

SUBMETIDO 06/04/2022

APROVADO 06/06/2022

PUBLICADO ON-LINE 15/06/2022


PUBLICADO 10/04/2024

EDITOR ASSOCIADO
Andre Luis Christoforo

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6785>

ARTIGO ORIGINAL

Análise numérica termoestrutural de vigas de madeira em situação de incêndio

 Felipi Pablo Damasceno Fernandes ^{[1]*}

 Jorge Munaiar Neto ^[2]

[1] felipi.fernandes@ufrpe.br
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Brasil

[2] jmunaiar@sc.usp.br
Universidade de São Paulo (USP), Brasil

RESUMO: O estudo de elementos estruturais de madeira em situação de incêndio pode ser feito por meio de análises experimentais, teóricas e numéricas, sendo a última uma solução mais econômica e em que é possível considerar não linearidades do material. Nas modelagens numéricas de elementos de madeira, é importante a correta consideração do modelo constitutivo e de sua ortotropia. Ademais, nas análises termoestruturais, é essencial considerar a redução das propriedades mecânicas da madeira com a elevação da temperatura. Assim, este trabalho foi desenvolvido no ABAQUS, um modelo numérico para representar vigas de madeira em situação de incêndio. Constatou-se que o modelo numérico foi capaz de representar com precisão o comportamento termoestrutural de vigas de madeira em situação de incêndio. A partir do modelo numérico validado foram realizados estudos paramétricos, sendo constatado que o fator de carregamento apresenta uma relação quadrática com o tempo de resistência ao fogo, enquanto a largura da seção transversal da viga apresenta uma relação cúbica com o tempo de resistência ao fogo. Foi observado também que diferentes formas de aquecimento interferem no comportamento das curvas de deslocamento vertical em função do tempo de incêndio das vigas de madeira submetidas ao fogo.

Palavras-chave: ABAQUS; comportamento termoestrutural; estruturas de madeira; resistência ao fogo.

Thermostructural numerical analysis of wooden beams in fire situation

ABSTRACT: *The study of structural timber elements in a fire can be done by means of experimental, theoretical or numerical analysis, the latter being a more economical solution and in which is possible to consider materials nonlinearity. In the numerical model of timber elements, it is important to correctly consider the timber's constitutive model and its orthotropy. Furthermore, in fire situation analysis, it is essential to consider the timber mechanical properties reduction with temperature elevation. Thus, this paper presents a numerical strategy on ABAQUS to simulate the behavior of timber beams in a fire situation. It was*

*Autor para correspondência.

found that the numerical model was able to accurately represent the thermo-structural behavior of timber beams in a fire situation. From the validated numerical model, parametric studies were carried out. It was found that the loading factor presents a quadratic relationship with the fire resistance and that the width of the beam cross section presents a cubic relationship with the fire resistance. It was also observed that different ways of heating interfere in the behavior of the vertical displacement versus fire time curves of timber beams in fire.

Keywords: ABAQUS; fire resistance; thermo-structural behavior; timber structures.

1 Introdução

A madeira é um excelente material para a construção de estruturas, tanto para prédios comerciais quanto para os residenciais, devido às suas variadas qualidades, podendo ser destacadas: i) é um material com apelo sustentável, visto que é renovável, proporciona a construção de edifícios eficientes energeticamente e sua produção gera menos impactos ao ambiente quando comparada à produção do aço e do concreto; ii) possui elevada relação resistência/densidade, ou seja, é um material leve e com elevada resistência mecânica; iii) permite a construção de elementos com várias formas; iv) há a possibilidade de usar a madeira como elemento decorativo (Fragiacomo *et al.*, 2018; López-Almansa; Segué; Cantalapiedra, 2015; Yeoh *et al.*, 2011).

Entretanto, de acordo com Östman, Brandon e Frantzich (2017), o fato de a madeira ser um material combustível faz com que os códigos normativos de alguns países limitem o seu uso em estruturas, principalmente em prédios mais altos. Por essa razão, estudos acerca da madeira em situação de incêndio estão sendo desenvolvidos para possibilitar o seu uso de forma segura.

Há, por exemplo, estudos sobre a variação das propriedades mecânicas da madeira com a variação da temperatura (Figueroa; Moraes, 2016; Figueroa; Moraes; Maestri, 2015; Schneid; Moraes, 2017; Young; Clancy, 2001), sobre o comportamento termoestrutural de vigas de madeira maciças e vigas de Madeira Lamelada Colada – MLC (Chen *et al.*, 2017; Fahrni *et al.*, 2019; Kinjo *et al.*, 2016; Martins, 2016; Zhang *et al.*, 2012), sobre o desempenho termoestrutural de pisos mistos de madeira e concreto (Du *et al.*, 2021; Frangi; Knobloch; Fontana, 2010; Meena; Schollmayer; Tannert, 2014; Molina; Calil Junior, 2018; O’Neill *et al.*, 2011; Shephard *et al.*, 2021) e sobre peças de Madeira Lamelada Colada Cruzada (*Cross Laminated Timber – CLT*) em situação de incêndio (Fragiacomo *et al.*, 2013; Muszynski *et al.*, 2019; Suzuki *et al.*, 2016). Boa parte dessas referências consiste em análises experimentais em situação de incêndio. Tais análises são fundamentais nos estudos dos elementos estruturais submetidos a temperaturas elevadas, no entanto, consomem bastante tempo e recursos financeiros. Outra alternativa para o estudo de elementos estruturais de madeira em situação de incêndio é o emprego de análises teóricas ou numéricas.

Com relação ao emprego de modelos teóricos, pode-se destacar o método da seção transversal reduzida, recomendado pela norma europeia EN-1995-1-2 (CEN, 2004). Tal método adota uma seção transversal efetiva, com as propriedades da madeira em temperatura ambiente, isto é, das dimensões da seção transversal são reduzidas uma camada que considera a madeira carbonizada e uma outra camada, denominada de resistência nula, que leva em conta a perda de resistência e de rigidez da madeira aquecida. Entretanto, de acordo com Schmid *et al.* (2014), esse modelo pode não ser

capaz de representar corretamente o comportamento de elementos de madeira aquecida submetidos à flexão, sendo mais apropriado para a análise de estruturas de madeira tracionadas em situação de incêndio.

As análises numéricas consistem em uma alternativa menos custosa, quando comparadas aos estudos experimentais, e permitem avaliar diversos parâmetros de interesse nas análises termoestruturais, além de ser possível a consideração de particularidades dos materiais, como as não linearidades físicas e a variação de propriedades físicas e mecânicas em função da temperatura. Os estudos numéricos geralmente levam em consideração os estudos experimentais para a sua validação.

Algumas análises numéricas em estruturas de madeira foram realizadas para a determinação do campo térmico das estruturas. Em Werther *et al.* (2012), foram utilizados três programas de elementos finitos (ABAQUS, ANSYS e SAFIR) para desenvolver uma modelagem térmica de elementos de madeira em situação de incêndio. Foi observado que as temperaturas obtidas numericamente pelos três programas encontravam-se próximas às temperaturas medidas experimentalmente, comprovando que eles são aplicáveis na análise térmica de estruturas de madeira. Além disso, a pesquisa recomenda que o passo de tempo na simulação numérica seja inferior a 120 segundos e que seja adotada malha de elementos finitos entre 1 mm e 6 mm.

No trabalho de Molina e Calil Junior (2018), foi realizada a simulação térmica de uma seção transversal mista de madeira e concreto submetida ao incêndio no programa ANSYS. Os autores relataram que a variação da temperatura com o tempo de incêndio na seção transversal mista de madeira e concreto obtida através do modelo numérico apresentou boa correlação com a variação de temperatura em função do tempo de incêndio medida experimentalmente.

Foram desenvolvidos também alguns trabalhos para simular o comportamento termoestrutural de elementos de madeira submetidos à flexão em situação de incêndio. Uma estratégia de modelagem numérica tridimensional para simular o comportamento de vigas mistas de madeira e concreto em situação de incêndio foi desenvolvida em O'Neill *et al.* (2014) utilizando o programa ABAQUS. Nesse trabalho, foi adotado como modelo constitutivo para a madeira o *Concrete Damaged Plasticity*, o qual está disponível na biblioteca de materiais do programa. De acordo com o manual do ABAQUS, esse modelo utiliza conceitos de dano elástico isotrópico, juntamente com a plasticidade isotrópica de tração e compressão, para representar o comportamento inelástico do concreto. Esse modelo assume dois modos de ruptura: fratura na tração e esmagamento na compressão. Como resultado, O'Neill *et al.* (2014) relataram boa concordância entre as curvas numéricas e experimentais de deslocamento vertical em função do tempo de incêndio.

Assim como O'Neill *et al.* (2014), Martins (2016) utilizou o modelo *Concrete Damaged Plasticity* para simular o comportamento termoestrutural de vigas de MLC de duas espécies: *Lyptus* e *Pinus*. Foi observado que os resultados numéricos ficaram próximos aos experimentais para a viga de *Lyptus*, enquanto as deformações apresentadas pela viga de *Pinus* na análise experimental foram superiores às deformações obtidas na análise numérica.

Du, Hu e Zhang (2018) utilizaram o programa ANSYS para simular o campo térmico e o comportamento termoestrutural de vigas mistas de madeira e concreto. As propriedades mecânicas e térmicas da madeira variaram de acordo com as recomendações do EN-1995-1-2 (CEN, 2004). O trabalho mostrou boa aproximação entre resultados numéricos e experimentais, tanto em relação ao campo térmico como em relação a curva

tempo versus deslocamentos verticais. Entretanto, não foram apresentados muitos detalhes sobre os modelos constitutivos adotados para os materiais componentes do sistema.

Ao avaliarem numericamente ligações mistas de madeira e concreto em temperatura ambiente, Dias *et al.* (2007) e Molina e Calil Junior (2009) constataram que a consideração da ortotropia da madeira é essencial na obtenção de bons resultados.

