

AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS TEÓRICOS DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DE TAXAS DE CARBONIZAÇÃO DE ESPÉCIES DE MADEIRAS BRASILEIRAS

EVALUATION OF THEORETICAL CALCULATION METHODS FOR DETERMINATION OF CHAR RATES OF BRAZILIAN WOOD SPECIES

Gisele Cristina Antunes Martins ⁽¹⁾, Carlito Calil Junior ⁽²⁾

(1) Doutora, Pós-doutoranda, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil.

(2) Prof. Dr., Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil.

Endereço de contato: giselemartins@usp.br

Código de identificação: T6-23

Resumo

Métodos de dimensionamento de elementos estruturais de madeira em situação de incêndio devem ser capazes de prever a espessura carbonizada da madeira em um período pré-estabelecido de exposição ao fogo, sendo esta medida determinada pela distância entre a face externa do elemento original e a posição da linha carbonizada, calculada pelo tempo de exposição ao fogo e a taxa de carbonização que depende do tipo de espécie de madeira. A taxa de carbonização é o principal parâmetro para dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio e depende de inúmeros fatores, como espécie de madeira, densidade, composição química, permeabilidade, condutibilidade térmica da madeira, dimensão da amostra e orientação da grã. No presente trabalho foi realizada uma avaliação de três propostas para determinação de valores de taxa de carbonização de espécies de madeira brasileiras. As madeiras de espécies usadas nos ensaios, são madeiras de reflorestamento comercialmente utilizadas pelas construtoras nacionais para a produção de vigas e pilares de Madeira Laminada Colada sob rigoroso controle de qualidade.

Palavras chave: estruturas de madeira; métodos teóricos; dimensionamento; incêndio; taxa de carbonização

Abstract

Methods of designing structural elements of wood in fire situation shall be capable of predicting the char depth of the wood in a pre-established period of fire exposure, this measurement being determined by the distance between the outer face of the original element and the position of the char line, calculated by the time of exposure to fire and the char rate depending on the type of wood species. The char rate is the main parameter for dimensioning wood structures in a fire situation and depends on many factors, such as wood species, density, chemical composition, permeability, wood thermal conductivity, sample size and grain orientation. In the present paper an evaluation of three proposals was made to determine the char rate of Brazilian wood species. The woods of species used in the tests are reforestation woods commercially used by the national constructors for the production of beams and pillars of laminated wood under strict quality control.

Keywords: timber structures; calculation methods; sizing; fire; char rate

1. INTRODUÇÃO

A utilização de elementos estruturais de madeira como materiais de construção remonta desde o início da civilização devido a alta rigidez e resistência destes materiais. A aplicação de elementos de madeira na construção traz benefícios para uma estratégia climática contribuindo para a sua sustentabilidade no futuro.

Nas últimas décadas, importantes estudos foram realizados em centros de pesquisas para caracterizar, regulamentar e fomentar o uso da madeira. Todavia, no Brasil, a aplicação da madeira como material de construção ainda é pouco utilizada, apesar de todos os fatores favoráveis em relação à madeira que o território nacional oferece.

Entre as muitas razões a combustibilidade da madeira é um dos fatores que influenciam nas legislações e normatizações para edificações e, conseqüentemente, restringem o uso de estruturas de madeira como material de construção.

A compreensão do comportamento básico do incêndio e da estrutura durante a exposição ao fogo é uma importante condição para desenvolver uma estratégia de segurança bem sucedida. Na prática, as estratégias adotadas devem variar consideravelmente, dependendo da ênfase em proteção passiva ou ativa, tipo e uso da edificação.

Segundo Östman *et al.* [1], os seguintes princípios devem ser considerados em legislações de segurança:

- a. Os ocupantes deverão ser capazes de sair da edificação ou serem resgatados;
- b. Deve se considerar a segurança da equipe de resgate;
- c. As estruturas devem resistir ao incêndio durante um tempo mínimo pré-estabelecido;
- d. Deve se limitar a deflagração e propagação do fogo e fumaça;
- e. Deve se limitar a propagação do fogo para construções vizinhas.

