
ANÁLISE NUMÉRICA DE CONEXÕES METÁLICAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

NUMERICAL ANALYSIS OF STEEL CONNECTIONS IN TIMBER STRUCTURES IN FIRE

Mariana Masiero Fianco ¹

Fabio Martin Rocha ²

Gisele Cristina Antunes Martins ¹

Resumo: As conexões metálicas desempenham um papel crucial na transmissão de cargas e na integridade estrutural em elementos de madeira, visto que seu comportamento rege o comportamento da estrutura em sua totalidade. Em altas temperaturas, as propriedades mecânicas dos materiais sofrem alterações e apresentam perda de resistência. Com o objetivo de investigar o comportamento de dispositivos de conexão metálicos utilizados em ligações de elementos estruturais de madeira, o presente trabalho realiza análises numéricas térmicas, considerando dois tipos de ligações: uma composta por apenas pinos metálicos e parafusos e a segunda composta por pinos e uma chapa de aço. As análises numéricas foram realizadas com o uso do pacote computacional ABAQUS considerando o método avançado de dimensionamento proposto pela EN 1995-1-2, e validados com resultados de ensaios experimentais. Observou-se uma diferença de comportamento entre parafusos e pino metálicos, sendo destacado que a região da cabeça do parafuso devido a exposição direta na face exposta a chamas, apresenta um aumento de temperatura maior do que encontrado em ligação com o uso de pinos. A taxa de carbonização determinada por meio de análise numérica apresenta valores mais conservadores do que os encontrados em norma e em ensaios experimentais utilizados como base neste artigo.

Palavras-chaves: Estruturas de Madeira, Conexões Metálicas, Abaqus, Incêndio, Proteção Ativa.

Abstract: *Steel connections play a crucial role in load transmission and structural integrity in timber elements, as their behavior governs the overall structure's performance. At high temperatures, the mechanical properties of materials change and they lose strength. With the aim of investigating the behavior of steel connection devices used for connecting timber structural elements, this study conducts thermal numerical analyses, considering two types of connections: one composed of only steel dowels and bolts, and the second composed of dowels and a steel plate. The numerical analyses were performed using the ABAQUS computational package, considering the advanced calculation method proposed by EN 1995-1-2, and validated with results from experimental tests. A difference in behavior was observed between steel bolts and dowels, with the bolt head region showing a greater temperature increase than that found in connections using dowels due to direct exposure to flames. The charring rate determined by numerical analysis shows more conservative values than those found in the standard and in experimental tests used as a basis in this article.*

Keywords: *Timber Structures, Steel Connections, Abaqus, Fire, Active Protection.*

1 Introdução

¹Universidade Estadual de Maringá, Campus Maringá – Brasil, e-mail: pg404640@uem.br, gcamartins@uem.br

²Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Campus Uberaba – Brasil, e-mail: fabio.rocha@uftm.edu.br

As ligações entre elementos são parte importante de um projeto estrutural, pois são utilizadas de modo a garantir a união e a transmissão de esforços entre os elementos de uma estrutura, que tem o comportamento influenciado pelas características mecânicas apresentadas pelas conexões (Valle, 1999; Dhima *et al.*, 2010).

As conexões em estruturas de madeira mais utilizadas no Brasil são compostas por elementos de aço (Maia, 2016). Existem inúmeras tipologias de ligações metálicas disponíveis no mercado, variando em tipos de peças (pregos, parafusos, pinos), dimensões e quantidade de peças por ligação.

No quesito de resistência estrutural, as ligações representam a região onde ocorrem os maiores problemas, uma vez que o comportamento da estrutura é influenciado pelo comportamento das ligações (Dhima *et al.*, 2010; Molina, 2008; Palma, 2016). Essa situação se agrava quando submetida à uma situação de incêndio, no caso específico de estruturas de madeira com conectores metálicos, os diferentes materiais presentes nessa região, aço e madeira, manifestam desempenhos distintos entre si quando expostos ao fogo.