Dessa forma, considerando o exposto, neste trabalho foi estabelecida uma estratégia de modelagem numérica tridimensional para simular o comportamento termoestrutural de vigas de madeira em situação de incêndio. Diferentemente do que se encontrou na literatura, em que foi frequente a simulação termoestrutural da madeira através do modelo *Concrete Damaged Plasticity*, o qual desconsidera a ortotropia do material, o modelo numérico desenvolvido nesta pesquisa empregou o critério ortotrópico de Hill, o qual é comumente empregado em simulações estruturais desse tipo de material em temperatura ambiente. A partir da estratégia validada, foram realizados estudos paramétricos para melhor compreender o comportamento em incêndio de vigas de madeira. Foi avaliada a influência de diferentes situações de aquecimento do elemento estrutural, bem como foram determinadas curvas de tendência que correlacionam a largura da seção com o tempo de resistência ao fogo, como também o nível de carregamento com o tempo de resistência ao fogo.

Na seção 2, é apresentada a metodologia empregada no desenvolvimento desta pesquisa, sendo detalhada a estratégia de modelagem numérica termoestrutural desenvolvida. Na seção 3, são apresentados os resultados obtidos, bem como a discussão sobre eles. Por fim, na seção 4, são apresentadas as conclusões obtidas com este estudo.

2 Método da pesquisa

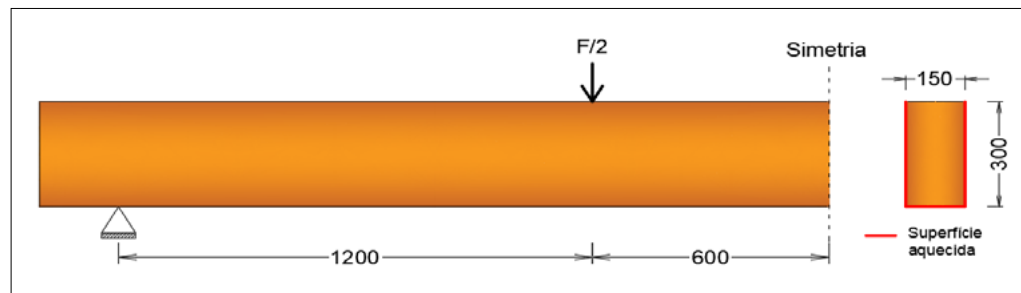
O modelo numérico desenvolvido no ABAQUS consiste em uma simulação tridimensional acoplada sequencialmente de temperatura e tensões. Dessa forma, as análises elaboradas foram divididas em duas etapas. A primeira consistiu em uma análise térmica, na qual foram obtidas as temperaturas nodais para o elemento estrutural em estudo. Na segunda etapa, foram realizadas análises termoestruturais utilizando como dados de entrada as temperaturas nodais obtidas na etapa anterior. Neste tópico, são apresentadas informações acerca das estratégias de modelagem empregadas.

2.1 Configuração de referência

A validação da estratégia de modelagem numérica para vigas de madeira em situação de incêndio foi realizada a partir do trabalho experimental apresentado em Zhang *et al.* (2012). O elemento modelado consistiu em uma viga de madeira da espécie *Douglas fir* com densidade igual a 520 kg/m³, resistência à compressão paralela às fibras igual a 32,4 MPa e módulo de elasticidade paralelo às fibras igual a 10155 MPa. O elemento estrutural analisado tinha largura igual a 150 mm, altura igual a 300 mm e comprimento igual a 4000 mm, sendo o vão entre os apoios igual a 3600 mm.

Na análise experimental em situação de incêndio, a viga foi submetida à curva de incêndio padrão da ISO 834-1:1999 (ISO, 1999) nas duas faces laterais e na face inferior, permanecendo a superfície superior isolada termicamente por meio de revestimento com fibra cerâmica (Figura 1).

Figura 1 ►
Configuração do modelo.
Fonte: elaborada
pelos autores



Previamente ao início do incêndio, a viga foi submetida a um carregamento total F igual a 37,3 kN, aplicado nos terços dos vãos, conforme esquema apresentado na Figura 1, permanecendo esse valor constante durante o ensaio termoestrutural. Tal valor corresponde a 50% da força de ruptura em temperatura ambiente obtida experimentalmente através de uma viga com as mesmas características. O ensaio foi finalizado quando não foi mais possível manter constante o carregamento aplicado.

No modelo numérico desenvolvido, foi levada em consideração a simetria ao longo do comprimento da viga, sendo simulada apenas metade desta. Para evitar problemas de convergência no modelo termoestrutural, foram utilizadas, nas regiões do apoio e de aplicação de força, placas de aço para a distribuição das tensões, com 50 mm de altura, 200 mm de comprimento e 150 mm de largura. Como as temperaturas nodais são transferidas do modelo térmico para o modelo termoestrutural, é essencial a representação dessas placas não somente no modelo termoestrutural, mas também no modelo térmico.

2.2 Modelo térmico

Nesta seção são apresentados detalhes sobre o modelo numérico térmico, tais como: malha de elementos finitos, propriedades térmicas da madeira e carregamentos e condições de contorno.

2.2.1 Malha de elementos finitos

A viga de madeira foi modelada a partir de elementos finitos do tipo DC3D8, os quais consistem em elementos tridimensionais com oito nós e interpolação linear próprios para análises de transferência de calor. As dimensões dos elementos finitos foram determinadas a partir de um estudo de malha, levando também em consideração as recomendações apresentadas em Werther *et al.* (2012) para que as dimensões dos elementos finitos na seção transversal se situem entre 1 mm e 6 mm. Dessa forma, foram adotados elementos finitos com comprimento de aproximadamente 100 mm e seção transversal quadrada com lados iguais a 5 mm. No total, foram empregados 37.200 elementos finitos para representar a madeira e as placas de distribuição de tensões.

2.2.2 Propriedades térmicas da madeira

Nas simulações numéricas térmicas, é fundamental a definição de três propriedades dos materiais: massa específica, condutividade térmica e calor específico. A variação da temperatura nos elementos estruturais provoca mudanças físico-químicas nos materiais,

tendo como consequência a modificação dessas propriedades térmicas. Assim, a definição das propriedades térmicas nas simulações numéricas, bem como a sua variação com a temperatura, foi adotada a partir do EN-1995-1-2 (CEN, 2004). As variações do calor específico e da condutividade térmica com a temperatura são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 2 e 3, enquanto a razão entre a densidade da madeira em temperatura elevada e a densidade da madeira em temperatura ambiente, considerando umidade igual a 12%, é apresentada na Figura 4.

Figura 2 ►

Varição da condutividade térmica da madeira com a temperatura.
 Fonte: CEN (2004)

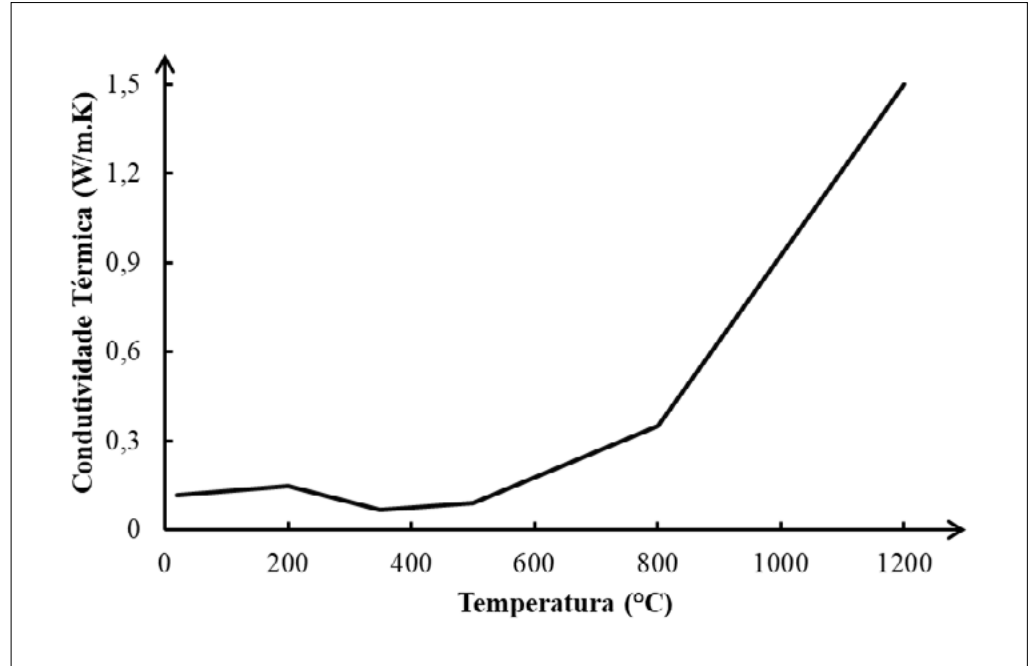


Figura 3 ►

Varição do calor específico da madeira com a temperatura.
 Fonte: CEN (2004)

