



Modelagem térmica de elementos de madeira: influência das propriedades térmicas na análise numérica

Thermal modeling of timber elements: influence of thermal properties on numerical analysis

Resumo

A combustão da madeira resulta na formação de uma camada carbonizada, que atua como proteção térmica do núcleo não degradado. As transformações físicas e químicas induzidas pelo aquecimento, como pirólise e degradação termoquímica, alteram propriedades térmicas essenciais à modelagem numérica em situação de incêndio, incluindo condutividade térmica, densidade e calor específico. A avaliação do desempenho de estruturas de madeira sob exposição ao fogo tem se tornado uma demanda crescente, sendo as simulações numéricas amplamente utilizadas devido aos custos experimentais. Entretanto, a norma brasileira NBR 7190-1:2022 não apresenta recomendações específicas para parâmetros térmicos, o que conduz à adoção de valores de normas estrangeiras, como a EN 1995-1-2:2004, validadas principalmente para espécies de coníferas. Assim, este estudo analisa o comportamento térmico da madeira sob exposição ao fogo por meio da comparação entre três conjuntos de propriedades térmicas propostos por EN 1995-1-2:2004, Audebert *et al.* (2013) e Fernandes (2018), considerando curvas de condutividade térmica, calor específico e densidade. As propriedades foram aplicadas em modelos numéricos térmicos e comparadas a resultados experimentais da literatura. Resultados indicam que propriedades calibradas experimentalmente representam melhor a evolução da temperatura interna, enquanto a proposta normativa tende a subestimar temperaturas, evidenciando necessidade de estudos específicos para espécies brasileiras.

Palavras-chave: Estrutura de madeira. Comportamento ao fogo. Propriedades térmicas. Modelagem numérica. Espessura carbonizada.

Abstract

The combustion of wood leads to the formation of a char layer, which acts as thermal protection for the non-degraded core. Physical and chemical transformations induced by heating, such as pyrolysis and thermochemical degradation, alter thermal properties essential for numerical modeling under fire conditions, including thermal conductivity, density, and specific heat. The assessment of the performance of timber structures under fire exposure has become an increasing demand, with numerical simulations being widely used due to experimental costs. However, the Brazilian standard NBR 7190-1:2022 does not provide specific recommendations for thermal parameters, leading to the adoption of values from foreign standards, such as EN 1995-1-2:2004, which are mainly validated for coniferous species. Thus, this study analyzes the thermal behavior of wood under fire exposure by comparing three sets of thermal properties proposed by EN 1995-1-2:2004, Audebert *et al.* (2013), and Fernandes (2018), considering thermal conductivity, specific heat, and density curves. The properties were applied in thermal numerical models and compared with experimental results from the literature. Results indicate that experimentally calibrated properties better represent the evolution of internal temperature, while the normative proposal tends to underestimate temperatures, highlighting the need for specific studies on Brazilian species.

Keywords: Timber. Fire performance. Thermal properties. Numerical modeling. Charring depth.

¹Mariana Masiero Fianco 
¹Universidade Estadual de Maringá
 Maringá - PR - Brasil
 pg404640@uem.br

²Fabio Martin Rocha 
²Universidade Federal do Triângulo
 Mineiro
 Uberaba - MG - Brasil
 fabio.rocha@uftm.edu.br

³Gisele Cristina Antunes
 Martins 
³Universidade de São Paulo
 São Carlos - SP - Brasil
 giselemartins@usp.br

Recebido em 27/10/25
 Revisado em 30/11/25
 Aceito em 09/01/26

*autor correspondente

1 Introdução

A segurança contra incêndio constitui um dos requisitos fundamentais de desempenho em projetos de edificações, sendo essencial para preservar a vida dos ocupantes, proteger o patrimônio e garantir a estabilidade estrutural durante o incêndio. Normas internacionais e nacionais de prevenção e combate a incêndio estabelecem critérios de resistência ao fogo que visam assegurar tempo suficiente para evacuação, operações de resgate e controle das chamas (Zang *et al.*, 2023). Portanto, a escolha dos materiais e sistemas construtivos deve considerar não apenas aspectos estruturais e econômicos, mas também seu comportamento em situações de incêndio.

A madeira tem ganhado destaque no cenário da construção civil moderna devido ao seu caráter sustentável, elevada relação entre resistência e peso e viabilidade para sistemas industrializados. O desenvolvimento de elementos estruturais industrializados, como a madeira lamelada colada (MLC) e a madeira lamelada colada cruzada (MLCC), tem impulsionado o uso em edificações de múltiplos pavimentos (Wang; Huang; Li, 2021). Entretanto, apesar de suas vantagens, a madeira ainda é, por vezes, associada a um material vulnerável ao fogo, gerando resistência por parte de projetistas e órgãos regulamentadores. Por isso, compreender o comportamento do material em situação de incêndio é uma das principais condições para o aumento do uso de produtos e estruturas de madeira em construções com garantia de segurança adequada (Östman, 2022).

A madeira exposta a temperaturas elevadas passa por decomposição térmica, envolvendo várias mudanças físicas e químicas. O carvão formado a partir da fase de pirólise, que corresponde a temperaturas entre 200 °C e 300 °C, atua como isolante térmico devido à sua baixa condutividade térmica e reduz a taxa de transferência de calor para a madeira não carbonizada (White; Dietenberger, 2001).

A taxa de transferência de calor para o interior da madeira, é denominada de taxa de carbonização e corresponde à velocidade com que a madeira é convertida em carvão, sendo uma propriedade muito importante na determinação da resistência ao fogo de elementos estruturais de madeira expostos ao fogo (Martins, 2016). A taxa de carbonização é influenciada por diversos fatores internos e externos (Friquin, 2011). Entre os fatores internos incluem-se a densidade da madeira, teor de umidade, composição química, orientação das fibras, permeabilidade, contração e oxidação do carvão, e tamanho da amostra utilizada em estudo. Os fatores externos referem-se às características do ambiente em que o corpo de prova foi testado, incluindo exposição térmica, disponibilidade de oxigênio e fator de abertura do compartimento de ensaio.

O comportamento de elementos estruturais de madeira tem sido estudado experimentalmente (Klippel, 2014; Martins, 2016; Fernandes, 2022; Maharjan; Gunawardena; Mendis, 2025; Du Plessis; Streicher; Walls, 2025; Kim; Choi; An, 2025) e numericamente (Fischer, 2024; Xing; Zhang; Aslani, 2025; Ma *et al.*, 2025; Qin *et al.*, 2025). Ensaios em grande escala podem ser demorados e com elevado custo para a execução. Assim, muitos estudos são desenvolvidos com o uso de simulações em elementos finitos, com a finalidade de determinar a influência de parâmetros dimensionais, composição dos materiais e variação de exposições, para avaliação do comportamento de elementos estruturais e de sistemas estruturais.

As simulações por elementos finitos de componentes estruturais em situação de incêndio envolvem, de modo geral, análises sequenciais de transferência de calor e de tensões. A análise de transferência de calor requer a definição de propriedades térmicas dependentes da temperatura (condutividade térmica, densidade e calor específico), a fim de possibilitar o cálculo da evolução das temperaturas ao longo da seção transversal e da profundidade da camada carbonizada. Estudos anteriores têm proposto modelos para a variação das propriedades térmicas da madeira serrada expostas à curva de incêndio padrão, por meio de calibração numérica baseada em dados de ensaios experimentais (Wesche *et al.*, 1993; König; Welleij, 1999; König; Källsner, 2000; Frangi, 2001, Pinto *et al.*, 2008; Audebert *et al.*, 2013; Fernandes, 2018).

A norma europeia EN 1995-1-2 (ECS, 2004) apresenta um conjunto de propriedades térmicas para aplicação no método de dimensionamento avançado, entretanto, tais propriedades foram validadas principalmente para espécies de coníferas, conforme citado em seu escopo normativo. Dessa forma, evidenciam-se diferenças na resposta térmica da madeira em função das propriedades adotadas, o que reforça a necessidade de estudos que avaliem a adequação e aplicabilidade de diferentes modelos térmicos nas análises numéricas.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar, por meio de modelagem numérica de transferência de calor, a influência das propriedades térmicas no avanço da carbonização da madeira em situação de incêndio, comparando os resultados obtidos com dados experimentais disponíveis na literatura.

2 Propriedades térmicas da madeira

A exposição da madeira ao fogo promove uma série de transformações físicas e químicas que resultam em alterações significativas de suas propriedades termodinâmicas. Essas transformações afetam diretamente os mecanismos de condução de calor, a capacidade de armazenamento de energia e a taxa de decomposição térmica do material (White; Dietenberger, 2001; Friquin, 2011).

Como destacado por Fisher (2025), as mudanças físicas e químicas que ocorrem na madeira durante a combustão desenvolvem-se em faixas de temperatura bem definidas. Em temperaturas inferiores a aproximadamente 200 °C, predominam processos associados a migração da umidade no interior do material, com recondensação em regiões não carbonizadas ou mais frias da madeira, enquanto a evaporação se dá predominantemente pelas superfícies expostas ao fogo. No intervalo entre 200 °C e 300 °C, intensificam-se os processos de pirólise, resultando na decomposição térmica da madeira e na formação de uma camada carbonizada, acompanhada da liberação de gases voláteis. Essa camada de carvão exerce papel relevante na proteção térmica do núcleo remanescente, atuando como isolante térmico (Martins, 2016).