O desempenho estrutural de elementos de madeira em situação de incêndio está relacionado à espessura da camada carbonizada da seção transversal, tendo em vista que o carvão gerado pela queima da madeira passa a funcionar como isolante térmico protegendo o núcleo ainda íntegro da seção. Desta maneira, vigas e pilares devem ser dimensionados levando em consideração que a seção transversal remanescente mantém a capacidade resistente e propriedades mecânicas iniciais.

1.1 Taxa de Carbonização

A resistência ao fogo de elementos estruturais de madeira se deve a carbonização do material. Métodos de dimensionamento devem ser capazes de prever, para um período pré-estabelecido de exposição ao fogo à espessura carbonizada da madeira.

A espessura da camada carbonizada é a distância entre a face externa do elemento original e a posição da linha de carbonização. A Norma Europeia EN 1995-1-2: 2004 [2] determina o limite entre o material que sofreu pirólise e o núcleo intacto da madeira sendo a isotérmica de 300°C. A taxa de carbonização é a velocidade com que a espessura carbonizada avança para o interior da seção. Desde que toda a área da madeira que sofreu pirólise pode ser considerada carbonizada, a taxa de carbonização corresponde à taxa de propagação da frente de pirólise.

Como descrito em Pinto [3], a taxa de carbonização é um valor dimensional essencial para a avaliação da resistência ao fogo, visto que o colapso de elementos de madeira e de seus derivados ocorrem principalmente pela redução da área resistente, ou seja, pela redução gradual da seção transversal exposta ao fogo.

A taxa de carbonização pode ser obtida tanto por meio de modelos empíricos, por meio de dados experimentais, quanto por modelos teóricos fundamentados em princípios físicos e químicos, sendo caracterizada pela perda de massa (g/s), denominada taxa de queima, ou pelo aumento da camada carbonizada (mm/min), denominada de taxa de carbonização. Ainda de acordo com Pinto [3], os valores de taxa de carbonização são os mais difundidos 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 de rigidez da madeira exposta a elevados gradientes de temperatura.

A taxa de carbonização da madeira depende de inúmeros fatores, como espécie de madeira, densidade, composição química, permeabilidade, condutibilidade térmica da madeira, dimensão da amostra, orientação da grã (o sentido longitudinal da madeira produz duas vezes mais carbonização que no sentido transversal). [TR10 [4]; Cachim e Franssen [5]].

A espessura da camada carbonizada pode ser calculada pelo tempo de exposição ao fogo e a taxa de carbonização da espécie. Sob a exposição ao incêndio-padrão, uma relação aproximadamente linear entre a duração do incêndio e a espessura carbonizada foi estabelecida após numerosos ensaios em temperatura elevadas com madeira e materiais à base de madeira.

A taxa de carbonização de espécies de madeira é assunto de diversas pesquisas, tendo como finalidade investigar os parâmetros que influenciam os valores de taxa de carbonização, bem como propor métodos teóricos para determinação do parâmetro.

No presente trabalho são discutidos três métodos de cálculo propostos em códigos normativos internacionais utilizados como base de dimensionamento para elementos estruturais de madeira em situação de incêndio considerando propriedades de espécies de madeiras brasileiras.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvido das análises são aplicados três métodos de cálculo para determinação da taxa de carbonização, sendo avaliados os parâmetros considerados e realizando uma análise comparativa entre duas espécies de madeira encontradas em território brasileiro, sendo o *Pinus*, representante da classe das Coníferas e o *Lyptus*[®] (híbrido de espécies de madeira de *Eucalyptus*) representante da classe das Folhosas.

3.1 Método proposto por E. L. Schaffer (1967)

A proposta apresentada por Schaffer [6] para determinação da taxa de carbonização foi correlacionada à densidade e ao teor de umidade dos elementos por meio de análises de regressão. O modelo foi proposto para três espécies de madeira, sendo: *Douglas fir* (1), *Southern pine* (2) e *White oak* (3).

$$\beta = 1/[(0,002269 + 0,00457u)\rho + 0,331] \quad (1)$$

$$\beta = 1/[(0,000461 + 0,00095u)\rho + 1,016] \quad (2)$$

$$\beta = 1/[(0,001583 + 0,00318u)\rho + 0,594] \quad (3)$$

Sendo,

- β a taxa de carbonização, em mm/min;
- u é o teor de umidade (fração);
- ρ é a densidade da espécie de madeira, em kg/m³.