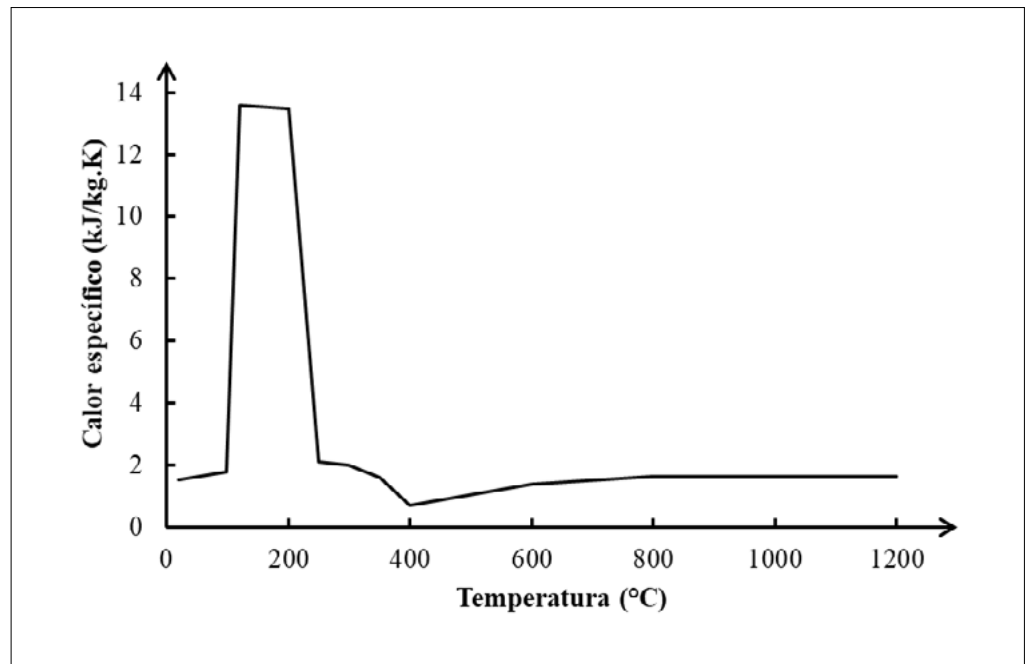
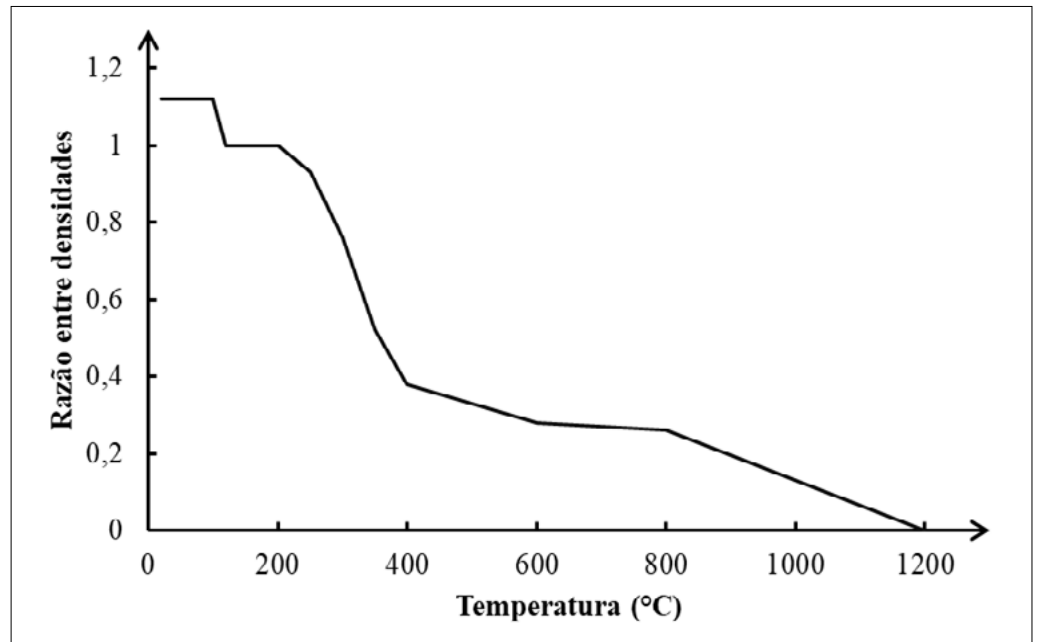


Figura 4 ►

Varição da razão entre o peso específico da madeira em determinada temperatura e o seu peso específico a 20 °C.
Fonte: CEN (2004)



2.2.3 Carregamento e condições de contorno

Para a simulação térmica, é considerado apenas o carregamento térmico a que a viga de madeira está submetida nas duas faces laterais e na face inferior. Tal carregamento é relativo ao fogo, representado pela curva de incêndio-padrão da ISO 834-1:1999 (ISO, 1999), indicada na Equação (1), sendo θ_g a temperatura dos gases (°C) no instante t (minutos), e $\theta_{g,0}$ a temperatura dos gases no ambiente antes do início do incêndio (°C), normalmente igual a 20 °C.

$$\theta_g = 345 \log_{10}(8t + 1) + \theta_{g,0} \quad (1)$$

A transferência de calor entre o fogo e o elemento estrutural ocorre principalmente de duas formas: por convecção e por radiação. Para levar em conta a convecção no modelo numérico, foi definido um coeficiente de troca de calor por convecção igual a 25 W/(m².°C), enquanto para considerar a troca de calor por radiação, foi definida emissividade igual a 0,8, conforme recomendações do EN 1991-1-2 (CEN, 2002). Como, durante a análise experimental, a superfície superior foi isolada termicamente através de revestimento com manta cerâmica, na simulação térmica não foi considerada a troca de calor com o ambiente por essa superfície.

2.3 Modelo termoestrutural

Nesta seção são apresentados detalhes sobre o modelo numérico termoestrutural, tais como: malha de elementos finitos, modelo constitutivo da madeira, carregamentos e condições de contorno e considerações sobre a análise numérica não linear e sobre a ruptura do elemento estrutural.

2.3.1 Malha de elementos finitos

Para a análise termomecânica foram mantidas as dimensões dos elementos finitos empregados na simulação térmica, havendo, entretanto, mudança do tipo de elemento. Nesse caso, foram utilizados os elementos C3D8, os quais consistem em elementos finitos com oito nós e interpolação linear destinados a análises de tensões em problemas tridimensionais.

2.3.2 Modelo constitutivo da madeira

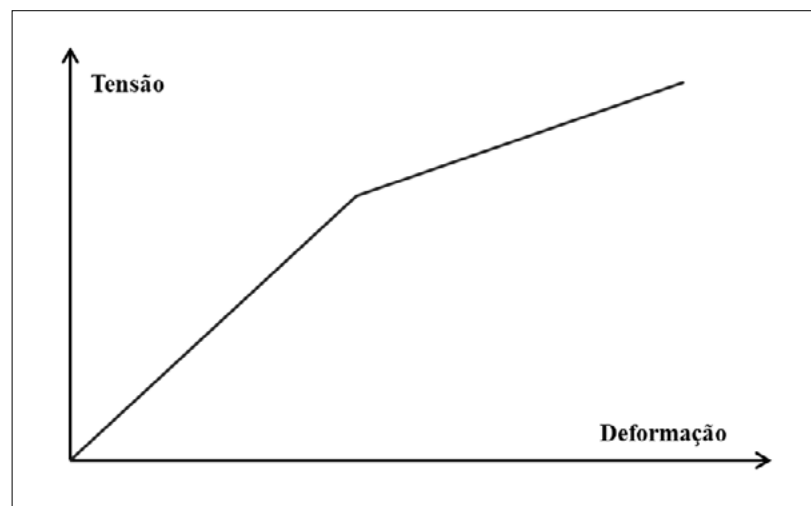
Nas simulações termomecânicas, faz-se necessária a definição dos modelos constitutivos dos materiais, bem como a variação das suas propriedades mecânicas com a elevação da temperatura. A madeira é um material ortotrópico, sendo caracterizada pelas direções longitudinal, radial e tangencial. Na simulação numérica, as direções longitudinal, radial e tangencial são, respectivamente, as direções X (1), Y (2) e Z (3). Cada uma das direções apresenta propriedades mecânicas distintas das outras, além de o comportamento à compressão diferir do comportamento à tração em uma mesma direção.

Por simplificação, admitiu-se nas simulações realizadas que as propriedades da madeira nas direções radial e tangencial são iguais, bem como que o comportamento à tração é equivalente ao comportamento à compressão. Foi empregado um modelo de material elastoplástico ortotrópico com curva bilinear (Figura 5) associado ao critério de resistência de Hill (Hill, 1948), o qual consiste em uma extensão do critério de von Mises para aplicação em materiais anisotrópicos, e cuja função de plastificação está indicada na Equação 2.

Figura 5 ►

Modelo constitutivo bilinear da madeira.

Fonte: elaborado pelos autores



$$f(\sigma)^2 = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 \quad (2)$$

Na Equação (2), F , G , H , L , M e N são constantes definidas de acordo com as Equações (3) a (8), respectivamente, sendo σ_0 uma tensão de referência, adotada como sendo a resistência à compressão paralela às fibras, σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} são as resistências à

compressão perpendiculares às fibras da madeira e σ_{12} , σ_{13} e σ_{23} são as resistências ao cisalhamento da madeira nos planos 1-2, 1-3 e 2-3, respectivamente.

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{(\sigma_{22}/\sigma_0)^2} + \frac{1}{(\sigma_{33}/\sigma_0)^2} - \frac{1}{(\sigma_{11}/\sigma_0)^2} \right) \quad (3)$$

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{(\sigma_{33}/\sigma_0)^2} + \frac{1}{(\sigma_{11}/\sigma_0)^2} - \frac{1}{(\sigma_{22}/\sigma_0)^2} \right) \quad (4)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{(\sigma_{11}/\sigma_0)^2} + \frac{1}{(\sigma_{22}/\sigma_0)^2} - \frac{1}{(\sigma_{33}/\sigma_0)^2} \right) \quad (5)$$

$$L = \frac{3}{2(\sqrt{3}\sigma_{23}/\sigma_0)^2} \quad (6)$$

$$M = \frac{3}{2(\sqrt{3}\sigma_{13}/\sigma_0)^2} \quad (7)$$

$$N = \frac{3}{2(\sqrt{3}\sigma_{12}/\sigma_0)^2} \quad (8)$$

A relação entre a resistência à compressão perpendicular à fibra da madeira ($\sigma_{90} = \sigma_{22} = \sigma_{33}$) e a resistência à compressão paralela às fibras (tensão de referência) foi definida no EN 338 (CEN, 2009), sendo o valor indicado na Equação (9), enquanto a relação entre a resistência ao cisalhamento da madeira ($\sigma_v = \sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma_{23}$) e a resistência à compressão paralela às fibras (tensão de referência) foi definida a partir da NBR 7190 (ABNT, 1997), estando o valor indicado na Equação 10.

