

Resistência mecânica de estruturas de madeira em situação de incêndio: proposta para a inclusão em anexo da NBR 7190

Edna Moura Pinto, , Universidade de São Paulo, Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, SP. E-mail: emoura@sc.usp.br

Carlito Calil Junior, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, SP. E-mail: calil@sc.usp.br

Resumo: No Brasil o dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio é previsto por norma e contempla materiais como o aço e concreto. A madeira, no entanto não possui ainda um documento normativo apreciando este assunto. Por ocasião dos trabalhos de revisão da atual NBR 7190 - Norma Brasileira de Projeto de Estruturas de Madeira, este trabalho, apresentado a Comissão de Estudos CE-02.126.10 da ABNT responsável pela revisão, busca fixar as condições básicas exigíveis para o dimensionamento em situação de incêndio de elementos estruturais de madeira visando atender aos requisitos necessários para evitar o risco a vida. Ele se aplica onde a resistência mecânica das peças estruturais de madeira exposta a situação de incêndio seja necessária, devendo serem projetadas e construídas de modo a manter a função de suportar carregamento durante o período de exposição ao fogo.

Palavras-chave: incêndio, estruturas de madeira, resistência ao fogo.

Abstract: In Brazil the cross sections of structural elements in fire situation are foreseen by standards and contemplate materials as the steel and concrete. The timber however does not have an document appreciating this subject. For occasion of the revision committee of NBR 7190 - Brazilian Timber Structures Design, this paper submitted for the Commission of Studies CE-02.126.10 responsible for the ABNT revision, intend to fix the basic conditions for the cross section of structural wooden elements in fire aimed to prevent the fire safety. It applies itself where the mechanical resistance of the timber structural members in fire situation is necessary, having designed and constructed in order to keep load-carrying function during the fire.

Keywords: fire, timber structures, fire resistance.

1. Introdução

O conhecimento de que a madeira apresenta boa resistência ao fogo não é recente. Contudo, a sistematização de pesquisas sobre o comportamento da madeira em situação de incêndio vem sendo realizada somente a partir da primeira década do século XX com o avanço das pesquisas em Engenharia de Segurança contra incêndio e com o caráter científico que o tema passou a ter principalmente a partir da década de 50 e 60, quando os diversos materiais passaram a ser alvo de investigação na busca do melhor desempenho e aplicação respaldados em metodologias empíricas e princípios científicos, o que trouxe vantagens à madeira.

O aumento da temperatura no elemento estrutural é resultado da transferência de calor através de convecção e radiação, gerado pela diferença de temperatura entre as chamas do incêndio e o elemento estrutural, Pignatta (2001)⁽⁹⁾. Para o estudo da madeira exposta ao fogo, as propriedades térmicas e as propriedades relacionadas a resistência e rigidez são as que mais influenciam seu desempenho. A maioria destas propriedades está relacionada a fatores intrínsecos à madeira, como a densidade, teor de umidade, orientação da grã, composição química, permeabilidade, condutividade térmica e a fatores extrínsecos como as temperaturas de exposição ao fogo, duração da exposição e a ventilação no ambiente, White (1992)⁽¹²⁾, Schaffer (1967)⁽¹⁰⁾, White(1999)⁽¹¹⁾.

A madeira apresenta bom desempenho contra incêndio, quando comparada a outros materiais estruturais. As peças robustas formam uma camada de carvão isolante impedindo a saída de gases inflamáveis e a propagação de calor para o interior da seção resultando em uma velocidade média de carbonização de 0,63 mm/min ($\pm 0,13$), colaborando favoravelmente para a capacidade de sustentação estrutural mesmo após ter sido exposta a elevadas temperaturas, pois a alma da seção se mantém fria a apenas uma pequena distância da zona queimada, conservando grande parte das propriedades físicas da madeira (fig. 1).

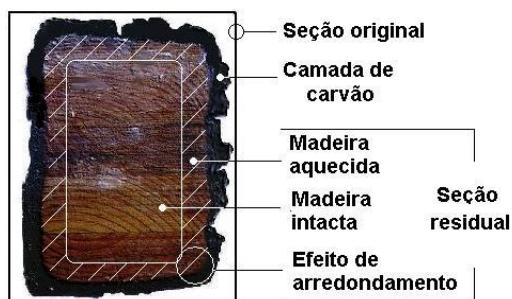


Figura 1 – Seção carbonizada de uma viga de cobertura MLC, exposição ao fogo por 30 minutos em quatro faces, taxa de carbonização de 6 mm/min.

Com este trabalho buscou-se fixar as condições básicas exigíveis para o dimensionamento em situação de incêndio de elementos estruturais de madeira visando atender aos requisitos necessários para evitar o risco a vida. Ele se aplica onde a resistência mecânica das peças estruturais de madeira exposta a situação de incêndio seja necessária, devendo serem projetadas e construídas de modo a manter a função de suportar carregamento durante o período de exposição ao fogo em edifícios destinados à habitação, a uso comercial, industrial e a edifícios públicos. Tem como base o *Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-2: General rules - structural fire design (2002)*⁽⁸⁾, e complementada pelas seguintes normas: *NBR 6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações (1980)*⁽¹⁾; *NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira (1997)*⁽²⁾; *NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações (1988)*⁽³⁾; *NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas (2003)*⁽⁴⁾; *NBR 5628 - Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo (1980)*⁽⁷⁾; *NBR 14432 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações Procedimento (2001)*⁽⁶⁾; *NBR 13860 – Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio (1997)*⁽⁵⁾.