As condições de exposição aplicadas nos testes desenvolvidos em Schaffer [6] foram baseadas na ASTM E – 119 [7], e as constantes apresentadas nas equações acima foram determinadas por meio de regressão linear a partir de dados de ensaios.

3.2 Norma Australiana AS 1720.4:1990 - Timber Structures – Part 4: Fire-resistance of structural timber members

A Norma Australiana AS 1720.4 [8], propõe para o cálculo da taxa de carbonização a equação (4), que tem como variável a densidade da espécie de madeira.

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

Sendo,

β é a taxa de carbonização em mm/min;

ρ é a densidade da espécie de madeira em kg/m³ com teor de umidade a 12%.

Os ensaios para validação da equação foram realizados seguindo as diretrizes da norma AS 1530.4 (9) – *Methods for fire tests on building materials, components and structures – Part 4: Fire-resistance test of elements of construction.*

3.3 Norma Europeia EN 1995 – 1 – 2: 2004 -Design of timber structures – part 1-2: General – Structural fire design

A Eurocode 5 (2), fornece a Tabela 1 com valores constantes para determinação da taxa de carbonização.

De acordo com a Eurocode 5 (2) há duas variações para a taxa de carbonização, sendo β_0 a taxa de carbonização em uma direção e β_n a taxa de carbonização que inclui o efeito de arredondamento dos cantos e o surgimento de fissuras.

Tabela 1: Valores de taxa de carbonização propostos pela EN 1995-1-2 [2]

	β_0 (mm/min)	β_n (mm/min)
a) Coníferas		
MLC com densidade ≥ 290 kg/m ³	0,65	0,70
Madeira maciça com densidade ≥ 290 kg/m ³	0,65	0,80
b) Folhosas		
Madeira maciça ou MLC com densidade de 290 kg/m ³	0,65	0,70
Madeira maciça ou MLC com densidade ≥ 450 kg/m ³	0,50	0,55
c) LVL		
Com densidade ≥ 480 kg/m ³	0,65	0,70
d) Painéis		
Painéis de madeira	0,9 ^a	-
Compensado	1,0 ^a	-
Painéis a base de madeira, além do compensado.	0,9 ^a	-
a: Valores de β válidos para $\rho = 450$ kg/m ³ e espessuras de painéis (h_p) de 20 mm. Para outras densidades e espessuras, o valor de β_0 deve ser substituído por $\beta_0 \sqrt{\frac{9000}{\rho_k h_p}}$, com ρ_k em kg/m ³ e h_p em mm.		

A revisão da norma brasileira PN NBR 7190:2013 [10] apresenta as mesmas considerações realizadas pelo Eurocode 5 [2].

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os métodos de cálculo para a determinação da taxa de carbonização foram aplicados considerando os dados obtidos por meio dos ensaios realizados no trabalho de Martins [11].

Os ensaios realizados por Martins [11] consistiam em ensaios em grande escala realizados em um forno horizontal com exposição ao fogo em três faces. Para o desenvolvimento do trabalho aqui proposto foram utilizados os valores de densidade (kg/m^3) determinados para as peças estruturais e considerado o mesmo tempo de exposição ao fogo, tendo com objetivo avaliar dois parâmetros de influência na taxa de carbonização: densidade (ρ) e tempo de exposição ao fogo (t).

Na Tabela 2 são fornecidos os valores determinados para a densidade (ρ), a duração dos ensaios (t) e a identificação das peças.