Em temperaturas superiores a 300 °C, observa-se um aumento da transferência de calor para a região não carbonizada, associada ao fissuramento progressivo da camada carbonizada e à redução da seção transversal resistente do elemento estrutural (König; Walleij, 1999).

As transformações químicas associadas a esses processos afetam diretamente a condutividade térmica, o calor específico e a densidade da madeira. A análise dessas propriedades é fundamental para a compreensão dos gradientes térmicos internos, da formação e evolução da camada carbonizada e da determinação da resistência residual de elementos estruturais expostos ao fogo em simulações numéricas. Assim, este capítulo tem como foco a descrição e a discussão das propriedades térmicas dependentes da temperatura empregadas em análises numéricas por meio do método dos elementos finitos.

2.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica caracteriza a capacidade de um material de transferir calor por condução, representando a taxa de fluxo de energia térmica associada a um gradiente de temperatura no interior da célula sólida, conforme estabelecido pela Lei de Fourier. No caso da madeira, embora o mecanismo fundamental de condução térmica seja o mesmo observado em materiais homogêneos, a aplicação direta desta lei requer a consideração de sua natureza anisotrópica e heterogênea. A estrutura celular da madeira resulta em variações significativas de condutividade térmica nas direções longitudinal, radial e tangencial, além de sua dependência em relação à densidade, ao teor de umidade e à temperatura do material (Kollmann; Côté, 1968; Simpson; Tenwolde, 1999).

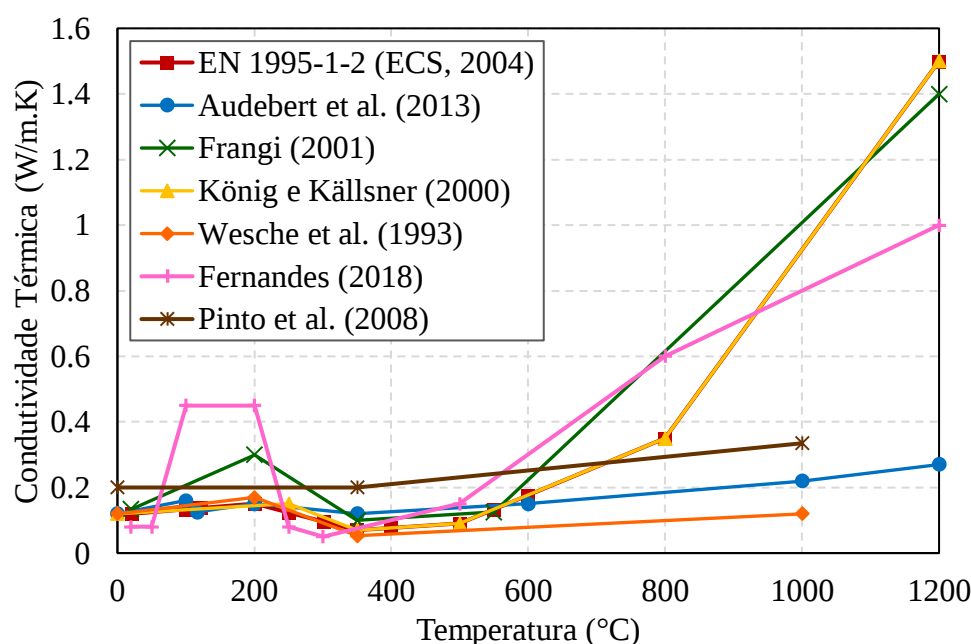
No contexto de elementos estruturais de madeira submetidos à ação do fogo, a condutividade térmica desempenha papel determinante no controle da velocidade com que o calor penetra a partir da superfície exposta em direção ao núcleo da seção. Valores mais elevados de condutividade térmica favorecem a rápida propagação do calor no interior da peça, intensificando o aquecimento interno e, consequentemente, a ativação de processos de secagem, pirólise e degradação das propriedades mecânicas, com impacto direto na resistência ao fogo do elemento estrutural.

A norma europeia EN 1995-1-2 (ECS, 2004) disponibiliza valores recomendados de condutividade térmica para aplicação em análises numéricas por meio de métodos avançados de cálculo. Adicionalmente, diversos estudos da literatura apresentam modelos e curvas de variação da condutividade térmica da madeira em função da temperatura, incluindo os trabalhos de Wesche *et al.* (1993), König e Källsner (2000), Frangi (2001), Pinto *et al.* (2008), Audebert *et al.* (2013) e Fernandes (2018), os quais são apresentados na Figura 1.

Observam-se variações significativas entre as diferentes curvas de condutividade térmica propostas na literatura. Na fase final, as propostas de Wesche *et al.* (1993) e Audebert *et al.* (2013) indicam uma variação pouco significativa da condutividade térmica, ao passo que outros modelos preveem um aumento acentuado dos valores a partir de aproximadamente 500 °C.

Conforme destacado por Fischer (2024), os fenômenos de fissuramento e retração da camada carbonizada não são representados de forma explícita nos modelos de transferência de calor. Em vez disso, seus efeitos são incorporados de maneira indireta por meio da definição de propriedades térmicas dependentes da temperatura, sobretudo pelo aumento da condutividade térmica em faixas elevadas de temperatura.

Figura 1 - Curvas de condutividade térmica propostas por diferentes autores



O entendimento adequado da variação da condutividade térmica em função da temperatura e estado físico-químico da madeira é, portanto, essencial para a correta estimativa da profundidade de carbonização e para a avaliação da integridade residual do núcleo estrutural, aspectos diretamente relacionados à resistência ao fogo de elementos de madeira.

Há variações entre as diversas curvas propostas, especialmente na fase inicial de incêndio, em que Frangi (2001) e Fernandes (2018) consideram uma elevação da condutividade térmica entre 50 °C e 300 °C e os outros autores não, e na fase final, onde a condutividade nas propostas de Wesche *et al.* (1993) e Audebert *et al.* (2013) praticamente não se eleva, enquanto os outros autores consideram um aumento acentuado nos valores de condutividade térmica a partir de 500 °C.

O entendimento da variação da condutividade térmica com temperatura e estado da madeira é crucial para avaliar a profundidade da carbonização, a integridade residual do núcleo e, consequentemente, a segurança estrutural durante a exposição ao fogo.

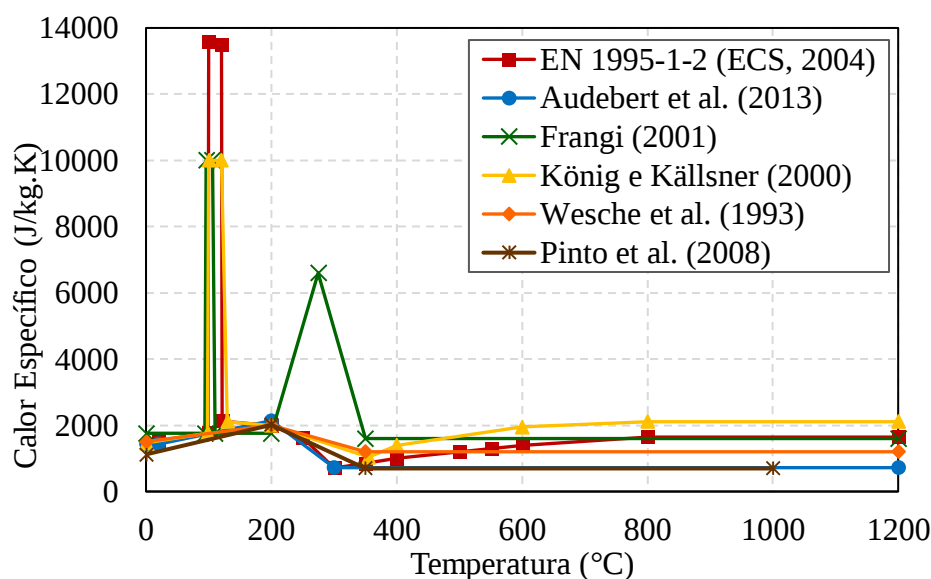
2.2 Calor específico

O calor específico é definido como a quantidade de energia necessária para elevar em 1 K (ou 1 °C) a temperatura de uma unidade de massa do material. O calor específico influencia diretamente a capacidade térmica da madeira, determinando o volume de energia absorvida durante o aquecimento. Em situação de incêndio, valores elevados de calor específico implicam em maior capacidade de absorção de energia antes do aumento efetivo da temperatura, o que retarda o aquecimento interno do elemento estrutural e, consequentemente, a ativação dos processos endotérmicos associados à evaporação da água e à pirólise (König; Källsner, 2000; Frangi, 2001).

