Grandis* Beams.

Abstract

Wood is a combustible material and the unsafe in face of the potential risks related to its combustion is one of restrictions to the structural applications of this material and is a restrictive point to approval of financing of timber constructions in Brazil. The knowledge about the performance of the wood in fire is necessary to its rational use and insurance on bases of its potentiality and also it is representing renewable material source of assemblies. The charring rate of the heavy timber is the main parameter in respect to the study of its performance in fire. This work presents results of charring rate tests conducted in six beams of *Eucalyptus citriodora* and *Eucalyptus grandis*.

Keywords: Eucalyptus, fire, charring rate, combustibility.

1 Introduction

Wood undergoes thermal degradation when exposed to fire and reduces its mechanical properties by changing the wood to char and though the action of temperature. Charring rate of wood refers to the dimensional rate at which wood changes to char. It is a method to predict the time of endurance of structural wood members in a fire.

Several studies have been conducted on charring rate of different wood species that results in mathematical expressions and values of charring rate. This work represents the first initiative in Brazil concern to study of charring of structural members of wood.

The objective of this study was to determine the rate of char development in wood *E. citriodora* and *E. grandis* under standard fire exposure.

2 Methodology

Six wood beams were tested in a vertical gas furnace, species of *E. citriodora* and *E. grandis*. The overall dimensions of beams were 260 mm high, 2000 mm long and 160 mm thick. Thirty six thermocouples were inserted inside 10 mm, 20 mm and 30 mm depth holes to measure the temperature that followed the standard ASTM E-119 time temperature curve. Charring was assumed to occur when thermocouples embedded in the sample reached the temperature 290 °C. Supplementary tests were conducted to determine material properties as density and moisture content.

3 Conclusions

- The charring rate are similar for the two wood species, despite the different densities ;
- The charring rate was slightly higher than values presented by Eurocode 5 (2002) and AS 1720.4 (1990);
- The charring twas greater in the bottom of the beam ($\dot{a}=0.73$ mm/min.), followed by the corner ($\dot{a}=0.71$ mm/min) and surface $\dot{a}=0.58$ mm/min.