$$\frac{\sigma_{90}}{\sigma_0} = 0,12 \quad (9)$$

$$\frac{\sqrt{3}\sigma_v}{\sigma_0} = 0,25 \quad (10)$$

Para caracterizar o comportamento elástico ortotrópico da madeira, foi necessário definir os módulos de elasticidade, os módulos de elasticidade transversal e os coeficientes de Poisson nas direções longitudinal, radial e transversal. As relações entre esses parâmetros foram obtidas a partir da EN 338 (CEN, 2009) e de Molina e Calil Junior (2009) e são apresentadas nas Equações (11) a (14):

$$E_2 = E_3 = \frac{E_1}{30} \quad (11)$$

$$G_{12} = G_{13} = G_{23} = \frac{E_1}{16} \quad (12)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = 0,013 \quad (13)$$

$$\nu_{23} = 0,23 \quad (14)$$

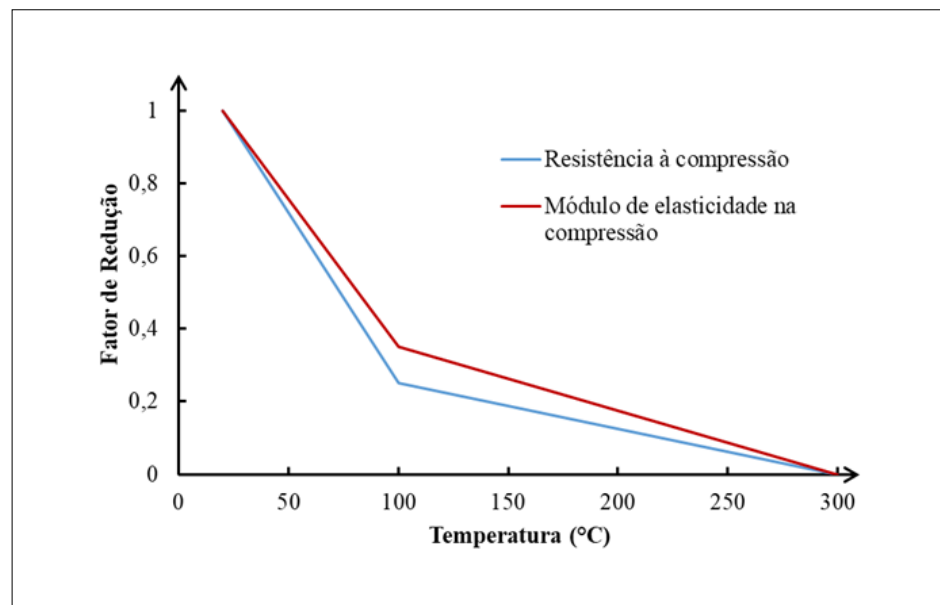
Nas Equações (11) a (14), E_1 , E_2 , E_3 representam, respectivamente, os módulos de elasticidade nas direções longitudinal, radial e tangencial, G_{12} , G_{13} , G_{23} os módulos de elasticidade transversal nos planos 1-2, 1-3 e 2-3, respectivamente, e ν_{12} , ν_{13} e ν_{23} os coeficientes de Poisson nos planos 1-2, 1-3 e 2-3, respectivamente.

Para levar em consideração a redução das propriedades mecânicas da madeira com a elevação da temperatura, foram adotados os coeficientes de redução para o módulo de elasticidade na compressão e para a resistência à compressão indicados pelo EN-1995-1-2 (CEN, 2004), apresentados na Figura 6. De acordo com essa norma, para temperaturas superiores a 300 °C, o módulo de elasticidade e a resistência à compressão da madeira são nulos. Como o programa não permite valores nulos para essas propriedades, os valores em temperatura ambiente foram multiplicados por 10^{-5} a partir dos 300 °C. Deve-se destacar que as relações entre as resistências indicadas nas Equações (9) e (10), bem como as relações entre os módulos de elasticidade indicados nas Equações (11) e (12), foram mantidas constantes durante a simulação, ou seja, não variaram com a elevação da temperatura da madeira.

Figura 6 ►

Fatores de redução da resistência e do módulo de elasticidade na compressão da madeira em função da temperatura.

Fonte: CEN (2004)



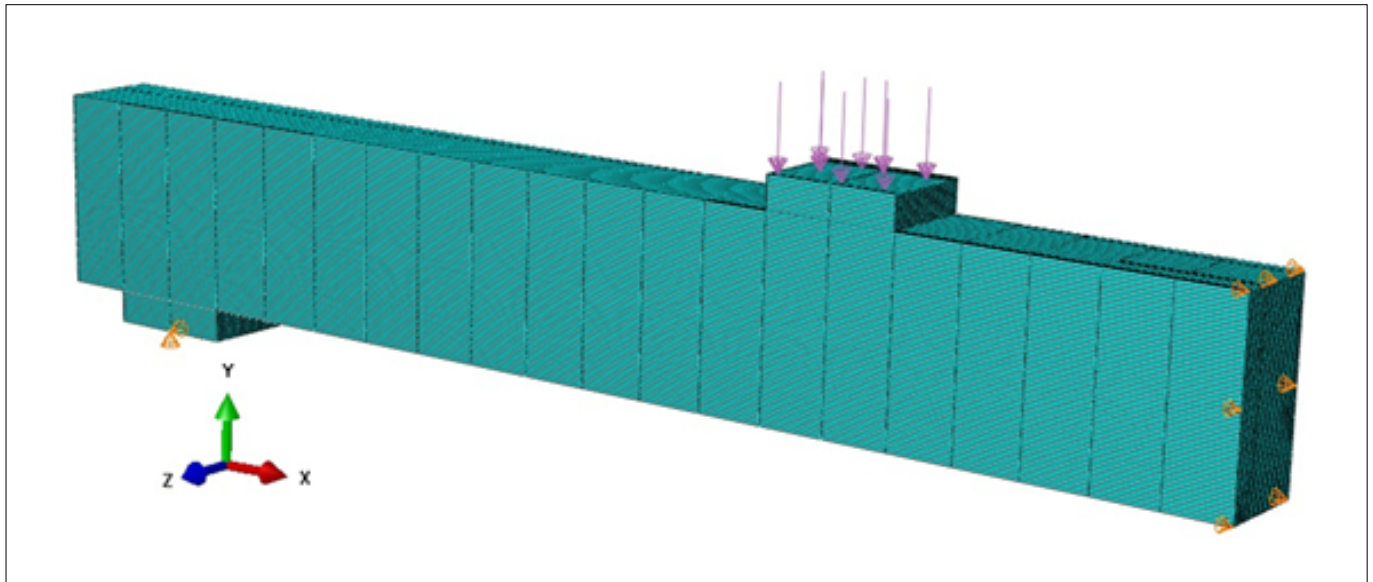
2.3.3 Carregamento e condições de contorno

O carregamento pode ser dividido em duas parcelas: uma estrutural e outra térmica. A força externa foi aplicada por meio de uma pressão de 0,622 N/mm² na placa de carregamento, correspondendo a $F/2 = 18,65$ kN. O carregamento térmico corresponde

às temperaturas nodais obtidas na simulação térmica, as quais são aplicadas ao modelo como dados de entrada.

Figura 7 ▼
Modelo numérico termoestrutural.
Fonte: elaborada pelos autores

As condições de contorno são referentes à restrição de deslocamentos. No apoio, há restrição de translação nas direções Y e Z, enquanto no meio do vão são aplicadas as condições de simetria, restringindo-se os deslocamentos na direção X. Na Figura 7 é apresentada a configuração do modelo termoestrutural, com carregamento aplicado, condições de contorno e sistema de coordenadas.



Para garantir a interação entre o apoio e a viga e entre a placa de carregamento e a viga durante a simulação numérica, foi utilizado o comando *Tie*, fazendo, portanto, com que os elementos fossem rigidamente conectados.

2.3.4 Considerações sobre a análise numérica não linear

A simulação numérica foi feita em dois passos. No primeiro passo foi aplicado o carregamento mecânico, sendo os incrementos inicial e máximo iguais a 0,1 e o incremento mínimo igual a 0,01. No segundo passo, a força aplicada foi mantida e foi adicionado o carregamento térmico, por meio das temperaturas nodais obtidas na simulação térmica, com incremento inicial igual a 60 segundos, incremento mínimo igual a 30 segundos e incremento máximo igual a 120 segundos.

2.3.5 Considerações sobre a ruptura do elemento estrutural

Para a determinação da ruptura do elemento estrutural são aplicados dois critérios. No primeiro critério, o tempo de resistência ao fogo é definido quando o modelo numérico não é mais capaz de convergir. O segundo critério segue a indicação da NBR 5628 (ABNT, 2001a), em que se considera que o elemento estrutural atingiu o estado limite último por deformação excessiva quando o deslocamento vertical ultrapassa 1/30 do comprimento do vão livre.

2.4 Estudo paramétrico

A partir do modelo numérico validado, foi desenvolvido um estudo paramétrico para avaliar a influência do fator de carregamento, da largura da seção transversal e das situações de aquecimento no comportamento termoestructural de vigas de madeira. Para o fator de carregamento e para a largura da seção transversal, foram determinadas linhas de tendência correlacionando cada um desses fatores com o tempo de resistência ao fogo do elemento estrutural.