Como ressaltado por Figueiroa e Moraes (2009), a madeira é um material combustível, isso quer dizer que, ao aquecer irá produzir gases que produzem chama, esta por sua vez, aquece a região da madeira inalterada pelo calor, liberando mais gases e assim sucessivamente, formando uma reação em cadeia. Todavia, quando aquecida e na fase da pirólise, transforma-se em carvão, que possui característica de isolante térmico, com isso reduz o fluxo de calor para o interior da peça. Segundo a EN 1995-1-2:2004, a posição da linha que delimita a camada que sofreu pirólise e a porção intacta da madeira pode ser considerada como a isoterma de 300°C.

A velocidade que a madeira se transforma em carvão é denominada taxa de carbonização, e depende de fatores variados como espécie da madeira, densidade, condutibilidade térmica, orientação das fibras da madeira, dimensão do elemento (Pinto, 2005). A madeira abaixo camada carbonizada é o que representa a seção transversal residual (núcleo) e mantém as propriedades mecânicas inalteradas (Figueiroa & Moraes, 2006).

No que diz respeito ao desempenho térmico dos elementos de aço, Almeida (2012) relata que a alta condutividade térmica e os fatores de massividade deste material fazem com que o aço aqueça rapidamente, prejudicando suas propriedades mecânicas e reduzindo o tempo de resistência ao fogo de elementos estruturais. Devido a sua elevada condutividade térmica, na condição de ligação, o pino de aço aquece mais rapidamente do que a madeira e faz com que

a madeira em suas proximidades aqueça com maior velocidade também, ocasionando um precoce colapso estrutural.

A ABNT 7190:2022, norma brasileira que regulamenta as construções de madeira, foi revisada recentemente, e teve incluído em seu texto um capítulo sobre estruturas de madeira em situação de incêndio. Porém, relativo ao comportamento de conexões em temperaturas elevadas, os estudos ainda são escassos no Brasil; todavia no exterior a pesquisa vem se desenvolvendo, podendo citar trabalhos como Dhima (1999), Laplanche (2006), Audebert (2010) e Palma (2016).

Normativamente, muitas dessas pesquisas se baseiam na norma europeia EN 1995-1-2:2004, que apresenta os métodos simplificado e avançado de cálculo. Este artigo aborda a utilização do método avançado, que engloba o uso de programas de simulação numérica para averiguar o comportamento da estrutura submetida a situação de incêndio. O objetivo do presente trabalho é demonstrar, por meio de avaliação numérica, o comportamento em altas temperaturas das conexões metálicas utilizadas em estruturas de madeira.

2 Metodologia

Realizou-se análise numérica térmica, a partir dos dados de dois estudos de caráter experimental, Audebert *et al.* (2013) e Palma (2016), que abordam o comportamento de ligações metálicas utilizadas em estruturas de madeira quando submetidas a altas temperaturas.

O modelo de ligação estudado por Audebert *et al.* (2013) é baseado na norma europeia EN 1995-1-1:2004, e é constituído por vigas de madeira conectadas com duas fileiras de dispositivos metálicos, sendo cada linha composta por três pinos e um parafuso, como ilustrado na Figura 1 (a). Os autores não informam a espécie da madeira utilizada, mas apresentam a densidade de 444 kg/m³, sendo utilizada para o material. Os pinos e parafusos possuem diâmetro de 16 mm e as características do aço que os compõem são determinadas pela EN 1993-1-2:2005. A posição dos termopares instalados nas peças é representada na Figura 1 (a). Os termopares são responsáveis por registrar a temperatura em determinados pontos no interior das peças. Os pontos TC1, TC2 e TC3 registram a temperatura da madeira, os pontos TC5, TC6 e TC7 são posicionados para a leitura das temperaturas nos pinos, e os pontos TC5', TC6' e TC7' referem-se ao parafuso.