Em temperatura ambiente, o calor específico da madeira seca situa-se tipicamente entre 1200 e 1500 J·kg⁻¹·K⁻¹ (Shi; Chew, 2021). Com o aumento da temperatura, ocorre um acréscimo acentuado do calor específico devido à evaporação da água livre contida nas células, atingindo um pico próximo de 100 °C. Após essa etapa, o valor de calor específico tende a reduzir e estabilizar com o início da pirólise e a degradação térmica da madeira. Em estudos experimentais com elementos estruturais aquecidos, Frangi (2001) observou uma elevação de aproximadamente 1700 J·kg⁻¹·K⁻¹ para cerca de 13700 J·kg⁻¹·K⁻¹ nessa faixa de temperatura, seguida de uma queda para aproximadamente 2100 J·kg⁻¹·K⁻¹ a 120 °C.

Assim como para a condutividade térmica, a EN 1995-1-2 (ECS, 2004) fornece dados de calor específico para o uso do método avançado de cálculo, e outros autores elaboram diferentes curvas, como apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Curvas de calor específico propostas por diferentes autores



Observa-se que quase todas as curvas exibem um pico acentuado próximo a 100 °C, relacionado à energia necessária para a evaporação da água livre. Após essa região, verifica-se uma tendência de redução e posterior estabilização do calor específico até 1200 °C. As propostas de Wesche *et al.* (1993) e Audebert *et al.* (2013), onde não há presença de um pico acentuado de calor específico, apresentam curvas com comportamento mais suavizado, indicando uma transição térmica menos abrupta.

Conforme destacado por Haddad, Fonseca e Lamri (2016), os valores normativos devem ser utilizados com cautela, pois não representam integralmente os efeitos locais associados à evaporação da água ou às reações de pirólise, que variam conforme a espécie, a densidade e o teor de umidade da madeira. Do ponto de vista do desempenho em incêndio, o elevado calor específico contribui para retardar o aquecimento do núcleo do elemento e prolongar a resistência estrutural, enquanto o pico endotérmico em torno de 100 °C evidencia o caráter não linear da resposta térmica da madeira. Dessa forma, a correta caracterização experimental e analítica da variação do calor específico em função da temperatura é fundamental para prever o comportamento térmico e estrutural da madeira em altas temperaturas.

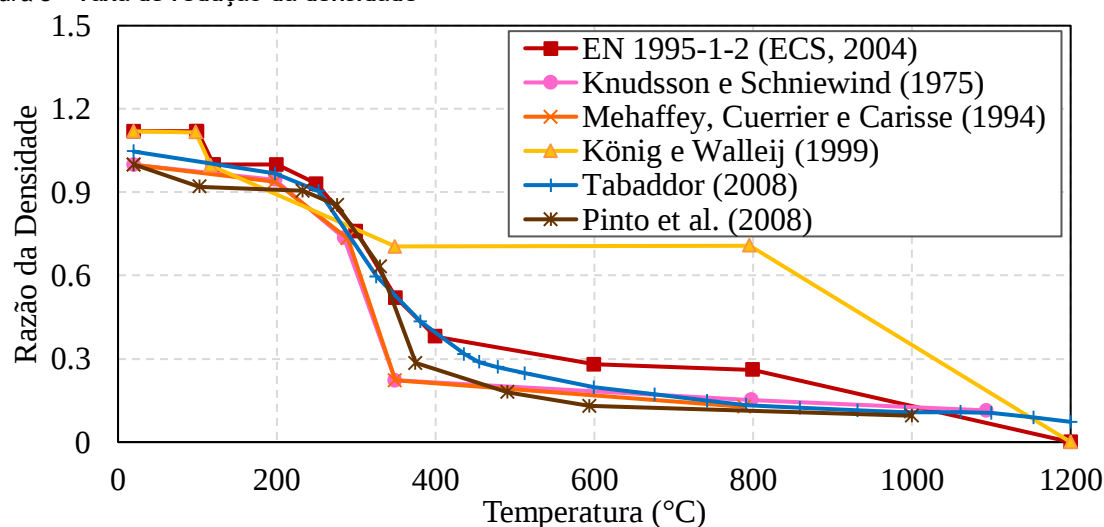
2.3 Densidade

A densidade é definida como a razão entre a massa e o volume de um material. As razões de densidade dependentes da temperatura correspondem à relação entre a densidade do material em temperaturas elevadas e a densidade do material em temperatura ambiente.

Na madeira, a densidade está diretamente relacionada à quantidade de material sólido por unidade de volume e, consequentemente, à capacidade do elemento estrutural de armazenar e transferir calor. Espécies com maior densidade apresentam maior inércia térmica e, em geral, menores taxas de carbonização, enquanto madeiras de menor densidade tendem a aquecer e a se degradar mais rapidamente quando expostas à ação do fogo (White; Dietenberger, 2001; Friquin, 2011). Fischer (2024) observa que análises termogravimétricas podem ser utilizadas para medir diretamente a perda de massa em temperaturas elevadas.

De modo análogo ao observado para a condutividade térmica, a razão de densidade reflete as alterações na composição da madeira ao longo de uma exposição ao fogo. Conforme ilustrado na Figura 3, a norma EN 1995-1-2 (ECS, 2004) representa essa variação por meio de uma relação aproximadamente linear entre a densidade e a temperatura, assumindo que acima de cerca de 300 °C, a massa remanescente corresponde predominantemente ao carvão formado. Resultados experimentais de Frangi (2001) e Friquin (2011) indicam comportamento semelhante, com uma redução suave até cerca de 200 °C, seguida de uma queda acentuada no intervalo entre 200 °C a 350 °C, associada à intensa pirólise e à formação da camada carbonizada, cuja densidade é significativamente inferior à da madeira original.

Figura 3 - Taxa de redução da densidade



3 Método

Modelos de transferência de calor foram desenvolvidos utilizando o programa de elementos finitos Abaqus, versão 6.14. Os resultados obtidos a partir dos modelos numéricos foram então comparados com ensaios experimentais realizados por Audebert *et al.* (2013) e Martins (2016), que investigaram, respectivamente, o desempenho de ligações metálicas em estruturas de madeira em situação de incêndio e o comportamento térmico de elementos estruturais de madeira.

3.1 Descrição dos ensaios experimentais

Martins (2016) avaliou elementos estruturais de madeira lamelada colada (MLC) de duas espécies distintas, *Lyptus* (híbrido da espécie *Eucalyptus grandis* e *urophylla*), e *Pinus sp.*, com densidades de 683,2 kg/m³ e 497,5 kg/m³, respectivamente. Os elementos apresentavam seções transversais de 150 mm x 420 mm e estão ilustradas na Figura 4(a). As faces laterais e inferior das peças foram expostas ao fogo, enquanto a face superior foi isolada termicamente por meio de manta cerâmica. Na Figura 4(a), a linha em vermelho indica as faces expostas ao fogo. As temperaturas no interior das peças foram registradas por meio de termopares do tipo K. Para o presente trabalho serão utilizados os pontos de medição identificados como C1 e E.

Audebert *et al.* (2013) estudaram um modelo de ligação constituído por peças de madeira conectadas por duas fileiras de dispositivos metálicos, cada uma composta por três pinos e um parafuso, conforme ilustrado na Figura 4(b). Os autores não especificam a espécie de madeira utilizada, porém informam uma densidade de 444 kg/m³, adotada na modelagem numérica. As faces da peça expostas ao fogo estão indicadas pela linha vermelha na Figura 4(b). Os pontos TC1 e TC2, localizados na metade da altura do elemento, correspondem às posições de medição de temperatura no interior da peça, monitoradas por meio de termopares do tipo K.

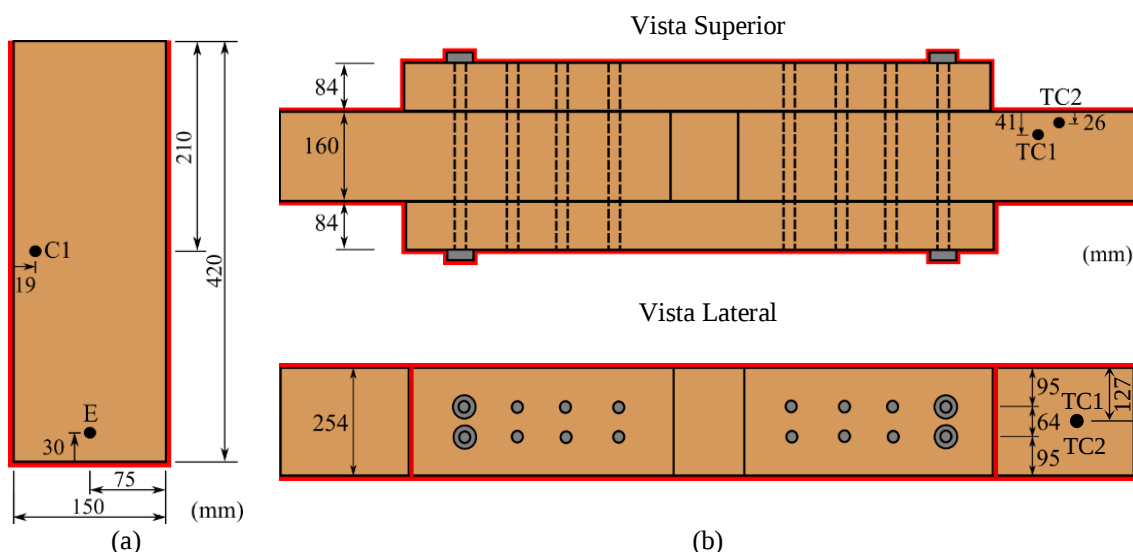
3.2 Modelo numérico

Uma análise bidimensional de transferência de calor foi desenvolvida para calcular as temperaturas internas na seção transversal dos elementos de madeira estudados por Martins (2016). A madeira foi simulada utilizando elementos quadráticos de oito nós (DC2D8). O tamanho da malha foi limitada a 9,375 mm x 9,375 mm, conforme determinado por um estudo de sensibilidade de malha, que considerou o custo computacional e otimização das delimitações da seção transversal residual. A Figura 5(a) ilustra a discretização da malha aplicada ao modelo.