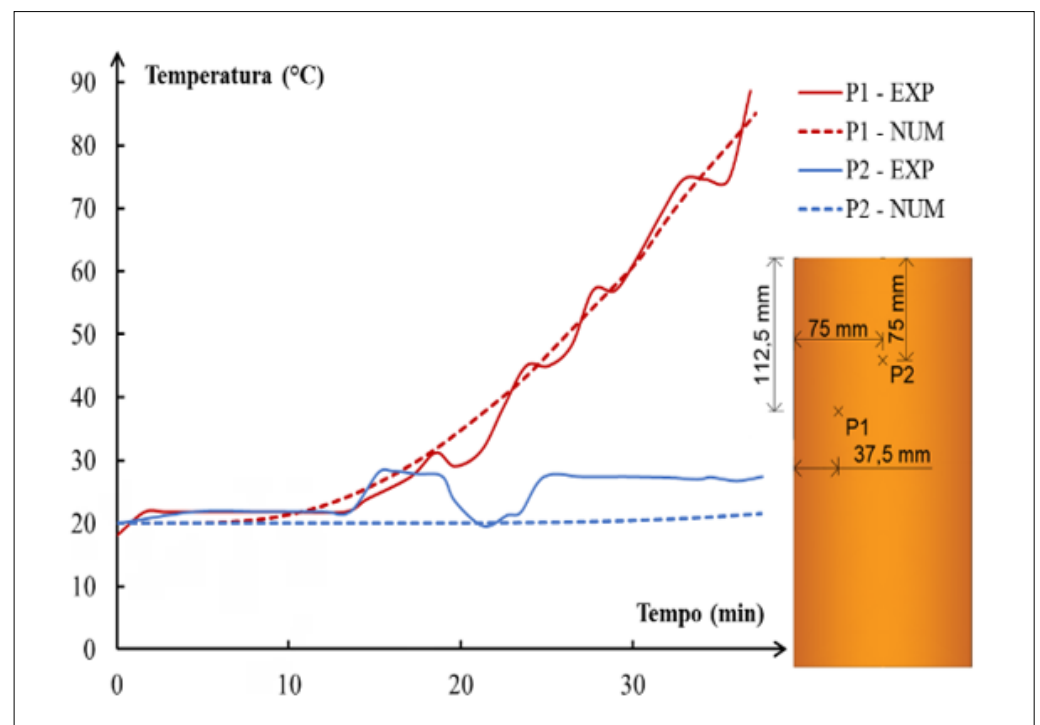
3 Resultados e discussões

Nesta seção, são apresentados os resultados desta pesquisa. Primeiramente, são comparados os resultados obtidos através do modelo numérico desenvolvido com os resultados experimentais obtidos por Zhang *et al.* (2012). Em seguida, é realizada uma análise das tensões longitudinais no elemento estrutural. Por fim, são apresentados os resultados dos estudos paramétricos.

3.1 Temperaturas obtidas e gradientes térmicos

A Figura 8 ilustra uma comparação entre as curvas de temperatura em função do tempo de exposição ao fogo obtidas experimentalmente por Zhang *et al.* (2012) e através do modelo numérico desenvolvido neste trabalho. Para o ponto P1, situado mais ao exterior da seção transversal, é possível observar que as curvas numérica e experimental se encontram bem próximas durante os 37 minutos de incêndio. Ao final do tempo, foi observado que a temperatura numérica no ponto P1 apresentou valor aproximadamente 4% inferior ao valor observado experimentalmente.

Figura 8 ►
Comparação entre as temperaturas medidas experimentalmente e as obtidas pelo método numérico.
Fonte: dados da pesquisa



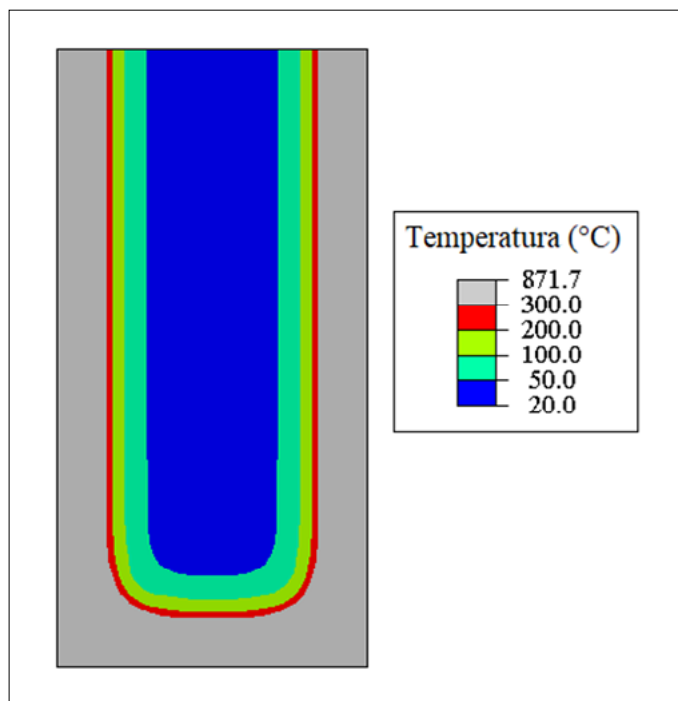
As temperaturas obtidas numericamente para o ponto P2, que está situado no meio da largura da seção transversal, praticamente não apresentaram elevação com a simulação da situação de incêndio. O modelo numérico não foi capaz de representar o crescimento e a diminuição da temperatura nesse ponto observado experimentalmente entre 15 e 25 minutos de incêndio. Ao final dos 37 minutos de incêndio, a temperatura fornecida pelo ABAQUS para o ponto P2 foi aproximadamente 22% inferior à observada experimentalmente. Ressalta-se que essa diferença relativa equivale a uma diferença absoluta de apenas 6 °C, o que não deve influenciar no modelo termoestrutural, visto que essa variação de temperatura não representa uma grande variação das propriedades mecânicas da madeira.

As diferenças observadas entre o modelo numérico e a análise experimental podem ser explicadas pelas simplificações do modelo ao se adotar os valores de densidade, condutividade térmica e calor específico recomendados pelo EN-1995-1-2 (CEN, 2004). De acordo com Cachim e Franssen (2009), as propriedades térmicas apresentadas pela norma europeia são propriedades equivalentes, que levam em conta, implicitamente, fenômenos como: i) a abertura de rachaduras na camada carbonizada; ii) transferência de massa na estrutura; iii) reações exotérmicas devidas à carbonização da madeira. Dessa forma, como esses fenômenos não são levados em conta explicitamente no modelo numérico, as temperaturas numéricas podem diferir das temperaturas experimentais. Entretanto, apesar das diferenças obtidas, julgou-se que o modelo térmico representou com boa aproximação as temperaturas na viga de madeira, podendo ser aplicado nas análises termoestruturais.

Na Figura 9 é apresentado o perfil de temperatura da viga de madeira após 37 minutos de incêndio. Levando em conta a recomendação do EN-1995-1-2 (CEN, 2004) de considerar que a carbonização da madeira ocorre quando esta atinge 300 °C, a região em cinza na Figura 9 representa a área de madeira carbonizada. O modelo numérico indicou espessura de madeira carbonizada igual a 23,75 mm em cada lateral da seção transversal, enquanto a região inferior apresentou camada carbonizada igual a 23,85 mm. Considerando o tempo de incêndio igual a 37 minutos, a taxa de carbonização média da viga foi de 0,64 mm/min.

Figura 9 ►

Perfil de temperatura para tempo de incêndio igual a 37 minutos.
Fonte: dados da pesquisa



Outro fator que pôde ser observado no perfil de temperatura apresentado na Figura 9 é o arredondamento das quinas inferiores da seção transversal da viga de madeira. Segundo Martins (2016), isso ocorre porque na região há a superposição dos fluxos de calor vindos da lateral e da região inferior da viga, fazendo com que a temperatura na região se eleve mais rapidamente, acelerando, dessa forma, a carbonização da madeira e gerando o arredondamento das quinas.

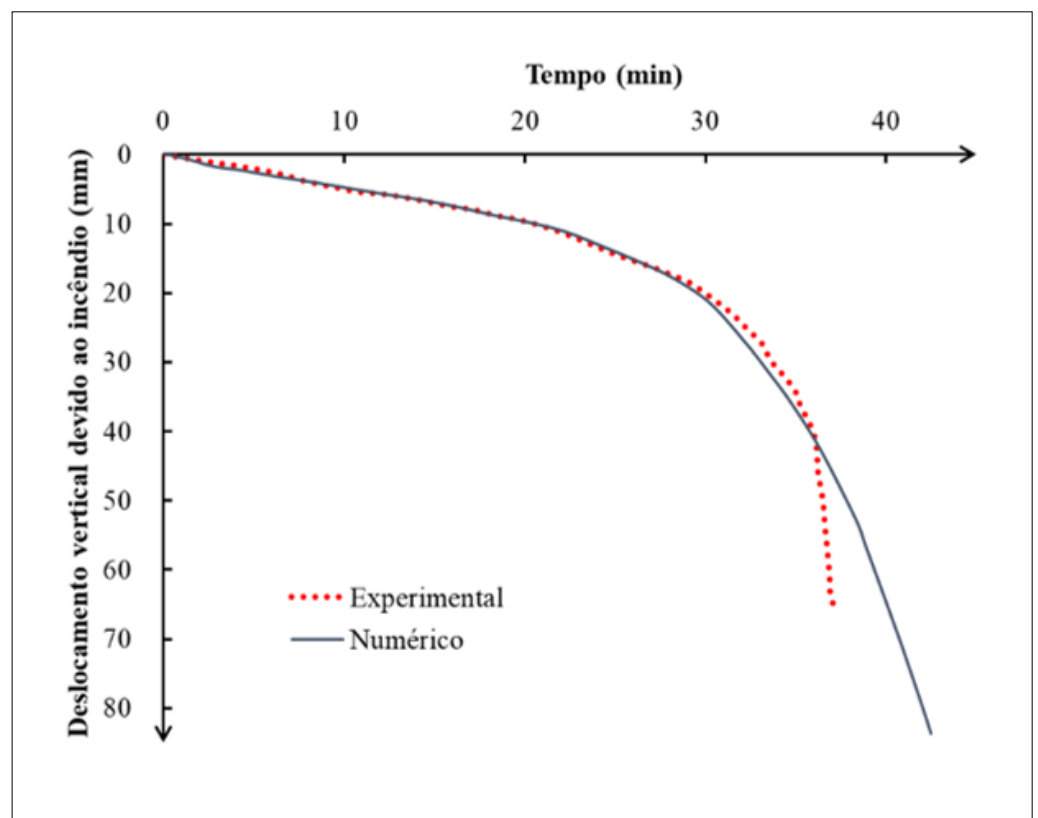
Por meio da Figura 9 ainda é possível observar que a temperatura na região mais interna da seção transversal se encontra na faixa entre 20 °C e 50 °C. Há uma seção residual com aproximadamente 60 mm de largura e 255 mm de altura. Nessa região, a madeira mantém suas propriedades mecânicas em temperatura ambiente quase que integralmente. Em volta da seção residual há uma faixa com aproximadamente 20 mm de espessura com temperatura variando entre 50 °C e 300 °C, na qual, conseqüentemente, a madeira tem as propriedades mecânicas bastante reduzidas.