Palma (2016) estudou diversas tipologias de ligação entre viga-pilar em estruturas de madeira constituídas por placas de aço e pinos metálicos. As características geométricas da

ligação estão apresentadas na Figura 1 (b). A espécie de madeira utilizada foi a *Spruce* (conífera), com densidade de 420 kg/m³. Os quatro pinos que formam a ligação possuem 12 mm de diâmetro e pertencem a classe 6.6 de acordo com a EN 1993-1-8:2005; a placa possui 5 mm de espessura e é classificada como S 355 (EN 10025-2:2004).

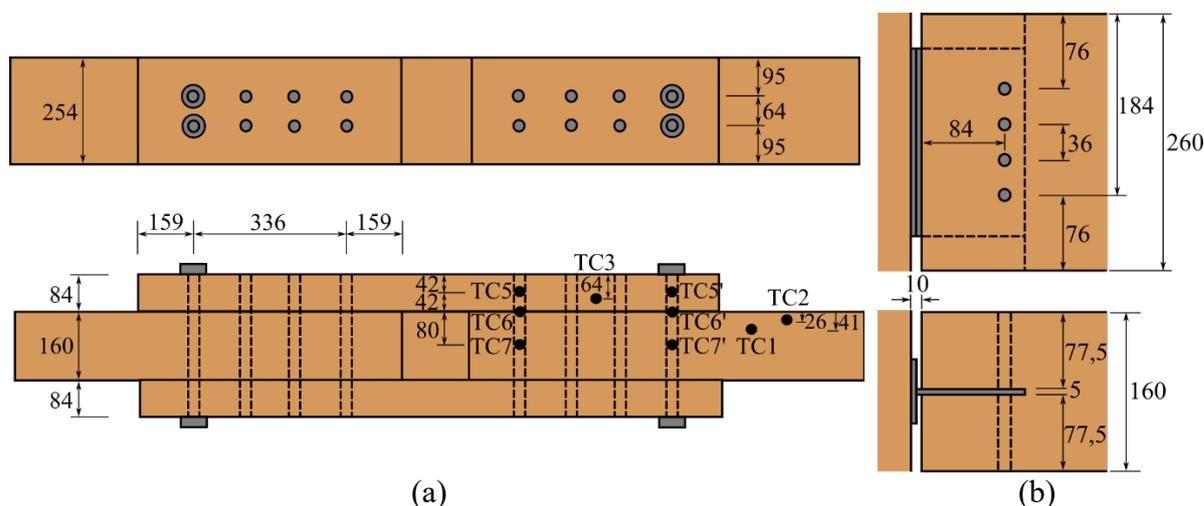


Figura 1. Configurações geométricas das conexões, unidade em milímetros: (a) Conexão de Audebert *et al.* (2013); (b) Conexão de Palma (2016)

Fonte: Próprios autores (2024)

Devido a simetria das ligações, como estratégia de modelagem as peças puderam ser simplificadas, de forma a reduzir o custo computacional durante a execução das análises. A ligação de Audebert *et al.* (2013) foi simplificada em um quarto, pois apresenta dois eixos simétricos (Figura 2 (a)), a malha é formada por elementos quadráticos hexaédricos do tipo DC3D20. A ligação de Palma (2016) foi simplificada dividindo a viga ao meio no sentido de seu comprimento e a face interna cortada foi considerada adiabática (Figura 2 (b)); a malha utilizada é composta por elementos hexaédricos do tipo DC3D8 nos pinos e na madeira, e por elementos tetraédricos do tipo DC3D4 na placa.

Ao aquecer, a estrutura dos materiais é modificada, causando variações nas propriedades térmicas. Para a análise numérica térmica, três propriedades da madeira e do aço precisam ser definidas: condutividade térmica, calor específico e massa específica. Para o modelo de Palma (2016) adotou-se as características térmicas para a madeira e para o aço das normas EN 1995-1-2:2004 e EN 1993-1-2:2005, respectivamente. Para o modelo de Audebert *et al.* (2013), utilizou-se a EN 1993-1-2:2005 para caracterizar o aço, e para a madeira, os valores de condutividade térmica propostos por Janssens (1994) e valores de calor específico propostos

por Fredlund-Janssens (1993-1994). Para ambos os modelos a representação da elevação da temperatura pelo fogo obedeceu a curva de incêndio padrão da ISO 834 (1999).