Para o modelo de Audebert *et al.* (2013), foi realizada uma análise tridimensional, levando em conta a simetria da ligação como uma estratégia de simplificação geométrica para reduzir o custo computacional. No modelo, foi representado um quarto da peça, conforme ilustrado na Figura 5(b). A escolha pelo modelo tridimensional se deu em função de análises adicionais realizadas, que não fazem parte do escopo deste trabalho. A madeira e os conectores foram simulados utilizando o elemento hexaédrico linear (DC3D8). Aplicou-se uma

discretização mais refinada nas regiões dos conectores (2 mm x 2 mm), enquanto no restante do modelo a malha foi limitada a 10 mm x 10 mm.

Figura 4 - Geometria dos modelos: (a) Martins (2016) e (b) Audebert *et al.* (2013)



Fonte: adaptado de (a) Martins (2016) e (b) Audebert *et al.* (2013).

Para ambos os modelos foram definidos pontos nodais específicos na malha como dados de saída da análise, correspondentes às posições dos termopares utilizados nos ensaios experimentais de referência, ilustrados na Figura 5. Esses pontos foram utilizados para monitorar a variação de temperatura no interior dos elementos de cada modelo.

Com a finalidade de avaliar a influência das propriedades térmicas no avanço da carbonização na madeira por meio de modelagem numérica, foram aplicados diferentes conjuntos de curvas para a condutividade térmica e o calor específico. No presente trabalho, para a relação entre a densidade do material em temperaturas elevadas e a densidade do material à temperatura ambiente foi adotada a proposta da EN 1995-1-2 (ECS, 2004) em todos os modelos.

Os conjuntos de curva definidos para aplicação neste estudo correspondem às propostas da norma europeia EN 1995-1-2 (ECS, 2004), de Audebert *et al.* (2013) e de Fernandes (2018). O conjunto de propriedades térmicas proposta por Audebert *et al.* (2013) foi elaborado a partir da combinação dos valores de condutividade térmica sugeridos por Janssens (1994) e dos valores de calor específico propostos por Fredlund (1993) e por Janssens (1994), calibrados com base em dados de ensaios experimentais. A proposta de Fernandes (2018) modifica apenas os valores de condutividade térmica em relação a EN 1995-1-2 (ECS, 2004), no entanto, foi adotada neste trabalho por ter sido calibrada a partir de ensaios experimentais obtidos por Martins (2016) para a madeira da espécie *Pinus sp.*

Para manter a clareza no desenvolvimento do trabalho, a expressão “modelos térmicos” será utilizada para se referir aos conjuntos de condutividade térmica, calor específico e razão de densidade dependentes da temperatura. A Tabela 1 apresenta a composição dos conjuntos de propriedades térmicas em cada modelo, enquanto a Figura 6 ilustra as curvas correspondentes à condutividade térmica e o calor específico.

Para a transferência de calor por convecção e radiação, as condições de contorno da análise térmica foram definidas a partir das temperaturas do incêndio padrão NBR 16965 (ABNT, 2021), equivalente à curva ISO 834 (ISO, 2025), aplicadas às superfícies expostas ao fogo. A emissividade da madeira foi considerada igual 0,8, conforme a EN 1995-1-2 (ECS, 2004), enquanto para o aço adotou-se o valor de 0,7, de acordo com a EN 1993-1-2 (ECS, 2005). O coeficiente de transferência de calor por convecção adotado foi de 25 W/m²K, conforme a EN 1991-1-2 (ECS, 2003), para ambos os materiais. As faces não expostas ao fogo foram definidas como adiabáticas, de modo que não ocorreu transferência de calor através dessas superfícies.

4 Resultados e discussões

Os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos serão comparados, nesta seção, com os dados experimentais. A linha indicativa de carbonização será considerada correspondente à temperatura de 300 °C, conforme proposto pela EN 1995-1-2 (ECS, 2004).

Figura 5 - Representação dos modelos numéricos e discretização da malha: (a) Martins (2016) e (b) Audebert *et al.* (2013)

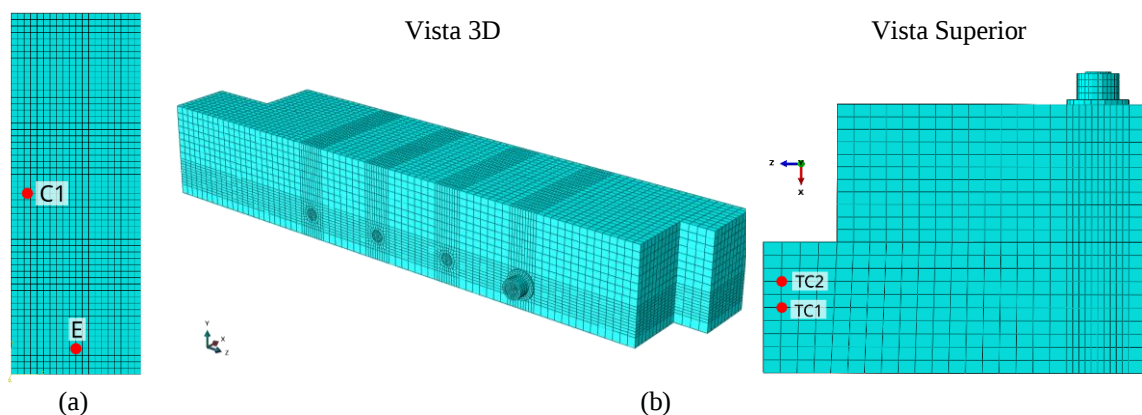
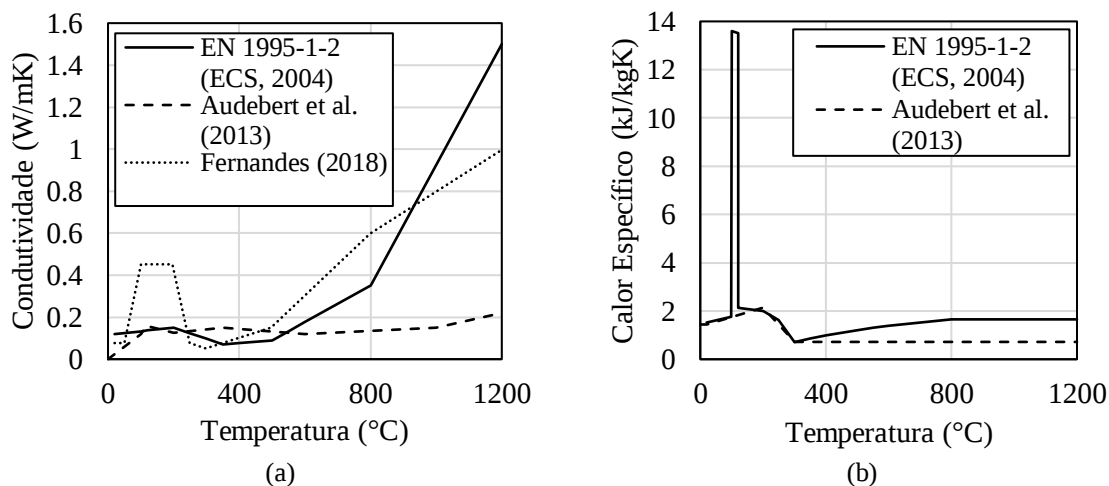


Tabela 1 - Conjuntos de propriedades térmicas de cada modelo

Modelo Térmico	Calor específico	Condutividade	Densidade
Mod. 1	EN 1995-1-2 (ECS, 2004)	EN 1995-1-2 (ECS, 2004)	EN 1995-1-2 (ECS, 2004)
Mod. 2	Audebert <i>et al.</i> (2013)	Audebert <i>et al.</i> (2013)	EN 1995-1-2 (ECS, 2004)
Mod. 3	EN 1995-1-2 (ECS, 2004)	Fernandes (2018)	EN 1995-1-2 (ECS, 2004)

Figura 6 - Propriedades térmicas da madeira aplicadas nos modelos: (a) Condutividade térmica e (b) Calor específico



4.1 Martins (2016)

A seguir são apresentados os resultados de evolução temporal da temperatura nos pontos C1 e E, considerando os dados dos ensaios experimentais desenvolvidos por Martins (2016).

