

Variação da capacidade resistente de vigas de madeira em situação de incêndio

Thiago Damasceno Silva ^[1], Tarniê Vilela Nunes Narques ^[2], João Paulo Boff Almeida ^[3], André Luis Christoforo ^[4]

[1] damasceno.tds@gmail.com. [2] tarnie.projetos@gmail.com. [3] boff.joaopaulo@gmail.com. [4] christoforoal@yahoo.com.br. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv). Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

RESUMO

Neste trabalho foi analisada a variação dos esforços resistentes de vigas de madeira em situação de incêndio. Foram verificadas vigas de madeira folhosa com seção transversal retangular, divididas em dois grupos, sendo o primeiro constituído por vigas de madeira serrada e o segundo, por vigas de madeira laminada colada (MLC). Para efeito de comparação, variou-se a resistência à compressão paralela às fibras da madeira folhosa, considerando, ao todo, quatro classes de resistência: D30, D40, D50 e D60. Em todos os casos foi considerada a taxa de carbonização de 0,55 mm/min, associada a madeiras de média e alta densidade, segundo as normas técnicas de dimensionamento. Além disso, nenhuma proteção térmica foi adotada. Observou-se que o tempo máximo de resistência ao fogo foi de 40 minutos para as vigas de madeira serrada e de 120 minutos para as vigas de MLC. A variação dos esforços resistentes em função do tempo foi aproximadamente linear para a força cortante, enquanto o momento fletor apresentou variação ligeiramente não linear. A variação da classe de resistência da madeira promoveu diferenças proporcionais nos esforços resistentes.

Palavras-chave: Esforços resistentes. Estruturas de madeira. Situação de incêndio. Vigas.

ABSTRACT

The variation of timber beams' load-bearing capacity in fire conditions is analyzed in this work. Hardwood beams with rectangular cross-sections are verified, divided into two groups, the first one being solid timber and the second consisting of glued-laminated timber (glulam). For comparison, the compressive strength along the grain was varied and considered four resistance classes: D30, D40, D50, and D60. In all cases, the charring rate of 0.55 mm/min was considered, associated with medium and high density hardwoods according to technical standards, and no thermal protection was adopted. The maximum time of fire exposure was 40 minutes for the solid timber and 120 minutes for the glulam beams. The variation of the load-bearing capacity as a function of time of fire exposure was approximately linear for shear force, while the bending moment presented a slightly non-linear variation. The variation of the hardwood strength class promoted proportional differences in the load-bearing capacity.

Keywords: *Beams. Fire exposure. Load-bearing capacity. Timber structures.*

1 Introdução

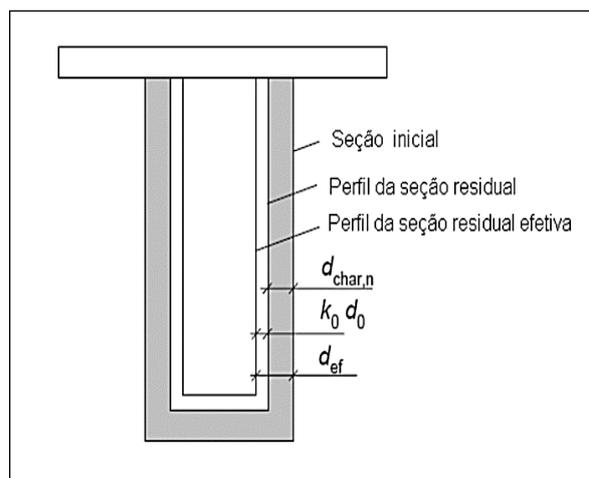
A madeira é um dos materiais de construção há mais tempo empregados pela humanidade, devido a sua considerável disponibilidade na natureza e à relativa simplicidade de manuseio e processamento (ALMEIDA *et al.*, 2020; ARAUJO *et al.*, 2016; CHRISTOFORO *et al.*, 2013; WIERUSZEWSKI; MAZELA, 2017). Apesar de possibilitar propriedades favoráveis quando utilizada como material estrutural, como uma excelente relação entre resistência mecânica e densidade (HUBER *et al.*, 2019; LIMA JUNIOR *et al.*, 2018; PRIES; MAI, 2013; RAMAGE *et al.*, 2017; VIDAL *et al.*, 2015), a madeira é um material combustível e degradável termicamente (FIGUEROA; MORAES, 2009; JIANG; LI; GAO, 2015).

A análise de estruturas de madeira em situação de incêndio não requer, explicitamente, o cálculo da distribuição de temperatura nos elementos, pois a capacidade resistente é avaliada desconsiderando as espessuras carbonizadas da seção transversal durante a exposição ao fogo (PURKISS, 2007). Por consequência, a análise é dividida em duas etapas principais. A primeira refere-se ao cálculo das espessuras carbonizadas, e a segunda, à determinação dos esforços resistentes da seção residual. Esse procedimento é conhecido como método da seção transversal reduzida e tem sido adotado em diversas normas voltadas ao dimensionamento de estruturas de madeira, como a norma europeia EN 1995-1 (CEN, 2004), a norma australiana AS 1720.4 (AS, 1990) e o projeto de revisão da norma brasileira ABNT NBR 7190 (ABNT, 2011). A Figura 1 ilustra o conceito de seção transversal residual da madeira em situação de incêndio, sendo destacada a alteração de suas dimensões durante a carbonização de três faces da seção.