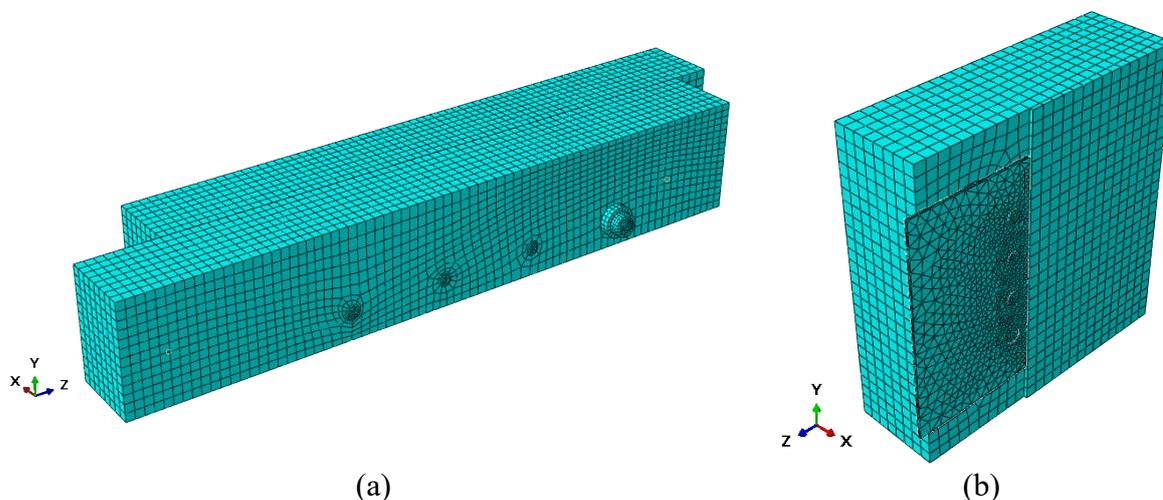


Figura 2. Malhas utilizadas na modelagem numérica: (a) Modelo de Audebert *et al.* (2013); (b) Modelo de Palma (2016)
Fonte: Próprios autores (2024)

3 Resultados e Discussões

No trabalho de Audebert *et al.* (2013) foi obtido o avanço da temperatura por meio da análise experimental, com a leitura dos dados obtidos por termopares instalados no interior da madeira nos pontos TC1, TC2 e TC3, e dos termopares instalados na superfície de um dos pinos (TC5, TC6 e TC7) e do parafuso (TC5', TC6' e TC7'), como ilustrado na Figura 1 (a).

A Figura 3 apresenta a variação da temperatura do elemento de madeira após 45 minutos de exposição ao fogo, comparando com os dados experimentais nos pontos TC1, TC2 e TC3. Os resultados indicam uma boa correlação entre os dados experimentais e numéricos, com uma divergência maior após 38 minutos de exposição. Para o ponto TC2 observa-se a carbonização da região após 32 minutos de exposição ao fogo. Os pontos TC1 e TC3 não indicaram um aumento acima de 300°C, sendo assim, a região não apresenta a carbonização da madeira.

Os pontos TC5, TC6 e TC7 são leituras dos termopares posicionados no pino e a sua evolução da temperatura é apresentada na Figura 4 (a). Os resultados demonstram boa correlação entre pontos TC5 e TC6, apresentando uma pequena divergência entre os dados após 40 minutos de exposição. O ponto TC7 apresentou comportamento semelhante ao experimental nos primeiros 10 minutos de exposição ao fogo, após esse período os dados divergiram, demonstrando uma queda no registro da temperatura, ainda assim, segue a tendência de elevação de temperatura experimental.