Para o elemento de madeira *Lyptus*, o termopar no ponto C1, instalado a uma profundidade de 19 mm em relação a face exposta, registrou temperatura máxima de 225 °C ao final do ensaio, conforme apresentado na Figura 7. Observa-se que a curva baseada na proposta de Audebert *et al.* (2013), identificada como Mod. 2, apresentou boa correlação com a curva obtida no ensaio experimental no início do aquecimento. Entretanto, após aproximadamente 17 minutos de exposição, verificou-se um aumento expressivo da temperatura, com registro de valores superiores a 300 °C a partir de 37 minutos e temperatura final de 330 °C.

As propostas da EN 1995-1-2 (ECS, 2004) (Mod. 1) e de Fernandes (2018) (Mod. 3), apresentam boa correlação com os resultados experimentais até aproximadamente 7 minutos de exposição, intervalo no qual foi capaz de acompanhar de forma mais fiel a evolução térmica observada. A partir desse intervalo, a proposta normativa (Mod. 1) passou a subestimar as temperaturas medidas, resultando em diferença da ordem de 21% ao final do ensaio. Esse comportamento pode estar associado ao caráter conservador da abordagem normativa, que adota simplificações voltadas ao dimensionamento em situação de incêndio.

A proposta de Fernandes (2018), Mod. 3, demonstrou boa concordância com os resultados experimentais, especialmente no intervalo entre 17 a 36 minutos de exposição. A partir de 35 minutos de exposição, observa-se uma redução nos valores de temperatura, com registro final de 187 °C.

A leitura de temperaturas no ponto E, instalado a 30 mm da face exposta, apresentada na Figura 8, indica que, ao longo do ensaio, as temperaturas registradas permaneceram inferiores a 100 °C, com exceção da curva referente a proposta de Audebert *et al.* (2013) (Mod. 2), que registra temperatura próxima a 150 °C aos 40 minutos de exposição. Esse comportamento evidencia, que nessa profundidade, o efeito do aquecimento foi atenuado. Ao analisar a evolução térmica prevista pelo modelo baseado no conjunto de dados normativos (Mod. 1), observa-se que, até aproximadamente 33 minutos de exposição, o modelo reproduz adequadamente a tendência de crescimento gradual observada experimentalmente. A curva experimental registra um aumento da temperatura a partir desse instante, o que pode estar associado aos efeitos da degradação termoquímica da madeira ao longo do tempo de exposição.

Figura 7 - Evolução temporal da temperatura no elemento da espécie *Lyptus* no ponto C1

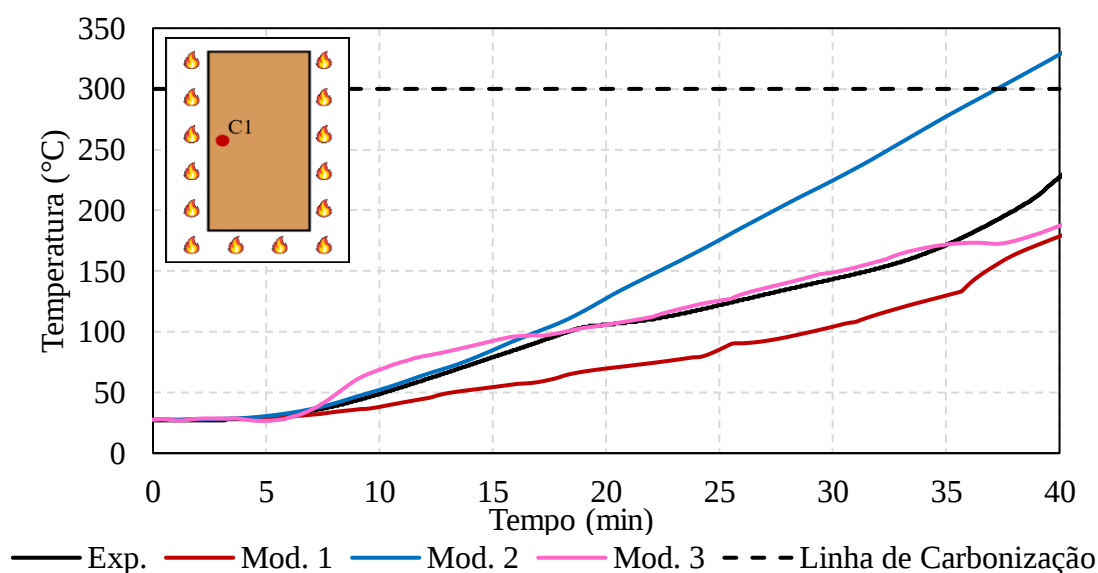
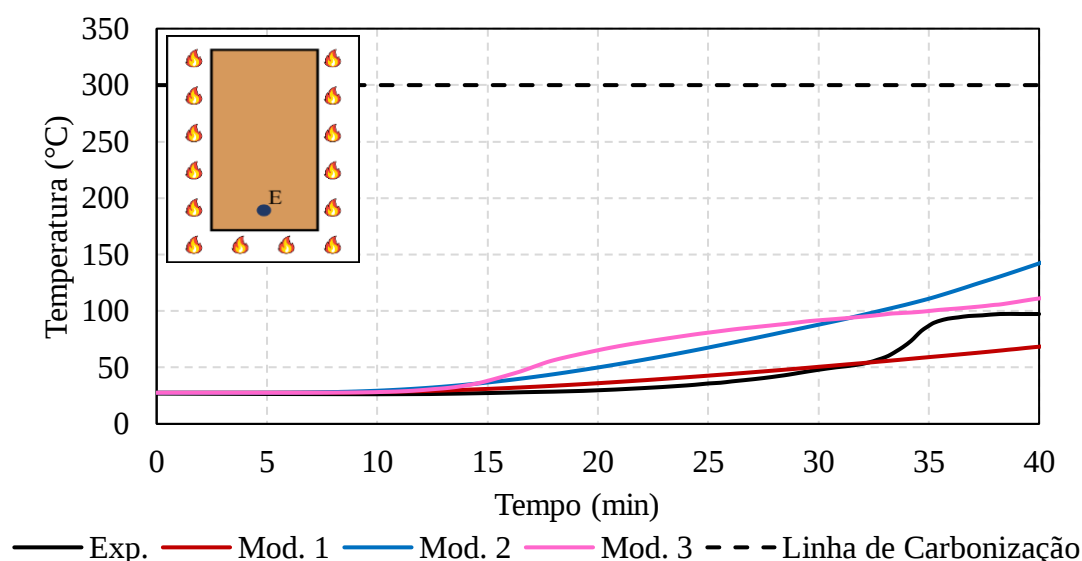


Figura 8 - Evolução temporal da temperatura no elemento da espécie *Lyptus* no ponto E

Os modelos numéricos fundamentados nas propostas de Audebert *et al.* (2013) (Mod. 2) e de Fernandes (2018) (Mod. 3) apresentaram boa correlação com os resultados experimentais apenas nos primeiros 10 minutos de exposição ao fogo. A partir deste instante, ambos os modelos passaram a prever temperaturas mais elevadas no ponto E. Entretanto, ao considerar exclusivamente a temperatura final registrada, observa-se que o modelo de Fernandes (2018), Mod. 3, apresentou diferença de apenas 14,4% em relação ao valor experimental.

Para os elementos da espécie de *Pinus*, a Figura 9, apresenta a evolução da temperatura no ponto C1, localizado a 19 mm da face exposta. Destaca-se que o aquecimento neste ponto ocorre de forma mais rápida quando comparado aos resultados obtidos para a madeira de *Lyptus* (Figura 7), evidenciando um avanço mais acentuado do fluxo de calor em direção ao interior da seção. Esse comportamento pode estar associado às características da espécie, em particular à sua menor densidade. Destaca-se que a linha de carbonização é ultrapassada por volta de 22 minutos de exposição, indicando o avanço da camada carbonizada até a profundidade de 19 mm.

A proposta normativa (Mod.1) apresenta, novamente, um comportamento de caráter menos restritivo, conforme observado anteriormente. De forma semelhante, a proposta de Fernandes (2018) (Mod. 3) acompanha a tendência da curva obtida pela norma, sendo que ambos os modelos registram temperaturas finais inferiores à linha de carbonização. A proposta de Audebert *et al.* (2013) (Mod. 2) apresenta temperaturas próximas às registradas no ensaio experimental durante aproximadamente os primeiros 15 minutos de exposição, após esse período, entretanto, as curvas passam a apresentar tendências distintas. No modelo de Audebert *et al.* (2013), a linha de carbonização é ultrapassada por volta de 29 minutos, sendo registrada uma temperatura máxima de 417 °C.

No ponto E, posicionado a 30 mm da face exposta, observa-se que nos primeiros 10 minutos de exposição, todas as curvas acompanham adequadamente o comportamento térmico obtido no ensaio experimental (Figura 10). Durante 30 minutos de exposição, o avanço térmico previsto com base na proposta da EN 1995-1-2 (ECS, 2004) (Mod. 1) apresenta a menor discrepância em relação aos dados experimentais, quando comparado aos demais modelos. O modelo proposto por Audebert *et al.* (2013) (Mod. 2) registra um aquecimento mais acentuado após aproximadamente 15 minutos de exposição, registrando temperatura máxima na faixa de 225 °C. Por sua vez, a curva obtida a partir da proposta de Fernandes (2018) (Mod. 3), ao se considerar exclusivamente a temperatura final, apresenta valores próximos aos registrados no ensaio experimental, comportamento semelhante ao observado anteriormente para a madeira de *Lyptus* (Figura 8).