Tabela 2: Dados necessários para o cálculo da taxa de carbonização

Madeira	ID	Densidade (kg/m^3)	Tempo de Exposição (min)
Lyptus®	L5	773,2	32
	L6	784,6	32
	L4	683,2	40
	L8	749,2	40
Pinus	P3	494,6	32
	P6	499,0	32
	P7	493,0	40
	P8	497,5	40

Para a determinação dos valores de taxa de carbonização pelo método apresentado em Shaffer (1967), adotou-se a Equação (2) estipulada a partir de dados da madeira da espécie *Southern Pine* (densidade em torno de 520 kg/m^3) para representar os elementos preparados com *Pinus*. Para o cálculo dos valores de taxa de carbonização dos elementos de Lyptus®, aplicou-se a Equação (3), que foi determinada a partir de dados da madeira da espécie *White Oak* (densidade em torno de 680 kg/m^3). Na Tabela 3 são apresentados os valores calculados para a taxa de carbonização.

Tabela 3: Taxa de Carbonização determinada a partir dos métodos de cálculo

Madeira	ID	Densidade (kg/m ³)	Tempo de Exposição (min)	Schaffer (mm/min)	AS 1720.4 (mm/min)	Eurocode 5 (mm/min)
Lyptus®	L5	773,2	32	0,48	0,53	0,55
	L6	784,6	32	0,48	0,53	0,55
	L4	683,2	40	0,52	0,57	0,55
	L8	749,2	40	0,49	0,54	0,55
Pinus	P3	494,6	32	0,77	0,72	0,80
	P6	499,0	32	0,77	0,71	0,80
	P7	493,0	40	0,77	0,72	0,80
	P8	497,5	40	0,77	0,72	0,80

A taxa de carbonização diminui ao longo do tempo de exposição ao fogo e tende a um valor constante, pois a camada carbonizada isola termicamente o núcleo da seção transversal. (Schaffer [6], White [12] e Yang *et al.* [13], Martins [11]).

Para os métodos de cálculo proposto por Schaffer [6], AS 1720.4 [8] e EN 1995-1-2 [2] a única variável que influencia a taxa de carbonização é a densidade da espécie de madeira, não levando em consideração o tempo que o elemento ficou em exposição ao fogo.

Na Figura 1 é apresentada a relação entre a densidade das espécies de madeira e a taxa de carbonização. Observa-se que quanto maior a densidade menor a taxa de carbonização, fato observado por outros autores em estudos experimentais realizados (Shaffer [6]; White e Nordhein [14]; Njankouo, Dotreppe, Frassen [15]; Yang *et al.* [13]; Martins [11]).

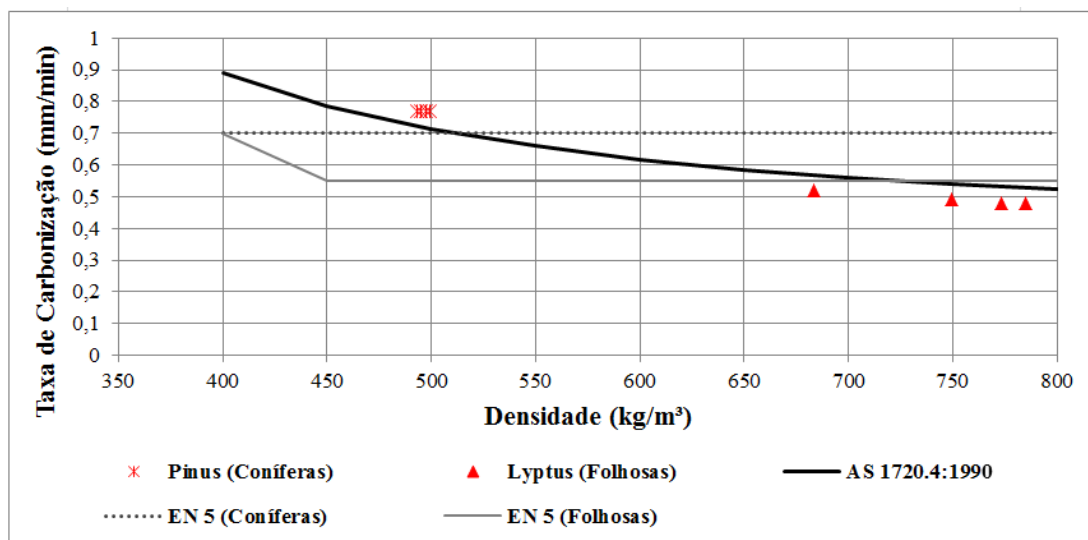


Figura 1: Relação entre a taxa de carbonização e a densidade das espécies de madeira.