Os pontos TC5', TC6' e TC7' são as leituras dos termopares posicionados no parafuso, a evolução da temperatura é mostrada na Figura 4 (b). O ponto TC5' apresentou um ligeiro aumento de temperatura com relação ao experimental, mas em geral, as avaliações numérica e experimental apresentaram boa correlação para todos os pontos, sendo os dados obtidos numericamente representativos.

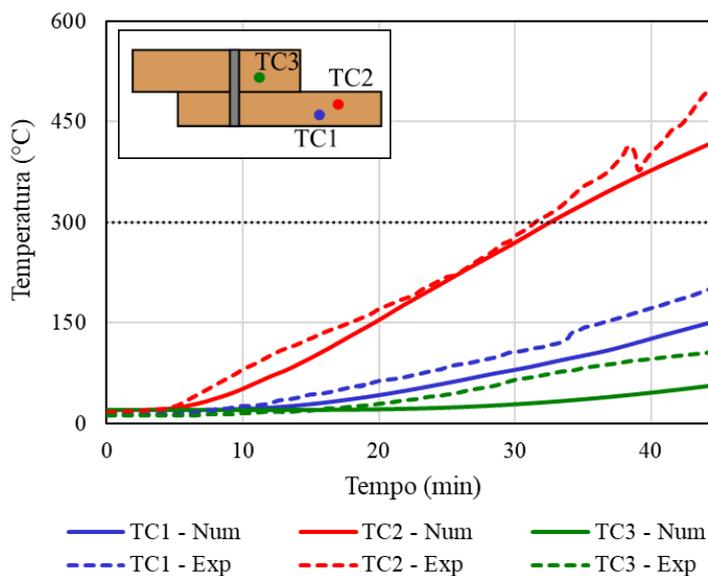
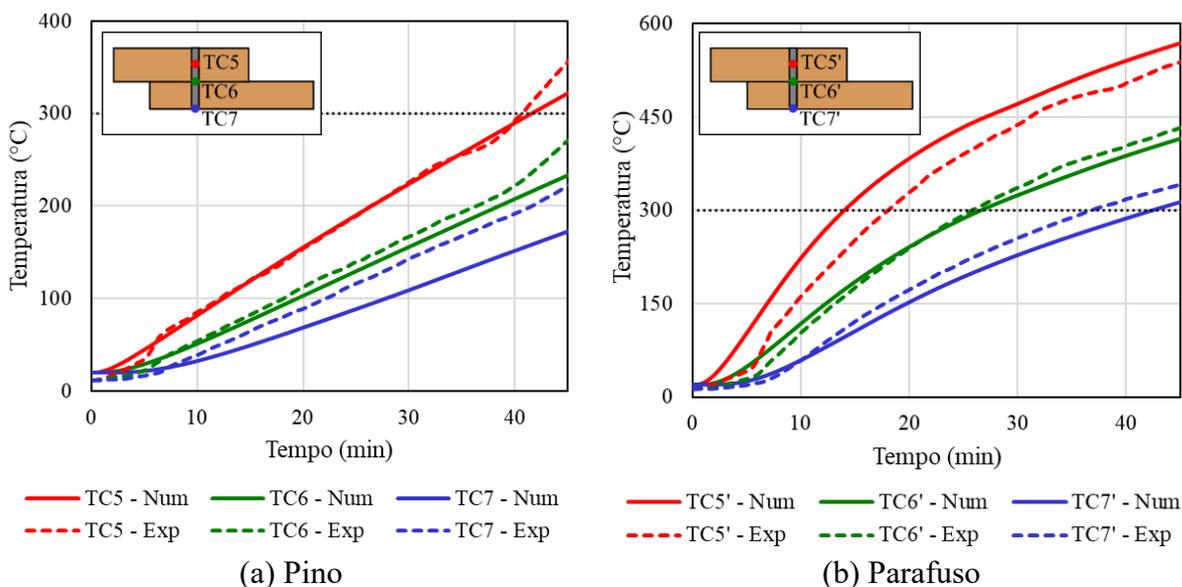