A análise dos resultados evidencia que nenhuma das propostas de conjuntos de propriedades térmicas foi capaz de reproduzir de forma plenamente satisfatória a curva térmica obtida no ensaio experimental desenvolvido por Martins (2016). Dentre os modelos avaliados, a proposta de Fernandes (2018) (Mod. 3), apresentou melhor desempenho relativo, registrando temperaturas finais mais próximas às observadas experimentalmente nos pontos mais afastados da face exposta (Ponto E) para ambas as espécies, bem como boa correlação da curva de aquecimento no ponto C1 do elemento de *Lyptus*.

Figura 9 - Evolução temporal da temperatura da viga de Pinus para o ponto C1

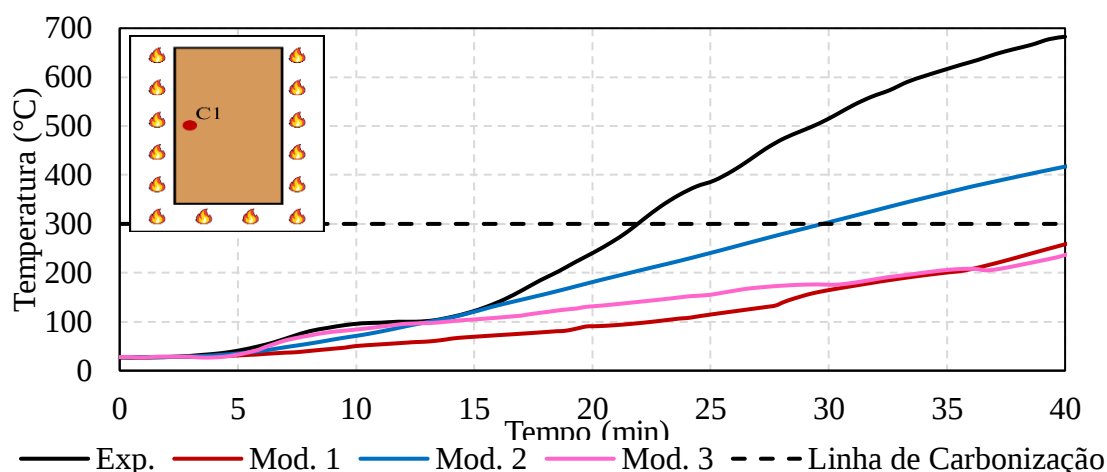
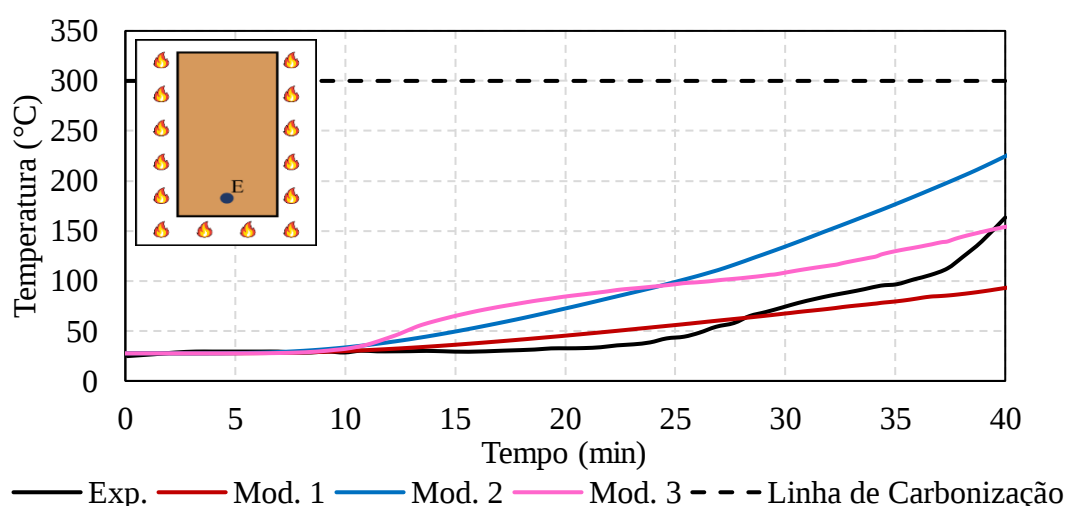


Figura 10 - Evolução temporal da temperatura da viga de Pinus para o ponto E

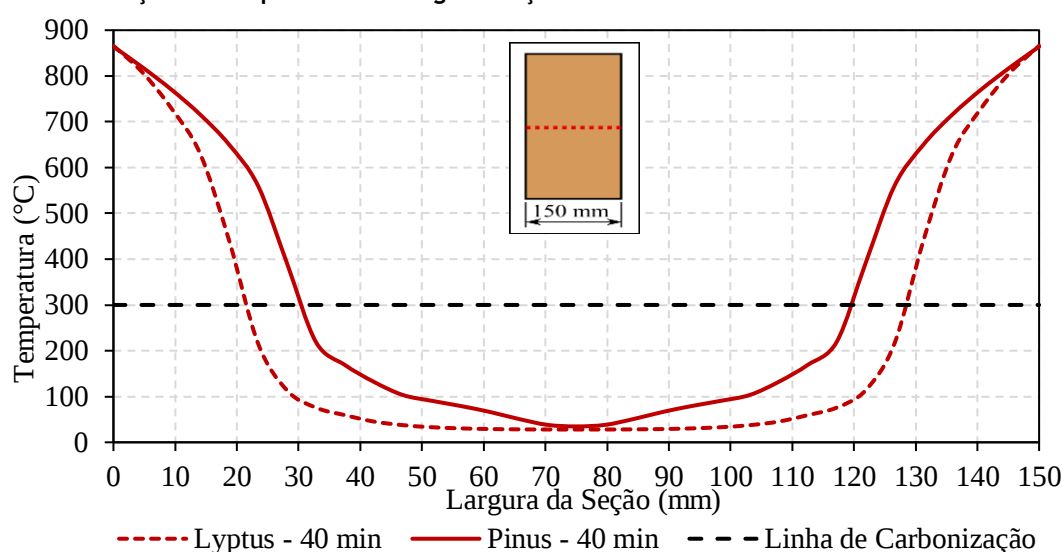


Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que Fernandes (2018) realizou a calibração da condutividade térmica com base nos resultados experimentais de Martins (2016), o que favorece a representação da transferência de calor ao longo da seção. Ressalta-se, entretanto, que essa calibração foi limitada a um único parâmetro térmico. Assim, uma melhor concordância entre os resultados numéricos e experimentais poderia ser alcançada por meio da calibração adicional de outras propriedades térmicas relevantes, como o calor específico e as relações de densidades em função da temperatura.

A Figura 11 ilustra a variação da temperatura no interior da seção transversal ao final da exposição do calor, com o objetivo de evidenciar distribuição de temperatura em direção ao núcleo, para as duas espécies de madeira analisadas. Os resultados apresentados correspondem aos modelos numéricos desenvolvidos com base no conjunto de propriedades térmicas proposto pela EN 1995-1-2 (ECS, 2004) (Mod. 1).

Observa-se que o aumento da temperatura avança mais rapidamente para o interior da seção da madeira de Pinus, resultando, conseqüentemente, em uma maior espessura da camada carbonizada quando comparada à madeira de Lyptus. Essa diferença pode ser atribuída principalmente à densidade da madeira, que constitui o único parâmetro distinto entre as propriedades térmicas adotadas nos modelos desenvolvidos para as duas espécies. Tal comportamento era esperado, uma vez que o Pinus, por se tratar de uma conífera com estrutura anatômica mais simples, maior permeabilidade e predominância de lenho tardio, favorece a condução de calor para o interior da seção. Em contrapartida, o Lyptus, classificado como uma folhosa com estrutura mais densa e porosidade reduzida, apresenta maior resistência à propagação térmica (Jang; Kang, 2019; Santos *et al.*, 2020).

Figura 11 - Variação da temperatura ao longo da seção transversal



Embora essa simplificação permita isolar o efeito da densidade no processo de transferência de calor, ela também constitui uma limitação do modelo, visto que outras propriedades relevantes, como calor específico e condutividade térmica, não foram diferenciadas entre as espécies. Assim, reforça-se a necessidade de caracterização experimental específica das propriedades térmicas de espécies nacionais, bem como de sua incorporação em modelos numéricos mais refinados, de modo a aumentar a confiabilidade das análises avançadas de segurança em incêndio.

Outro aspecto relevante observado na Figura 11, comum a ambas as espécies, é a expressiva diferença de temperatura entre as regiões mais externas da seção e o núcleo da madeira. Enquanto as camadas superficiais atingem temperaturas elevadas, o núcleo permanece com temperaturas significativamente mais baixas, inferiores a 50 °C, caracterizando uma região ainda não degradada. Esse comportamento evidencia a baixa condutividade térmica da madeira e da camada carbonizada como mecanismos de proteção térmica do núcleo da seção transversal.