Os valores propostos pela EN 1995-1-2 [2] são baseados em testes realizados com diferentes espécies de madeira utilizadas em território nacional e em exposição à curva de incêndio-padrão da ISO 834 [16]. De acordo com testes realizados por Frangi e Fontana [17], os valores podem ser adotados para elementos expostos ao fogo entre 30 a 110 minutos.

A proposta de Schaffer [6] baseou-se em testes realizados com três espécies de madeira em exposição à curva de incêndio-padrão estabelecida pela ASTM E-119 [7]. Para validação da equação proposta pela norma AS 1720.4 [8], foram realizados ensaios seguindo as diretrizes da AS 1530.4 [9], que estipula uma curva de aquecimento semelhante a ISO 834 [16].

Na Figura 2 ilustram-se as curvas de incêndio-padrão adotadas para o aquecimento durante a elaboração dos métodos de cálculo. A curva de aquecimento proposta pela ASTM E119 [7] apresenta um perfil de aquecimento mais lento do que a ISO 834 [16] nos primeiros cinco minutos. A curva indicada por “Forno Média” corresponde à curva de aquecimento utilizada por Martins [11] durante a realização dos ensaios.

A apresentação da Figura 2 tem como finalidade demonstrar que a validação dos métodos propostos por diferentes autores foram realizadas em curvas de aquecimento com comportamentos semelhantes.

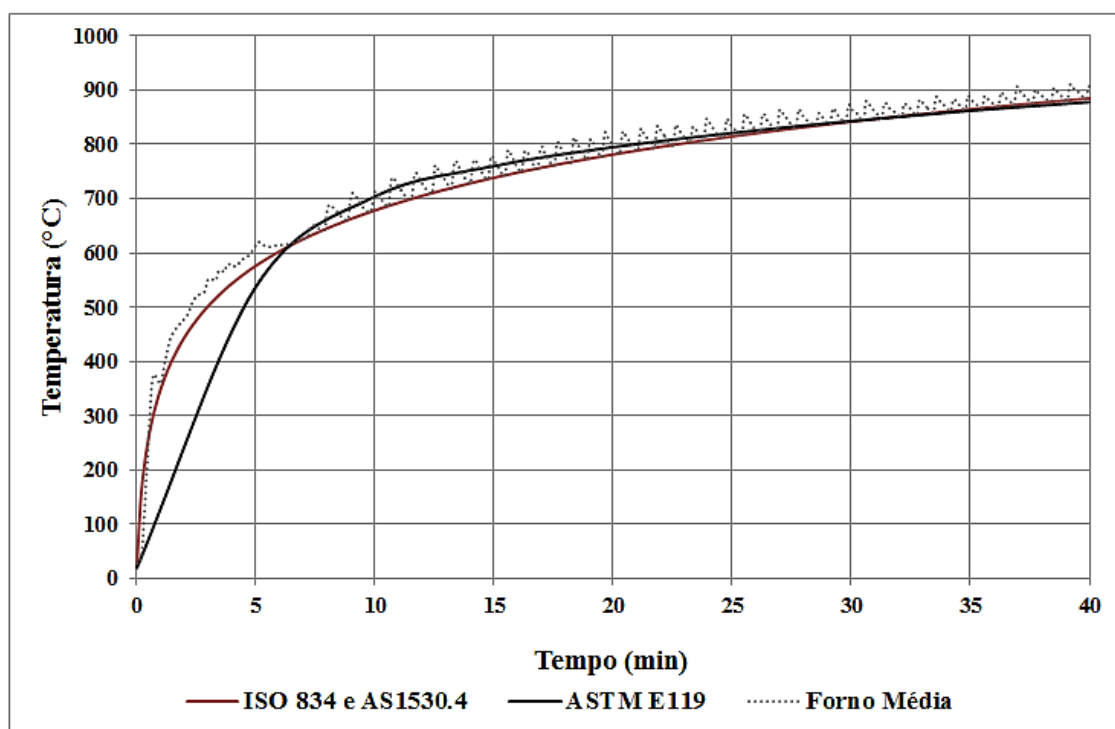


Figura 2: Evolução temporal da temperatura de acordo com as normas e dados de ensaio.