Figura 3. Variação da temperatura na madeira

Fonte: Próprios autores (2024)



(a) Pino

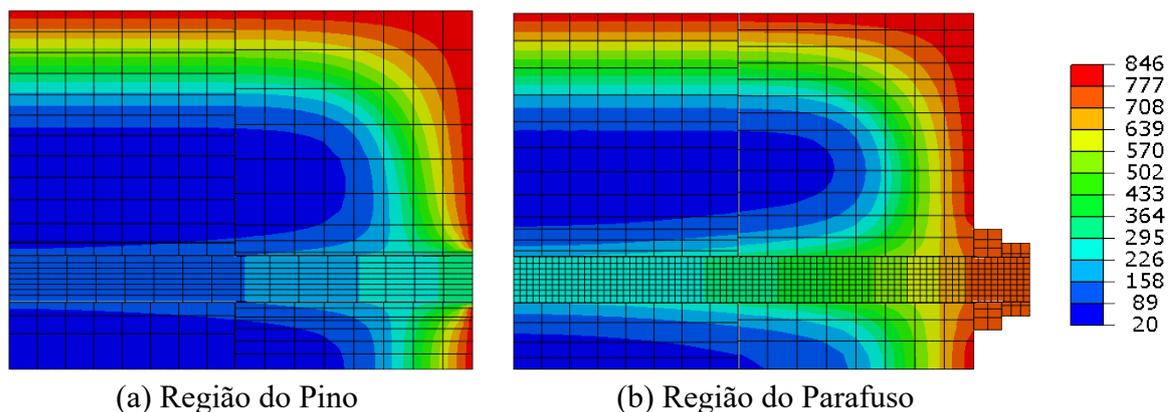
(b) Parafuso

Figura 4. Variação da temperatura nos elementos de aço

Fonte: Próprios autores (2024)

Na Figura 4 percebe-se que, para um mesmo espaço de tempo e mesmo material, o parafuso aquece mais do que o pino, esse comportamento pode ser justificado pelo fato de o

parafuso possui uma cabeça, composta por uma porca e uma arruela, que ficam expostas ao calor do forno sem a proteção de madeira que o pino possui. Essa maior área de contato exposta ao fogo e posição externa a madeira contribui para um aquecimento mais rápido do parafuso e, conseqüentemente, para o fluxo de calor ao interior da conexão devido à alta condutividade do aço, como mencionado por Almeida (2012), ilustrado pela Figura 5.



(a) Região do Pino (b) Região do Parafuso
Figura 5. Perfis de temperatura aos 30 minutos de exposição ao fogo no: (a) Pino; (b) Parafuso