4.2 Audebert *et al.* (2013)

A seguir, são apresentados os resultados de evolução temporal da temperatura nos pontos TC1 e TC2, considerando os dados dos ensaios experimentais desenvolvidos por Audebert *et al.* (2013). Os pontos analisados foram definidos a uma distância adequada das regiões de conexão, de modo a minimizar a influência dos elementos metálicos na avaliação do aquecimento da madeira.

Para o ponto TC1, posicionado a uma profundidade de 41 mm da face exposta (Figura 12), observa-se que as propostas de Audebert *et al.* (2013) (Mod. 2) e de Fernandes (2018) (Mod. 3) apresentaram boa correlação com a curva do ensaio experimental, mantendo tendência semelhante de elevação da temperatura ao longo do tempo. A tendência à subestimação térmica da EN 1995-1-2 (ECS, 2004) (Mod. 1), observada anteriormente, mantém-se neste caso, resultando em uma redução da temperatura final em aproximadamente 50%.

No ponto TC2, posicionado a uma profundidade de 26 mm da face exposta (Figura 13), observa-se que a curva de aquecimento obtida com o conjunto de propriedades térmicas proposto por Audebert *et al.* (2013) (Mod. 2) apresentou a melhor correlação com a curva experimental. Esse comportamento era esperado, uma vez que o referido conjunto de propriedades térmicas foi obtido a partir da calibração com os próprios dados experimentais.

A evolução térmica prevista pelos demais modelos não acompanha a tendência de aquecimento observada experimentalmente, registrando temperaturas inferiores, especialmente até cerca de 30 minutos de exposição ao fogo. A partir deste instante observa-se um aumento mais pronunciado da temperatura prevista pelo modelo baseado na EN 1995-1-2 (ECS, 2004) (Mod. 1), de modo que ao final da exposição, a temperatura máxima registrada se torna semelhante à experimental. A curva baseada na proposta de Fernandes (2018) (Mod. 3) apresenta um aumento de temperatura mais atenuado após os 5 minutos, resultando, ao final da exposição, em uma temperatura máxima aproximadamente 50 °C inferior àquela registrada no ensaio.

Figura 12 - Evolução temporal da temperatura da madeira no ponto TC1

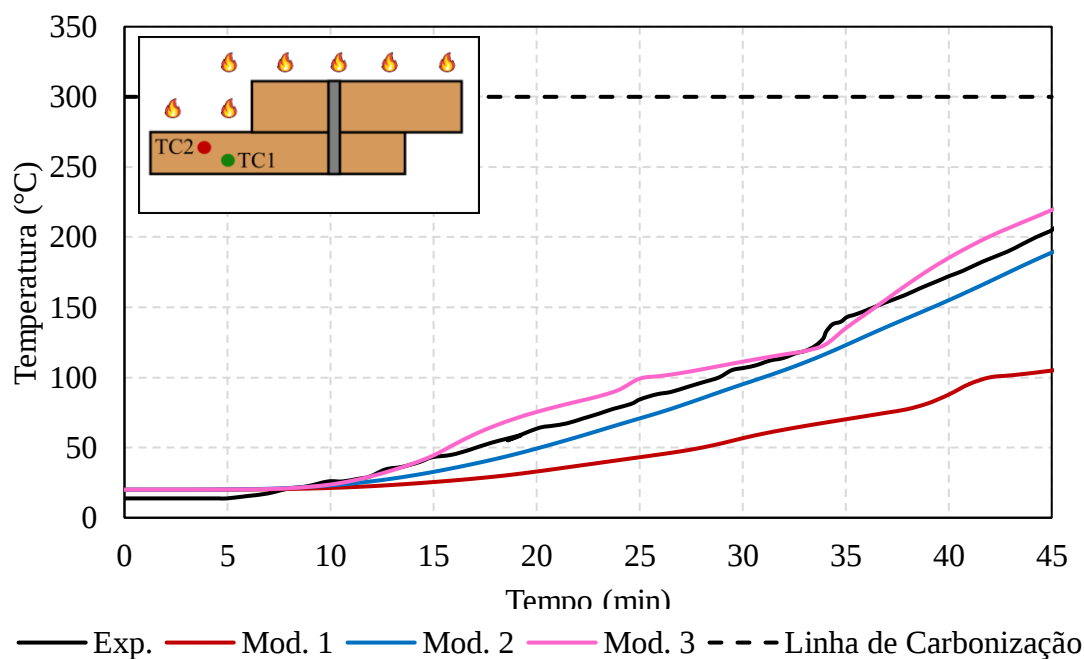


Figura 13 - Evolução da temperatura da madeira no ponto TC2

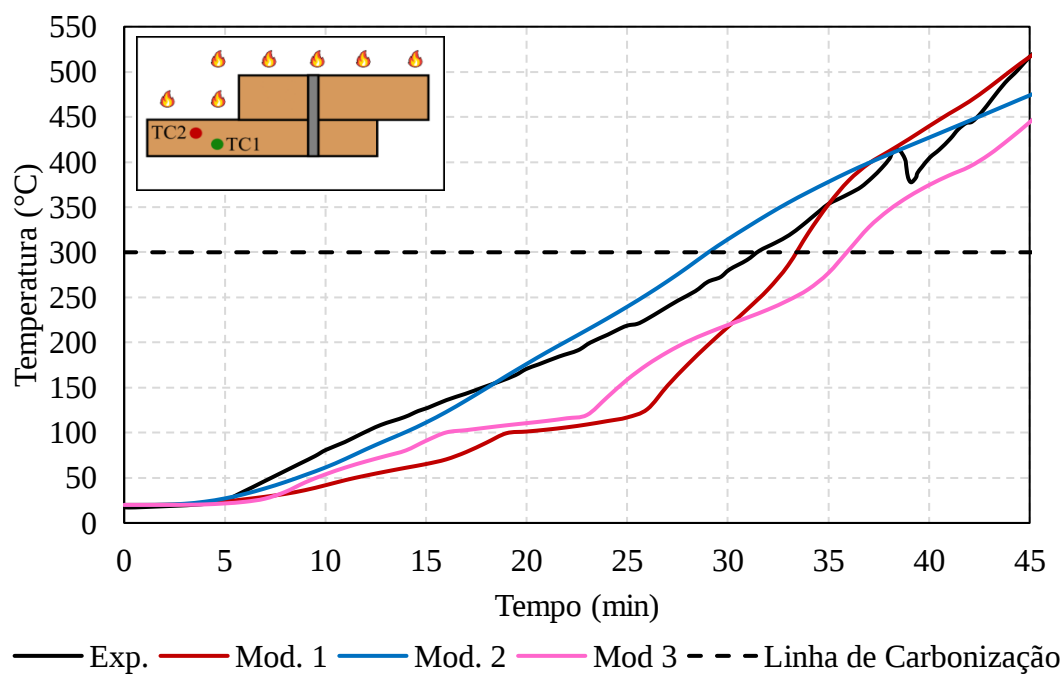
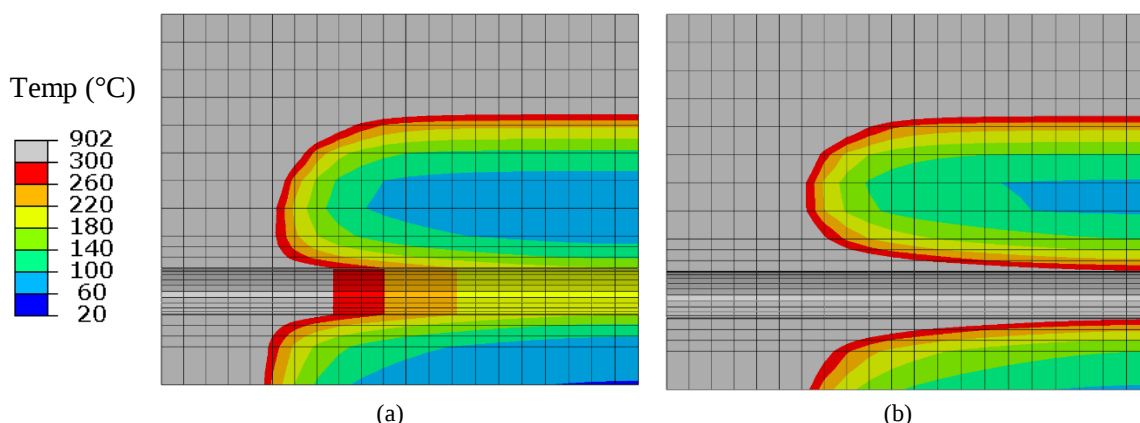


Figura 14 - Avanço do fluxo de calor no interior da seção na região de conexão após 45 minutos de exposição ao fogo: (a) Região do pino; (b) Região do parafuso



O modelo experimental desenvolvido por Audebert *et al.* (2013) apresenta conexões metálicas compostas por parafusos e pinos. Embora o comportamento mecânico das ligações não constitua o foco do presente trabalho, a Figura 14 ilustra o avanço do fluxo de calor para o interior da seção transversal na região das conexões. Observa-se que o aquecimento é mais intenso na região dos parafusos, quando comparado à dos pinos metálicos. Tal comportamento pode ser atribuído à maior área de contato dos parafusos exposta diretamente ao fogo, devido à cabeça do parafuso localizada na região externa da peça, o que favorece a condução do calor para o interior da seção. Na Figura 14, a região representada em cinza corresponde a temperaturas superiores a 300 °C, indicando a ocorrência de carbonização nessa área.