Entende-se por dimensionamento em situação de incêndio a verificação dos elementos estruturais e suas ligações, com ou sem proteção contra incêndio, no que se refere à estabilidade e à resistência aos esforços solicitantes em temperatura elevada, a fim de evitar o colapso da estrutura em um tempo inferior àquele necessário para possibilitar a fuga dos usuários da edificação e, quando necessário, a aproximação e o ingresso de pessoas e equipamentos para as ações de combate ao fogo.

2. Condições básicas para o dimensionamento estrutural

2.1 Valores de projeto de resistência e propriedades do material

As eq. 1 e 2 fixam as propriedades resistentes da madeira em situação de incêndio. Os coeficientes de modificação para incêndio levam em consideração a redução das propriedades de resistência e rigidez a elevadas temperaturas.

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{0,2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (1)$$

$$E_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{E_{0,2}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (2)$$

onde:

$f_{d,fi}$ é a resistência ao fogo de cálculo;

$E_{d,fi}$ é o módulo de elasticidade de cálculo em situação de incêndio;

$f_{0,2}$ é a fração de 20% da propriedade de resistência a temperatura normal;

$E_{0,2}$ é a fração de 20% do módulo de elasticidade a temperatura normal;

$k_{mod,fi}$ é o coeficiente de modificação para incêndio, substitui o fator de modificação a temperatura normal (20^0 C) $K_{mod,fi}$;

$\gamma_{M,fi}$ é o coeficiente de ponderação para madeira em incêndio. O coeficiente de segurança recomendado para as propriedades mecânicas do material é $\gamma_{M,fi} = 1,0$.

Os valores de projeto da resistência mecânica $R_{d,fi}$ devem ser calculados como (eq. 3):

$$R_{d,fi} = \eta \frac{R_{0,2}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (3)$$

onde:

$R_{d,fi}$ são valores projetados de resistência mecânica a um tempo t ;

$R_{0,2}$ é a fração referente a 20% da resistência mecânica a temperatura normal sem o efeito de duração de carga e umidade ($k_{mod,fi} = 1$);

$\gamma_{M,fi}$ é o coeficiente de ponderação para a madeira em situação de incêndio;

η é um coeficiente de ponderação para a perda de capacidade de carregamento em incêndios.

Para pinos metálicos protegidos da exposição direta ao fogo sua resistência mecânica deve ser calculada de acordo com a eq. 3.

Para pinos metálicos cujas distâncias de fixação satisfaçam as eq. 4 e 5, de acordo com a fig. 2, o coeficiente de ponderação η para a perda de resistência em situação de incêndio é dada pela eq. 6.

$$a_2 \geq a_1 + 40, \quad (4)$$

$$a_3 \geq a_1 + 20, \quad (5)$$

Onde:

a_1, a_2, a_3 são medidas em mm;

$$\eta = \begin{cases} 0 & a_1 \leq 0,6t_{fi,d} \\ \frac{0,44a_1 - 0,264t_{fi,d}}{0,2t_{fi,d} + 5} & 0,6t_{fi,d} \leq a_1 \leq 0,8t_{fi,d} + 5 \\ \frac{0,56a_1 - 0,36t_{fi,d} + 7,32}{0,2t_{fi,d} + 23} & 0,8t_{fi,d} + 5 \leq a_1 \leq t_{fi,d} + 28 \\ 1,0 & a_1 \geq t_{fi,d} + 28 \end{cases}, \quad (6)$$

onde:

a_1 medidas em mm;

$t_{fi,d}$ é o tempo de resistência requerido, em minutos.

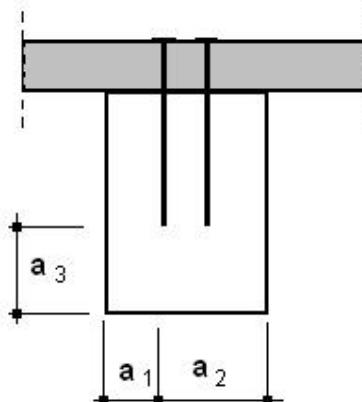


Figura 2– Seção e definição das distâncias.

O coeficiente de ponderação η para pinos metálicos com distâncias $a_2 = a_1$ e $a_3 \geq a_1 + 20\text{mm}$ deve ser calculado em acordo com a eq. 6, sendo $t_{fi,d}$ substituído por $1,25t_{fi,d}$.

Os 20% de fração das propriedades de resistência e rigidez devem ser calculados como (eq. 7 e 8):

$$f_{0,2} = kf_i f_k \quad (7)$$

$$E_{0,2} = kf_i E_{0,05}, \quad (8)$$

kf_i é dado pela tab. 1:

Tabela 1. Valores de kf_i .