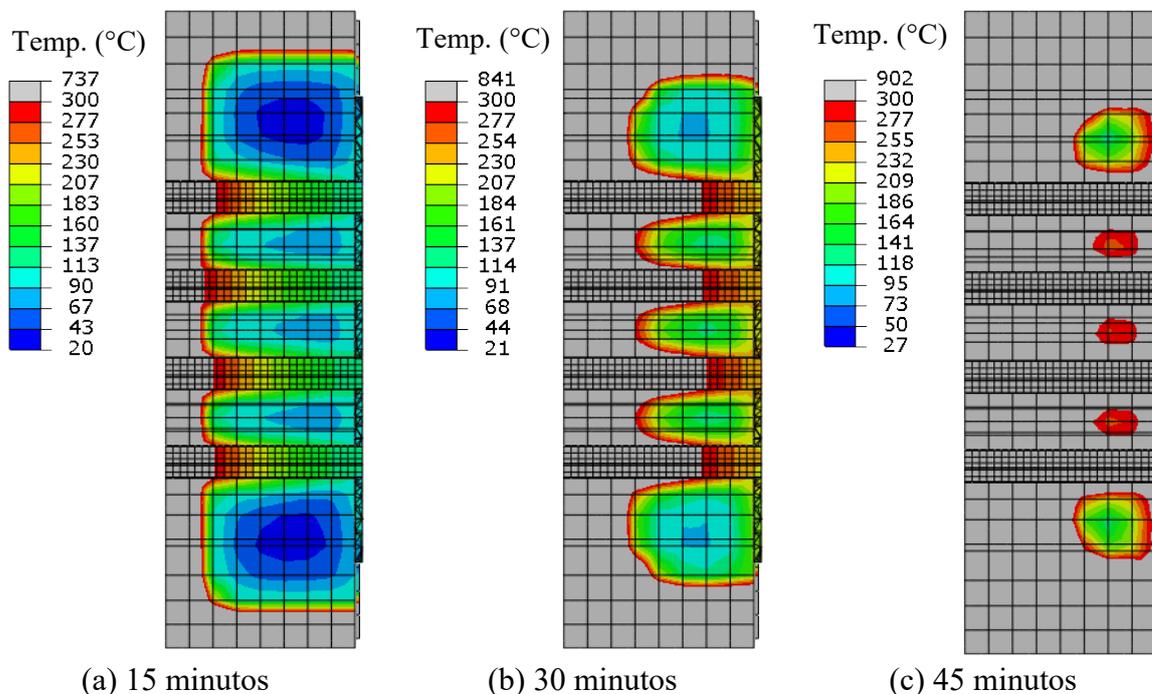
Fonte: Próprios autores (2024)

A taxa de carbonização calculada com base na posição do termopar TC2, único ponto a carbonizar, foi de 0,80 mm/min, diferente do valor obtido no ensaio experimental, que foi de, aproximadamente, 0,67 mm/min, conforme relatado por Audebert *et al.* (2013), dessa forma, a taxa de carbonização obtida pela análise numérica mostrou-se mais conservadora. A taxa de carbonização nominal (exposição ao fogo em mais de uma face) considerada pela EN 1995-1-2 e NBR 7190:2022 para madeira conífera é de 0,70 mm/min.

Palma (2016) realizou testes com diferentes tipologias variando em quantidade e diâmetro dos pinos, dimensão da seção, e mostrou como os diferentes parâmetros influenciam na resistência da conexão em altas temperaturas. Para o presente trabalho, definiu-se apenas uma das tipologias estudadas pelo autor, com a finalidade de demonstrar o comportamento da madeira e do aço, bem como a interação entre eles, em uma situação de incêndio.

O avanço do aquecimento na seção transversal do elemento é apresentado na Figura 6. Inicialmente, percebe-se que os pinos metálicos, o que pode ser justificado devido à alta condutividade térmica, como descrito por Almeida (2012), fazem com que o fluxo de calor externo seja levado mais rapidamente para o interior da estrutura, aquecendo a madeira em seu entorno e, conseqüentemente, acelerando o processo de carbonização. Ao mesmo tempo,

observa-se que a massa de madeira que envolve os pinos, protege-os, fazendo com que eles não conduzam o calor de uma só vez para os pinos.



(a) 15 minutos (b) 30 minutos (c) 45 minutos

Figura 6. Perfil de temperatura para diferentes tempos de exposição ao fogo

Fonte: Próprios autores (2024)

A taxa de carbonização calculada numericamente para um tempo de 30 minutos, Figura 6 (b), foi de 0,83 mm/min, valor maior do que a taxa encontrada pelo autor em ensaio experimental, que foi de 0,65 mm/min. A representação da taxa de carbonização a partir do método avançado de cálculo, ou seja, por meio de análises numéricas é mais rigorosa do que o observado em ensaios experimentais e por propostas normativas.

4 Conclusões

Para a avaliação da evolução da temperatura nos elementos de aço e de madeira ao longo do tempo, a análise numérica se mostrou satisfatória, tendo em vista que o modelo numérico térmico apresentou boas correlações com os dados experimentais, geralmente registrando temperaturas ligeiramente mais elevadas que o modelo experimental.