5 Conclusões

A qualidade das análises numéricas do comportamento térmico da madeira em situação de incêndio depende diretamente da precisão dos dados de entrada, evidenciando a importância da caracterização de propriedades térmicas específicas para espécies nacionais. Os resultados obtidos demonstram que os modelos que utilizam propriedades térmicas calibradas a partir de dados experimentais apresentam melhor capacidade de representar a evolução da temperatura no interior das seções analisadas.

O conjunto de propriedades térmicas proposto pela EN 1995-1-2 (ECS, 2004) resultou, de modo geral, em previsões que subestimam a elevação da temperatura, quando comparadas aos valores de ensaios experimentais considerados neste trabalho. Ressalta-se, entretanto, que a própria norma prevê a possibilidade de ajustes nesses valores, com o objetivo de aprimorar a representação do comportamento da madeira em situação de incêndio.

A influência da densidade foi identificada como um fator relevante no processo de transferência de calor entre espécies, a consideração isolada desse parâmetro não é suficiente para descrever de forma precisa o comportamento térmico completo. Observa-se, portanto, a necessidade de caracterização experimental específica do calor específico e da condutividade térmica, considerando a variabilidade entre espécies.

Nesse contexto, os resultados obtidos evidenciam a necessidade de investigações mais abrangentes voltadas à determinação de propriedades térmicas específicas para espécies brasileiras, visando à sua futura incorporação em normas nacionais, como a NBR 7190-1 (ABNT, 2022), e à aplicação consistente de método de dimensionamento avançado em situação de incêndio.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16965**: ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos: diretrizes gerais. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1**: projeto de estruturas de madeira: parte 1: critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022.
- AUDEBERT, M. *et al.* Thermo-mechanical behaviour of timber-to-timber connections exposed to fire. **Fire Safety Journal**, v. 56, p. 52-64, 2013.

- DU PLESSIS, M.; STREICHER, D.; WALLS, R. Experimental testing on concealed beam hanger mass timber connections under fire exposure. **Fire Technology**, v. 61, p. 5185-5210, jul. 2025.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-1-2: design of timber structures: part 1-2: general: structural fire design**. Brussels, 2004.
- FERNANDES, F. P. D. **Análise do comportamento em temperatura ambiente e em situação de incêndio de vigas mistas de madeira e concreto sem e com reforço com fibras de vidro**. São Carlos, 2022. 197 f. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.
- FERNANDES, F. P. D. **Análise numérica de vigas mistas de madeira e concreto em situação de incêndio**. São Carlos, 2018. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- FISCHER, E. C. Thermo-mechanical properties of timber structures. In: AWOYERA, P. O.; NASER, M. Z. (ed.). **Construction materials and their properties for fire resistance and insulation**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2024.
- FRANGI, A. **Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken**. Zurique, 2001. 240 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – ETH Zürich, Zurique, 2001.
- FREDLUND, B. Modelling of heat and mass transfer in wood structures during fire. **Fire Safety Journal**, v. 20, p. 39–69, 1993.
- FRIQUIN, K. L. Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glued-laminated timber. **Fire and Materials**, v. 35, p. 303-327, 2011.
- HADDAD, D.; FONSECA, E. M. M.; LAMRI, B. Thermal model for charring rate calculation in wooden cellular slabs under fire. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SAFETY AND DURABILITY OF STRUCTURES, 7., Vila Real, 2016. **Proceedings [...]** Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2016.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1: fire resistance tests: elements of building construction: part 1: general requirements**. International organization for standardization. Geneva, 2025.
- JANG, S.; KANG, W. Changes in gas permeability and pore structure of wood under heat-treating temperature conditions. **Journal of Wood Science**, v. 65, n. 61, p. 1–9, 2019.
- JANSSENS, M. Thermo-physical properties for wood pyrolysis models. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, 6., Gold Coast, 1994. **Proceedings [...]** Gold Coast, 1994.
- KIM, S.; CHOI, Y.; AN, J. Charring behavior and properties of cross-laminated timber wall assemblies exposed to fire. **Wood and Fiber Science**, v. 53, n. 5, p. 550-562, 2025.
- KLIPPEL, M. **Fire safety of bonded structural timber elements**. Zurique, 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – ETH Zürich, Zurique, 2014.
- KNUDSON, R. M.; SCHNIEWIND, A. P. Performance of structural wood members exposed to fire. **Forest Products Journal**, v. 25, n. 2, p. 23–32, 1975.
- KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology: solid Wood**. New York: Springer-Verlag, v. 1, 1968.
- KÖNIG, J.; KÄLLSNER, B. Thermal and mechanical properties of timber and some other materials used in light timber frame construction. In: INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION, Delft, 2000. **Proceedings [...]** Stockholm: Tratek - Swedish Institute for Wood Technology Research, 2000.
- KÖNIG, J.; WALLEIJ, L. **One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situations**. Stockholm: Swedish Institute for Wood Technology Research, 1999.
- MA, C. *et al.* Modeling fire resistance of timber columns: Influence of elevated-temperature material models in finite element analysis. **Structures**, v. 82, n. 110629, p. 1-13, 2025.
- MAHARJAN, S.; GUNAWARDENA, T.; MENDIS, P. Review of Experimental Testing and Fire Performance of Mass Timber Structures. **Journal of Composites Science**, v. 9, n. 6, p. 290, 2025.

- MARTINS, G. C. A. **Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio**. 2016. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- MEHAFFEY, J.; CUERRIER, P.; CARISSE, G. A model for predicting heat transfer through gypsum-board/wood-stud walls exposed to fire. **Fire Mater**, v. 18, n. 5, p. 297–307, 1994.
- ÖSTMAN, B. National fire regulations for the use of wood in buildings: worldwide review 2020. **Wood Material Science & Engineering**, v. 17, p. 2–5, 2022.
- PINTO, E. M. *et al.* Theoretical and experimental study of the thermal degradation of Eucalyptus timber. **Forest Products Journal**, v. 58, p. 85/4-89, 2008.
- QIN, D. *et al.* Numerical simulation of fire performance of beam-column connections in timber structures. **Engineering Structures**, v. 493, n. 143249, p. 1-16, 2025.
- SANTOS, I. S. *et al.* Physical and thermal properties of eucalyptus wood charcoal. **Cerne**, v. 26, n. 1, p. 72–80, 2020.
- SHI, L.; CHEW, M. Y. L. A review of thermal properties of timber and char at elevated temperatures. **Indoor and Built Environment**, v. 32, n. 1, p. 9-24, 2021.
- SIMPSON, W.; TENWOLDE, A. Physical properties and moisture relations of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY (ed.). **Wood Handbook: wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-113. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. Disponível em: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/7150>. Acesso em: 08 set. 2025.
- TABADDOR, M. **Thermal and mechanical finite element modeling of wood-floor assemblies subjected to furnace exposure**: as part of the Investigation into the Structural Stability of Engineered Lumber in Fire Conditions. Research Report NC9140. Northbrook: Underwriters Laboratories Inc., 2008. Disponível em: https://technicalpanels.fsri.org/docs/DHS_Report_Modeling_Floors_1208_final.pdf. Acesso em: 23 out. 2025.
- WANG, S.; HUANG, X.; LI, K. A Review of fire research on wood materials: research advances and prospects. **Journal of Engineering Thermophys**, v. 42, p. 2700–2719, 2021.
- WHESCHE, J. *et al.* **Temperaturentwicklung in brandbeanspruchten Holzquerschnitten**. Schlussbericht Forschungsvorhaben F90/1. München: Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, 1993.
- WHITE, R. H.; DIETENBERGER, M. Wood products: thermal degradation and fire. In: BUSCHOW, K. H. J. (ed.). **Encyclopedia of materials: science and technology**. Oxford: Elsevier Science, 2001.
- XING, Z.; ZHANG, J.; ASLANI, F. CLT two-way slabs fire resistance test and numerical simulation analysis. **Structures**, v. 105, n. 112529, p. 1-17, 2025.
- ZANG, X. *et al.* Contemporary fire safety engineering in timber structures: challenges and solutions. **Fire**, v. 7, n. 1, 2023.

Declaração sobre IA Generativa e Tecnologias Assistidas por IA no Processo de Escrita

Durante a preparação deste trabalho, o(s) autor(es) utilizou(aram) o ChatGPT para verificar problemas gramaticais e melhorar a legibilidade. Após a utilização desta ferramenta/serviço, o(s) autor(es) revisou(aram) e editou(aram) o conteúdo conforme necessário e assume(m) total responsabilidade pelo conteúdo da publicação.

Suporte Financeiro

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Dados de pesquisa somente disponíveis mediante solicitação ao autor correspondente.

Conflito de Interesses

Não há conflito de interesse.

Contribuição dos Autores

Mariana M. Fianco: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original. **Fabio M. Rocha:** Conceitualização, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Supervisão, Redação - revisão e edição. **Gisele C. A. Martins:** Conceitualização, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Editores-chefes: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros e Julio Molina**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.