3.2 Deslocamentos verticais

Na Figura 10, são comparadas as curvas de deflexão no meio do vão em função do tempo de incêndio obtidas experimentalmente por Zhang *et al.* (2012) e por meio da simulação numérica desenvolvida neste trabalho. É possível observar que as curvas apresentam boa concordância até aproximadamente 36 minutos de incêndio. Após esse instante, a deflexão experimental cresce rapidamente até os 37 minutos, atingindo aproximadamente 65 mm, momento em que ocorre a ruptura da viga.

Figura 10 ►

Curvas deslocamento vertical devido ao incêndio versus tempo de incêndio.
Fonte: dados da pesquisa



Os deslocamentos obtidos numericamente crescem um pouco mais lentamente quando comparados aos resultados experimentais, até os 42 minutos, atingindo,

nesse instante, aproximadamente 83 mm, momento em que o modelo numérico não converge mais, sendo esse considerado o tempo numérico de resistência ao fogo da viga. O tempo de resistência ao fogo em contexto numérico resulta aproximadamente 13,5% superior ao tempo de resistência ao fogo experimental e o deslocamento vertical final previsto pelo modelo numérico é aproximadamente 27,7% superior ao apresentado na análise experimental.

Comparando a estratégia de modelagem numérica desenvolvida nesta pesquisa com o modelo numérico apresentado em Zhang *et al.* (2012), é possível observar que a simulação numérica aqui apresentada foi capaz de representar melhor o comportamento da curva de deslocamento vertical em função do tempo de incêndio. Além disso, o tempo de resistência ao fogo obtido na simulação de Zhang *et al.* (2012) apresenta uma maior diferença em relação ao experimental, sendo esse último 18% inferior ao valor previsto no modelo numérico.

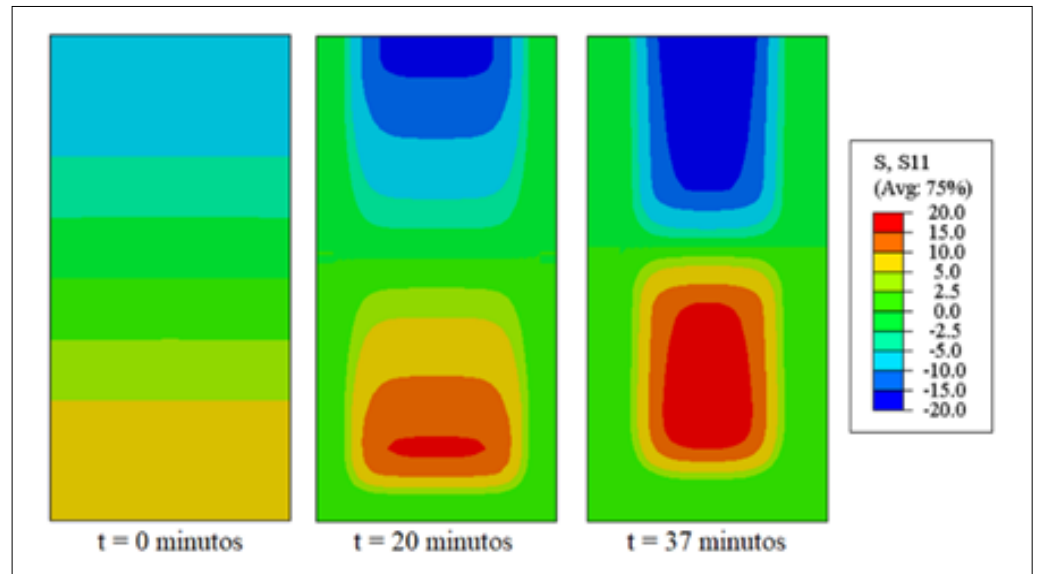
De acordo com Molina e Calil Junior (2009), diferenças entre o modelo numérico e a análise experimental podem estar associadas ao modelo constitutivo utilizado para a madeira na simulação numérica. Tal modelo representa de forma simplificada o comportamento da madeira, visto que considera o comportamento na tração igual ao comportamento na compressão, quando, na realidade, o comportamento da madeira na tração é frágil e na compressão é elastoplástico. Além disso, em Zhang *et al.* (2012) é apontado que as diferenças nas temperaturas obtidas no modelo térmico podem influenciar na resposta termoestrutural do modelo numérico.

Através do modelo numérico, foi possível observar a taxa de crescimento dos deslocamentos verticais da viga de madeira em situação de incêndio. Até os 20 minutos de incêndio, a taxa de crescimento dos deslocamentos verticais foi igual a 0,49 mm/min. Entre os 20 e 30 minutos de incêndio, essa velocidade cresceu, atingindo valor igual a 1,17 mm/min. Entre os 30 e 40 minutos de incêndio, a taxa de crescimento da deflexão da viga fornecida pelo modelo numérico foi igual a 4,02 mm/min. Já para os 2 minutos finais de incêndio, foi observada taxa de crescimento dos deslocamentos verticais igual a 8,72 mm/min. As maiores velocidades de crescimento dos deslocamentos verticais na fase final na análise numérica estão relacionadas à redução da seção transversal resistente devido ao crescimento da camada carbonizada, representada pela isoterma de 300 °C.

3.3 Análise das tensões longitudinais

A Figura 11 apresenta as tensões longitudinais na seção transversal do meio do vão antes do incêndio e após 20 minutos e 37 minutos de exposição ao fogo. É possível observar que, previamente à aplicação do carregamento térmico, as tensões encontram-se distribuídas ao longo de toda a largura da seção transversal, com a região superior apresentando tensões entre -5 Mpa e -10 MPa, enquanto a parte inferior da viga apresenta tensões entre 5 MPa e 10 MPa. O avanço do incêndio provoca mudanças na distribuição das tensões na seção transversal da viga. Após 20 minutos de incêndio, tanto as tensões de tração quanto as tensões de compressão chegam a valores na faixa entre 15 MPa e 20 MPa. Aos 37 minutos de incêndio, a região com tensões entre 15 MPa e 20 MPa aumenta.

Figura 11 ▶
Tensões longitudinais (MPa)
na seção transversal do
meio do vão.
Fonte: dados da pesquisa



Essa mudança na distribuição das tensões longitudinais está relacionada com o avanço da camada de madeira carbonizada, que apresenta resistência e rigidez desprezíveis, e representa, conseqüentemente, a redução da seção transversal resistente. A redução da seção transversal reduz o momento de inércia da peça, aumentando, dessa forma, os valores das tensões longitudinais.

A redução nas dimensões da seção transversal da viga também provoca a mudança na posição da linha neutra. Antes do início do incêndio, a linha neutra se encontrava na metade da altura da seção transversal, ou seja, a 150 mm da borda inferior. Após 20 minutos de incêndio, a linha neutra passou a se localizar a 160 mm da borda inferior, enquanto após 37 minutos de incêndio sua posição mudou para uma distância igual a 170 mm da borda inferior.

3.4 Estudos paramétricos

Uma das grandes vantagens das simulações numéricas é a possibilidade de se realizar diversos estudos de interesse de forma econômica e rápida. Assim, com base na estratégia de modelagem aqui desenvolvida, bem como na consistência dos resultados obtidos, foram desenvolvidas análises paramétricas com vistas a avaliar a influência no comportamento termoestrutural de vigas de madeira dos fatores apresentados nesta subseção.

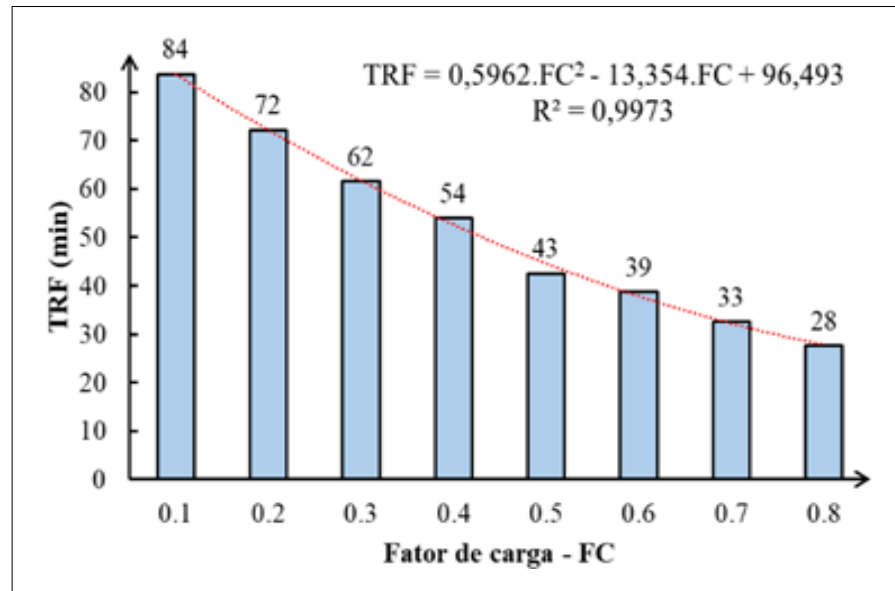
3.4.1 Fator de carga

A Figura 12 apresenta o gráfico do tempo de resistência ao fogo (*TRF*) da viga de madeira em função do fator de carga (*FC*), ou seja, da relação entre a força aplicada e a força de ruptura do elemento estrutural. É possível observar que, para a aplicação de força correspondente a 10% da força de ruptura da viga de madeira, o tempo de resistência ao fogo é igual a 84 minutos, enquanto na aplicação de carregamento correspondente a 80% da força de ruptura da viga de madeira, o tempo de resistência ao fogo é inferior a 30 minutos. A Figura 12 ainda apresenta uma equação correlacionando o fator de carga com o tempo de resistência ao fogo, tendo sido ajustada uma linha de tendência do segundo grau, com coeficiente de correlação igual a 0,9973. Para fatores de carga

entre 0,1 e 0,5, é possível observar que, a cada incremento de carregamento igual a 10% da força de ruptura, há uma redução média do tempo de resistência ao fogo igual a 10 minutos. Para fatores de carga entre 0,5 e 0,8, o mesmo incremento provoca uma redução de 5 minutos no tempo de resistência ao fogo.