4. CONCLUSÕES

A madeira é um material combustível, todavia é consumido lentamente e superficialmente e o interior da seção permanece intacto conservando as propriedades mecânicas do elemento. Portanto, ao se realizar o dimensionamento de estruturas de madeira em situação de incêndio deve se estimar a seção transversal residual após determinado tempo de exposição ao fogo que será capaz de manter capacidade resistente do elemento. A espessura da camada carbonizada é determinada por meio da taxa de carbonização, sendo o parâmetro que estima a velocidade do fluxo de calor para o interior da seção.

No estudo realizado foram analisados os métodos de cálculo disponíveis para a determinação da taxa de carbonização. Baseado nos resultados as seguintes conclusões podem ser tiradas:

1. Os métodos de cálculo disponíveis não levam em consideração o tempo de exposição
2. A taxa de carbonização é inversamente proporcional à densidade das espécies, portanto quanto maior a taxa de carbonização, menor a densidade.

3. A taxa de carbonização tende a um valor constante após um tempo de exposição ao fogo, fato não observado ao se aplicar os métodos de cálculo;
4. Os métodos propostos devem ser aplicados com tempo de exposição de no mínimo 30 minutos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento da bolsa de estudo processo Nº 2013/07548-1 e pelo auxílio ao projeto processo Nº 2013/25401-8.

REFERÊNCIAS

- [1] Östman, B; Mikkola, E. Stein,R, Frangi,A, König,J; Dhima, D; Hakkarainen, T.; Bregulla J. (2010). Fire safety in timber buildings, Technical guideline for Europe. SP Technical Research Institute of Sweden, SP Report 19: 210
- [2] European Standard. EN 1995-1. Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design. Brussels. 2004
- [3] Pinto, E. M. (2005). Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a Grã para o Eucalyptus Citriodora e Eucalyptus Grandis. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia. Universidade de São Paulo, São Carlos
- [4] Technical report 10 - TR10: Calculating the fire resistance of exposed wood members, American Wood Council, Washington, DC. 2003
- [5] Cachim, P. B; Franssen, J-M. Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5. Fire & Materials. Vol. 33. P. 129-143. 2009
- [6] Schaffer E. Charring rate of selected wood – transverse to grain. Research Paper FPL 69, USDA Forest Service, Forest Product Laboratory, Madison, WI. USA. (1967)
- [7] Association Society for Testing and Materials. ASTM E119: standard test methods for fire tests of building construction and materials. Philadelphia. 2010
- [8] Australian Standard AS 1720.4. Timber Structures – Part 4: Fire resistance of structural timber members. Homebush.2006
- [9] AUSTRALIAN STANDARD. AS 1530.4: Methods for fire tests on building materials, components and structures – Part 4: Fire-resistance test of elements of construction. Homebush. 2005
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. PN - NBR 7190: Projeto de Norma - Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro. 2013
- [11] Martins, G.C.A. Análise Numérica e Experimental de vigas de Madeira Laminada Colada em situação de incêndio. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos. 2016.
- [12] White, R. H. (1988). Charring rates of different wood species. PhD thesis, University of Wisconsin, Madison.
- [13] Yang, T.H; Wang, S.H; Tsai, M.J, Lin, C.Y. 2009. The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test. Building and Environment, v. 44, p. 231-236.
- [14] White, R.H; Nordheim, E. V. Charring rate of wood for ASTM E119 exposure. Fire technology 28 (1): 5-30.
- [15] Njankouo, J.M, Dotreppe, J.C, Frassen, J.M, Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods. Fire and Material. 2004; 28:15-24.
- [16] International Organization for Standardization. 1999. ISO 834-1: Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements. International organization for standardization, Geneva.
- [17] Frangi, A; Fontana, M. Charring rates and temperature profiles of wood sections. Fire and Materials. 27 (2): 91-102. 2003.