Material	kf_i
Madeira serrada	1,25
Madeira Laminada Colada - MLC	1,15
Painéis a base de madeira	1,15
LVL	1,1

A fração de 20% da resistência mecânica de uma conexão deve ser calculada como (eq. 9):

$$R_{0,2} = kf_i R_k, \quad (9)$$

onde:

kf_i é fornecido pela tabela 1;

R_k é a resistência mecânica característica da conexão a temperatura normal sem o efeito de duração de carregamento e umidade ($k_{mod} = 1$).

3. Métodos de verificação

O modelo de sistema estrutural adotado para projeto deve refletir o desempenho da estrutura em situação de incêndio, deve ser verificado para do tempo de exposição ao fogo (t) requerido e se aplica para curvas de temperatura-tempo padronizadas (eq. 10):

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}, \quad (10)$$

onde:

$E_{d,fi}$ é o módulo de elasticidade de cálculo em situação de incêndio;

$R_{d,t,fi}$ são valores projetados de resistência mecânica a um tempo t .

Para a verificação padrão das exigências de resistência a análise de um elemento é suficiente. O efeito da dilatação térmica dos outros materiais que não a madeira devem ser considerados e como alternativa para cálculos, o projeto de incêndio pode ser baseado em resultados de ensaios de incêndio ou em combinação destes com cálculos.

4. Análise dos elementos.

O efeito das ações deve ser determinado para um tempo $t=0$ usando coeficientes de ponderação para valores reduzidos de combinação $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$. Para simplificação do efeito das ações o módulo de elasticidade $E_{d,fi}$ pode ser obtido da análise em temperatura normal (eq. 11):

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d, \quad (11)$$

onde:

E_d é o módulo de elasticidade de cálculo em temperatura normal para combinações das ações;

η_{fi} é o fator de redução para projeto de carregamento em situação de incêndio, conforme as eq. 12-12b.

O fator de redução η_{fi} para combinação de carregamento deve ser tomado como (eq. 12):

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}, \quad (12)$$

Ou a combinação de cargas, como o menor valor dado pelas seguintes eq.12a e 12b:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}, \quad (12a)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}, \quad (12b)$$

onde:

$Q_{k,1}$ é o valor característico da ação acidental;

G_k é o valor característico da ação permanente;

γ_G é o coeficiente de ponderação para ações permanentes;

$\gamma_{Q,1}$ é o coeficiente de ponderação para ação variável 1;

ψ_{fi} é o coeficiente de ponderação para valores reduzidos de combinação;

ξ é o coeficiente de redução para ações permanentes desfavoráveis G.

5. Análise de partes da estrutura

O efeito das ações deve ser determinado para um tempo $t=0$ usando coeficientes de ponderação $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$. Como alternativa para conduzir uma análise estrutural para uma situação de incêndio em um tempo $t=0$, as reações de apoio, forças internas e momentos nas proximidades de parte da estrutura devem ser obtidas a partir de uma análise estrutural global para uma temperatura normal, como dado em análise dos elementos.

Parte da estrutura a ser analisada deve ser citada com base na expansão térmica e deformações tal que sua interação com outras partes da estrutura possam ser aproximadas pelo tempo de suportar carregamento individualmente e condições de contorno durante exposição ao fogo. O modo de colapso por incêndio, as propriedades do material dependentes da temperatura e rigidez do elemento, efeitos da expansão térmica e deformações (ações indiretas ao incêndio) devem ser consideradas.

As condições de contorno e apoios, forças e momentos no contorno de parte da estrutura podem ser assumidas como constante em função do tempo.

6. Análise global da estrutura

A análise global da estrutura para uma situação de incêndio deve considerar:

- 1) O modo de colapso na exposição ao fogo;
- 2) As propriedades do material dependentes da temperatura e a rigidez do elemento estrutural e efeitos de expansão térmica e deformações, ações indiretas ao incêndio.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes e a FAPESP pelo apoio financeiro direcionado à esta pesquisa.

8. Referências bibliográficas

- (1) Associação Brasileira de Normas Técnicas (1980). *NBR 6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro.
- (2) Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). *NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro.
- (3) Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). *NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações*. Rio de Janeiro.
- (4) Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas*. Rio de Janeiro.
- (5) Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). *NBR 13860. Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio*. Rio de Janeiro.
- (6) Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR 14432 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- (7) Associação Brasileira de Normas Técnicas (1980). *NBR 5628 - Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo*. Rio de Janeiro.
- (8) European Committee for Standardization (2002). *Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-2: General rules-Structural fire design*. European Committee for standardization. Brussels.
- (9) Pignatta, V.S. (2001). *Estruturas de Aço em situação de Incêndio*. Ed. Zigurate, São Paulo.
- (10) Schaffer, E.L. (1967). *Charring rate of selected woods-transverse to grain*. FPL. 69. Madison, WI: US Department of agriculture, Forest Products Laboratory.
- (11) White, R.H.; Dietenberger, M.A. (1999). *Fire safety*. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook - wood as an engineering material. Madison, USDA. Cap.17, p.17-1-17-17.
- (12) White, H. R.; Nordheim (1992). *Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure*. Fire technology, v.28, n.1, p.5-27.