A análise numérica foi capaz de representar a transferência de calor do exterior para o interior da conexão, conforme demonstrado pela leitura da temperatura em diferentes pontos dos conectores de aço. O parafuso, por possuir maior área de contato com o calor do forno,

registrou temperaturas mais elevadas com relação ao pino. O pino, por sua vez, fica protegido pelo elemento de madeira, e registra temperaturas mais baixas que as do parafuso, mesmo sendo compostos pelo mesmo material.

A taxa de carbonização calculada pela análise numérica mostrou-se mais conservadora se comparada com os dados obtidos em ensaios experimentais ou com os valores normativos.

Referências

Almeida, S. J. C. *Análise do comportamento a temperaturas elevadas de elementos de aço formados a frio comprimidos considerando restrição ao alongamento térmico*. 2012. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. DOI: 10.11606/T.18.2012.tde-10012013-085122.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento*. Rio de Janeiro, 2022.

Audebert, M. *Approche expérimentale et modélisation du comportement au feu d'assemblages bois sous différents types de sollicitations*. 2010. Tese (Doutorado) – Université Clermont Auvergne, França, 2010. NNT: 2010CLF22086.

Audebert, M., Dhima, D., Taazount, M., & Bouchaïr, A. Thermo-mechanical behaviour of timber-to-timber connections exposed to fire. *Fire Safety Journal*, n. 56, p. 52-64. 2013. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.01.007.

Dhima, D. *Vérification expérimentale de la résistance au feu des assemblages d'éléments en bois*. Saint Remy les Chevreuses: CTICM, 1999.

Dhima, D., Audebert, M., Bouchaïr, A., & Taazount, M. Thermal and thermo-mechanical behaviour of timber connections in fire. In: *Urban habitat constructions under catastrophic events*, COST Action C26, Napoli, Taylor & Francis Group. p. 189-194, 2010.

European Committee for Standardization. *EN 1993-1-2: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*. Brussels, Belgium, 2005.

European Committee for Standardization. *EN 1993-1-8: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints*. Brussels, Belgium, 2005.

European Committee for Standardization. *EN 1995-1-2: Designer of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design*. Brussels, Belgium, 2004.

European Committee for Standardization. *EN 10025-2: Hot rolled products of structural steels – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*. Brussels, Belgium, 2004.

Figueiroa, M. J. M., & Moraes, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. *Ambiente Construído*, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009. DOI: 10.1590/s1678-86212009000400525.

Fredlund, B. Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire, *Fire Safety Journal*, v. 20, p. 39–69, 1993. DOI: 10.1016/0379-7112(93)90011-E.

International Organization for Standardization. *ISO 834: Fire resistance tests: elements of building construction: part 1. General requirements*. Geneva, 1999.

Janssens, M. *Thermo-physical properties for wood pyrolysis models*. Pacific Timber. Engineering Conference Gold Coast, Australia, 1994.

Laplanche, K. *Etude du comportement au feu des assemblages de structures bois: approche expérimentale et modélisation*. 2006. Tese (Doutorado) – Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand et CSTB, França, 2006. NNT: 2006CLF21665.

Maia, B. B. *Resistência de ligações pregadas em madeira*. 2016. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

Molina, J. C. *Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes*. 2008. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. DOI: 10.11606/T.18.2008.tde-04082008-111830.

Palma, P. *Fire behaviour of timber connections*. 2016. Tese (Doutorado) – ETH Zürich, Suíça, 2016. DOI: 10.3929/ethz-a-010836621.

Pinto, E. M. *Determinação de um modelo para a taxa de carbonização transversal a grã para a madeira de E. citriodora e E. grandis*. 2005. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. DOI: 10.11606/T.88.2005.tde-31052006-163139.

Valle, A. *Rigidez de ligações com parafusos em estruturas de madeira laminada colada*. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.