Figura 12 ►

Curva do tempo de resistência ao fogo em função do fator de carga.
Fonte: dados da pesquisa

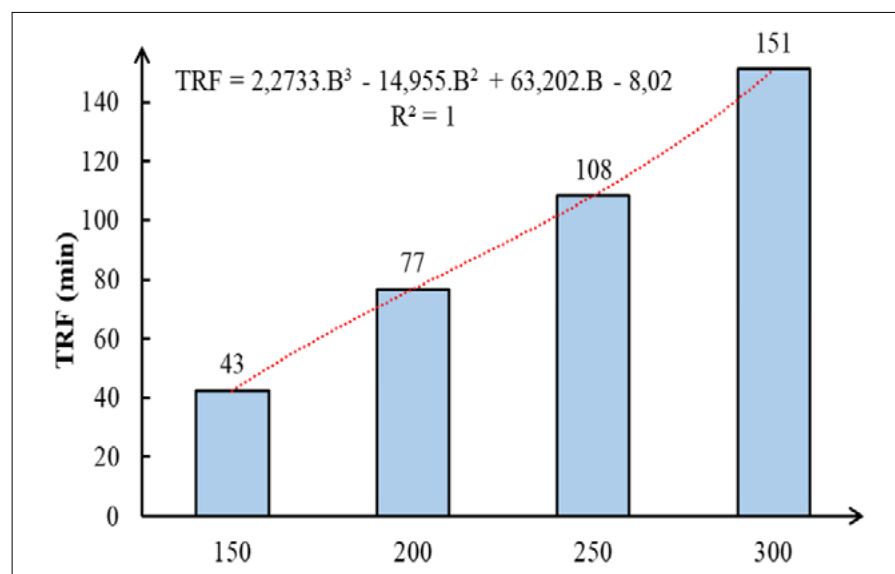


3.4.2 Largura da seção transversal

A partir da viga de madeira empregada na validação do modelo numérico, foi avaliada a influência da largura da seção transversal no tempo de resistência ao fogo do elemento estrutural, mantendo-se a força total aplicada nos terços do vão com valor igual a 37,3 kN e a altura igual a 300 mm, sendo adotadas larguras iguais a 200 mm, 250 mm e 300 mm. Na Figura 13, são apresentados os tempos de resistência ao fogo para cada largura adotada, bem como uma curva correlacionando a largura da seção transversal com o tempo de resistência ao fogo. Para tal curva foi adotada uma equação do terceiro grau, cujo coeficiente de correlação foi igual a 1.

Figura 13 ►

Curva do tempo de resistência ao fogo em função da largura da seção transversal.
Fonte: dados da pesquisa



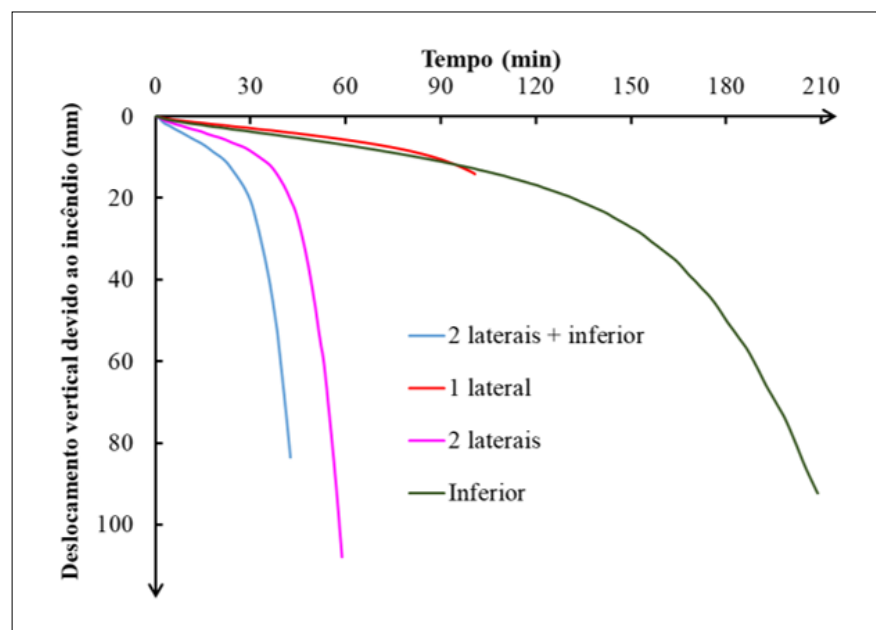
É possível observar, pelos resultados apresentados na Figura 13, que o aumento da seção transversal provoca o aumento da resistência ao fogo da viga de madeira. Tal fato pode ser explicado por dois motivos: ao aumentar a dimensão da seção transversal, mantendo-se constante o carregamento aplicado, ocorre a redução do fator de carga aplicado à viga durante o incêndio; além disso, maiores dimensões da seção transversal garantem maior camada de madeira para ser queimada, protegendo a região interna do elemento estrutural, que praticamente não sofre variação de temperatura e que é responsável pela maior parte da capacidade resistente do elemento estrutural.

Dessa forma, em situações de projeto, uma boa solução para aumentar o tempo de resistência ao fogo de vigas de madeira é aumentar a largura da seção transversal. Por exemplo, a viga utilizada para a validação do modelo numérico poderia ser utilizada, de acordo com a NBR 14432 (ABNT, 2001b), em situações de projeto com tempo requerido de resistência ao fogo igual a 30 minutos, como em prédios residenciais com até 12 metros de altura. A viga com largura igual a 200 mm já permite a utilização em situações com tempo requerido de resistência ao fogo igual a 60 minutos, como em prédios residenciais com até 23 metros de altura. A viga com largura igual a 250 mm poderia ser utilizada, de acordo com a NBR 14432 (ABNT, 2001b), em situações com tempo requerido de resistência ao fogo de até 90 minutos, como em prédios residenciais com até 30 metros de altura. Já a viga com largura igual a 300 mm seria capaz de satisfazer o maior tempo requerido de resistência ao fogo apresentado pela NBR 14432 (ABNT, 2001b), que é igual a 120 minutos.

3.4.3 Situações de aquecimento

O último estudo paramétrico realizado foi referente a diferentes formas de aquecimento da seção transversal. Na validação do modelo numérico, foi avaliada a situação em que ambas as laterais e a superfície inferior foram aquecidas (2 laterais + inferior). Adicionalmente, foram avaliadas as situações de aquecimento apenas da lateral esquerda (1 lateral), somente das laterais (2 laterais) e apenas da região inferior da viga (inferior). Na Figura 14, são apresentadas as curvas de deslocamento vertical devido ao incêndio em função do tempo de incêndio das situações analisadas.

Figura 14 ►
Curvas deslocamento vertical versus tempo de incêndio devido a diferentes formas de aquecimento.
Fonte: dados da pesquisa



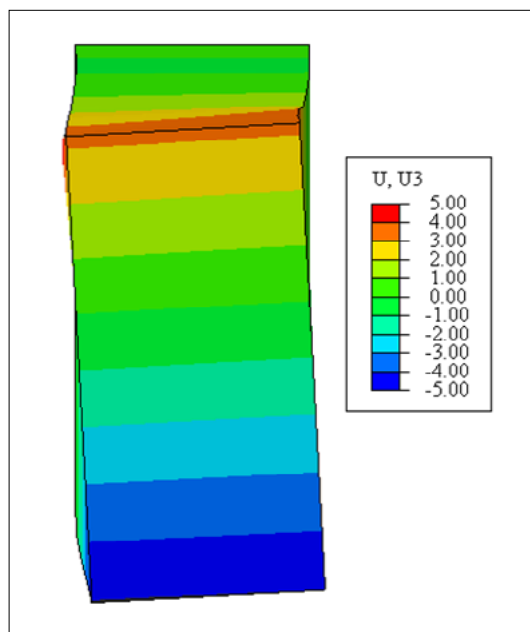
É possível observar que os deslocamentos verticais aumentaram mais rapidamente para a situação de aquecimento de ambas as laterais com a face inferior, a qual apresentou tempo de resistência ao fogo igual a 43 minutos e deslocamento final devido ao incêndio igual a 83 mm. Quando apenas as duas laterais foram aquecidas, o crescimento dos deslocamentos verticais foi um pouco mais lento do que na situação anterior, e o tempo de resistência ao fogo foi igual a aproximadamente 58 minutos, quando o elemento estrutural apresentou deslocamento vertical devido ao incêndio igual a 107 mm.

As taxas de crescimento dos deslocamentos verticais durante o incêndio para as situações em que é aquecida apenas uma lateral ou quando é aquecida apenas a superfície inferior são menores do que as observadas nas situações analisadas no parágrafo anterior. Para o aquecimento inferior, é possível observar que os deslocamentos crescem mais lentamente até os 150 minutos de incêndio, caindo rapidamente em seguida, até que ocorre a ruptura do elemento estrutural, que acontece após 208 minutos de incêndio, sendo observado, nesse momento, deslocamento vertical devido ao incêndio igual a 92 mm.

Pela Figura 14, é possível observar que os deslocamentos verticais da viga aquecida apenas em uma lateral crescem muito pouco durante o incêndio, sendo observado deslocamento vertical devido ao incêndio igual a 13 mm, no instante em que ocorre a ruptura do elemento estrutural (após 104 minutos de incêndio). Tal fato pode ser explicado pelo fenômeno de torção que a viga sofre, conforme pode ser visto na Figura 15, que faz com que as tensões de cisalhamento aumentem mais rapidamente na viga, provocando sua ruptura sem o aumento expressivo dos deslocamentos verticais.

Figura 15 ►

Deslocamentos da viga na direção z (mm).
Fonte: dados da pesquisa



4 Conclusões

Este trabalho apresentou uma estratégia de modelagem numérica para simular o comportamento termoestrutural de vigas de madeira em situação de incêndio, tendo sido encontradas as seguintes conclusões:

- O modelo numérico é capaz de representar com boa precisão o comportamento térmico de vigas de madeira submetidas ao fogo;

- A curva deslocamento vertical versus tempo de incêndio obtida numericamente encontrava-se bem próxima da experimental, mostrando que o modelo é capaz de descrever o comportamento termoestrutural de vigas de madeira em situação de incêndio. Entretanto, o tempo de resistência ao fogo e o deslocamento final fornecidos pelo modelo numérico foram ligeiramente superiores aos experimentais;
- Os valores da tensão longitudinal aumentaram na região mais interna da seção transversal em consequência do aumento da camada carbonizada e, conseqüentemente, da redução da seção transversal resistente;
- O aumento do fator de carga reduz o tempo de resistência ao fogo, sendo possível ajustar uma equação do segundo grau para correlacionar o fator de carga com o tempo de resistência ao fogo;
- O aumento da largura da seção transversal provoca o aumento no tempo de resistência ao fogo, sendo possível ajustar uma equação do terceiro grau para correlacionar a largura da seção transversal com o tempo de resistência ao fogo. Em situações de projeto, o aumento da largura do elemento estrutural é uma boa alternativa para aumentar a sua resistência em situação de incêndio;
- Foi observado que as situações de aquecimento simultâneo das laterais e de aquecimento simultâneo das laterais juntamente com o aquecimento da região tracionada apresentam os menores tempos de resistência ao fogo, enquanto a situação de aquecimento apenas da região inferior da viga apresenta maior tempo de resistência ao fogo. Foi constatado também que o aquecimento de apenas uma lateral da viga provoca a torção do elemento estrutural, ocasionando a sua ruptura sem crescimento significativo dos deslocamentos verticais.

Sugere-se, como trabalho futuro, o desenvolvimento de um modelo que leve em conta tanto a ortotropia da madeira, como também a diferença no comportamento da madeira na tração e na compressão.

Financiamento

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo número 132829/2016-9) pelo apoio financeiro concedido.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo. ABNT: Rio de Janeiro, 2001a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. ABNT: Rio de Janeiro, 1997.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. ABNT: Rio de Janeiro, 2001b.

CACHIM, P. B.; FRANSSSEN, J.-M. Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5. **Fire and Materials**, v. 33, n. 3, p. 129-143, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.985>.

CEN – COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 338**: Structural timber – Strength classes. Brussels: CEN, 2009.

CEN – COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1991-1-2**: Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN, 2002.

CEN – COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1995-1-2**: Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design. Brussels: CEN, 2004.

CHEN, C.; YANG, J.; CHEN, J.; ZENG, J.; WANG, W.; ZHAO, X. Fire resistance performance of glulam beam. **Journal of Central South University**, v. 24, n. 4, p. 929-936, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3495-8>.

DIAS, A. M. P. G.; VAN DE KUILEN, J. W.; LOPES, S.; CRUZ, H. A non-linear 3D FEM model to simulate timber–concrete joints. **Advances in Engineering Software**, v. 38, n. 8-9, p. 522-530, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.08.024>.

DU, H.; HU, X.; XIE, Z.; MENG, Y. Experimental and analytical investigation on fire resistance of glulam-concrete composite beams. **Journal of Building Engineering**, v. 44, 103244, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103244>.

DU, H.; HU, X.; ZHANG, B. Numerical modelling on fire behavior of timber-concrete composite beams. *In*: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 2018, Seoul. **Proceedings** [...]. Seoul: National Institute of Forest Science, 2018.

FAHRNI, R.; KLIPPEL, M.; JUST, A.; OLLINO, A.; FRANGI, A. Fire tests on glued-laminated timber beams with specific local material properties. **Fire Safety Journal**, v. 107, p. 161-169, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.11.003>.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Temperature reduction factor for compressive strength parallel to the grain. **Fire Safety Journal**, v. 83, p. 99-104, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.05.005>.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D.; MAESTRI, F. A. Temperature and moisture content effects on compressive strength parallel to the grain of Paricá. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 1, p. 17-27, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212015000100003>.

FRAGIACOMO, M.; GREGORI, A.; XUE, J.; DEMARTINO, C.; TOSO, M. Timber-concrete composite bridges: three case studies. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 5, n. 6, p. 429-438, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.09.001>.

FRAGIACOMO, M.; MENIS, A.; CLEMENTE, I.; BOCHICCHIO, G.; CECCOTTI, A. Fire resistance of cross-laminated timber panels loaded out of plane. **Journal of Structural Engineering**, v. 139, n. 12, p. 1-11, 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000787](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000787).

FRANGI, A.; KNOBLOCH, M.; FONTANA, M. Fire design of timber-concrete composite slabs with screwed connections. **Journal of Structural Engineering**, v. 136, n. 2, p. 219-228, 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000101](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000101).

HILL, R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. **Proceedings of The Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 193, n. 1033, p. 281-297, 1948. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1: Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements**. Geneva: ISO, 1999.

KINJO, H.; HIRASHIMA, T.; YUSA, S.; HORIO, T.; MATSUMOTO, T. Fire performance, including the cooling phase, of structural glued laminated timber beams. **Journal of Structural Fire Engineering**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1108/JSFE-12-2016-024>.

LÓPEZ-ALMANSA, F.; SEGUÉS, E.; CANTALAPIEDRA, I. R. A new steel framing system for seismic protection of timber platform frame buildings. Implementation with hysteretic energy dissipators. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, v. 44, n. 8, p. 1181-1202, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.2507>.

MARTINS, G. C. A. **Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.11606/T.18.2016.tde-11102016-111511>.

MEENA, R.; SCHOLLMAYER, M.; TANNERT, T. Experimental and numerical investigations of fire resistance of novel timber-concrete-composite decks. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 28, n. 6, p. 1-8, 2014. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000539](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000539).

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Estratégia para modelagem numérica de sistemas mistos considerando diferentes modelos de ruptura para os materiais. **Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería**, v. 17, n. 2, p. 256-266, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052009000200014>.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Sistema misto de madeira e concreto: uma abordagem numérico e experimental para altas temperaturas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, e-12183, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0517>.

MUSZYNSKI, L.; GUPTA, R.; HONG, S. H.; OSBORN, N.; PICKETT, B. Fire resistance of unprotected cross-laminated timber (CLT) floor assemblies produced in the USA. **Fire Safety Journal**, v. 107, p. 126-136, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.12.008>.

O'NEILL, J.; ABU, A.; CARRADINE, D.; MOSS, P.; BUCHANAN, A. Modelling the fire performance of structural timber-concrete composite floors. **Journal of Structural Fire Engineering**, v. 5, n. 2, p. 113-124, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1260/2040-2317.5.2.113>.

O'NEILL, J. W.; CARRADINE, D.; MOSS, P.; FRAGIACOMO, M.; DHAKAL, R.; BUCHANAN, A. Design of timber-concrete composite floors for fire resistance. **Journal of Structural Fire Engineering**, v. 2, n. 3, p. 231-242, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1260/2040-2317.2.3.231>.

ÖSTMAN, B.; BRANDON, D.; FRANTZICH, H. Fire safety engineering in timber buildings. **Fire Safety Journal**, v. 91, p. 11-20, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.002>.

SCHMID, J.; KLIPPEL, M.; JUST, A.; FRANGI, A. Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced Cross-Section Method. **Fire Safety Journal**, v. 68, p. 81-99, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.05.006>.

SCHNEID, E.; MORAES, P. D. Grain angle and temperature effect on embedding strength. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 442-449, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.015>.

SHEPHARD, A. B.; FISCHER, E. C.; BARBOSA, A. R.; SINHA, A. Fundamental behavior of timber concrete-composite floors in fire. **Journal of Structural Engineering**, v. 147, n. 2, 04020340, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002890](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002890).

SUZUKI, J.; MIZUKAMI, T.; NARUSE, T.; ARAKI, Y. Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure. **Fire Technology**, v. 52, p. 1015-1034, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0578-2>.

WERTHER, N.; O'NEILL, J. W.; SPELLMAN, P. M.; ABU, A. K.; MOSS, P. J.; BUCHANAN, A. H.; WINTER, S. Parametric study of modelling structural timber in fire with different software packages. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURES IN FIRE (SiF), 7., 2012, Zurich. Proceedings [...]. Zurich: Eidgenössische Technische Hochschule, 2012. p. 427-436.* DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-007050197>.

YEOH, D.; FRAGIACOMO, M.; DE FRANCESCHI, M.; BOON, K. H. State of the art on timber-concrete composite structures: literature review. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, n. 10, p. 1085-1095, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000353](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353).

YOUNG, S. A.; CLANCY, P. Compression mechanical properties of wood at temperatures simulating fire conditions. **Fire and Materials**, v. 25, n. 3, p. 83-93, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.759>.

ZHANG, J.; XU, Q.; XU, Y.; WANG, B.; SHANG, J. A numerical study on fire endurance of wood beams exposed to three-side fire. **Journal of Zhejiang University - SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)**, v. 13, n. 7, p. 491-505, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1631/jzus.A1200022>.