No Brasil, apesar da grande biodiversidade de espécies de árvores – 14% do total registrado em todo o planeta (BEECH *et al.*, 2017) –, a utilização da madeira como material estrutural ainda é inexpressiva quando comparada à de países desenvolvidos (ARAUJO *et al.*, 2018; VIDAL *et al.*, 2015). Tal fato decorre, em parte, do preconceito relacionado à combustibilidade do material (CALIL JÚNIOR; DIAS, 1997; FIGUEROA; MORAES, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Visando analisar o comportamento mecânico da madeira em situações de incêndio, diversos trabalhos experimentais e numéricos têm sido desenvolvidos nos últimos anos (SCHNABL; TURK; PLANINC, 2011).

Figura 1 – Seção transversal residual da madeira em situação de incêndio



Fonte: projeto de revisão da NBR 7190 (ABNT, 2011)

Molina *et al.* (2012) realizaram um estudo numérico para avaliar a temperatura de elementos estruturais de madeira *Corymbia citriodora* em situação de incêndio, com seção transversal retangular de 6 cm x 16 cm, a partir do programa computacional ANSYS®. A evolução da temperatura da seção transversal foi comparada com resultados experimentais, em profundidades de 10 mm e 20 mm, sendo constatada concordância entre os valores. O aquecimento dos elementos foi simulado segundo a curva de incêndio-padrão proposta pela norma ISO 834-1:1999 (ISO, 1999).

Ni e Qiu (2012), com o auxílio de um forno horizontal, submeteram a condições de incêndio oito vigas de madeira laminada colada (MLC) com vão (L) de 540 cm e diferentes seções transversais (20 cm x 40 cm, 20 cm x 60 cm, 20 cm x 80 cm, 20 cm x 90 cm e 20 cm x 100 cm). Adotou-se como critério de parada do ensaio a deflexão máxima das vigas correspondente a L/20. Os autores concluíram que vigas com seções transversais maiores apresentaram melhor desempenho mecânico.

Oliveira *et al.* (2013) investigaram o comportamento perante a flexão e perante a compressão paralela às fibras da madeira cedrinho após submeterem o material a condições de incêndio. Para tanto, os autores adotaram corpos de prova padronizados conforme prescrições da ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997). As amostras foram expostas ao fogo por cinco períodos de tempo – 0 min (referência), 2,5 min, 5 min, 7,5 min e 10 min –, sendo que as

temperaturas não superaram 900 °C. Constatou-se decréscimo de 90% das resistências à flexão e à compressão paralela às fibras para o tempo de exposição de 10 min. Os autores evidenciaram que a perda de resistência está relacionada com a geometria da seção transversal da peça, sendo esse um fator a ser considerado em pesquisas futuras.

Por sua vez, Schmid *et al.* (2015), com o objetivo de validar os modelos de cálculo preconizados pelo Eurocode 5 (CEN, 2004), submetem paredes de *cross laminated timber* (CLT) de média e grande escala a condições de incêndio. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que as estimativas analíticas conduziram a soluções conservadoras em comparação aos resultados experimentais.

Nesse contexto, considerando que a segurança das estruturas de madeira pode ser comprometida pela ocorrência de incêndios, este trabalho teve como objetivo analisar, com o auxílio do método da seção transversal reduzida, a variação dos esforços resistentes de vigas de madeira serrada e de MLC em situação de incêndio, sem levar em consideração a proteção térmica.

2 Estruturas de madeira em situação de incêndio

Para estimativa da capacidade resistente, são adotados os procedimentos do método da seção transversal reduzida. Esse método é recomendado pelos códigos de dimensionamento atualmente em vigor, como o Eurocode 5 (CEN, 2004) e a norma australiana AS 1720.4 (AS, 1990). O projeto de revisão da norma brasileira ABNT NBR 7190 (ABNT, 2011) é baseado na norma europeia e também recomenda o método da seção transversal reduzida.

Em situação de incêndio, a segurança da estrutura de madeira é verificada em relação aos possíveis estados limites últimos conforme a igualdade indicada na Equação 1, na qual $S_{fi,d}$ denota a solicitação de cálculo em situação de incêndio e $R_{fi,d}$ denota o esforço resistente de cálculo em situação de incêndio.

$$S_{fi,d} = R_{fi,d} \quad (1)$$

Os esforços resistentes de cálculo em situação de incêndio ($R_{fi,d}$) são determinados genericamente de acordo com a Equação 2. Nessa expressão, o coeficiente de modificação é usualmente adotado com

valor unitário ($k_{mod,fi} = 1,0$), assim como o coeficiente de minoração da resistência da madeira em situação de incêndio ($\gamma_{w,fi} = 1,0$). O parâmetro $R_{0,2}$ refere-se ao esforço resistente de cálculo à temperatura normal para o 20º percentil sem o efeito de duração da ação e da umidade, ou seja, para $k_{mod} = 1,0$.

$$R_{fi,d} = k_{mod,fi} \cdot \frac{R_{0,2}}{\gamma_{w,fi}} \quad (2)$$

Em termos de capacidade resistente, no método da seção transversal reduzida considera-se que a madeira exposta ao fogo retém uma parcela da seção transversal com propriedades mecânicas intactas, mesmo depois de carbonizada. As espessuras afetadas pela carbonização são descontadas da seção original, pois as propriedades do carvão vegetal são desprezadas na estimativa da capacidade resistente.

A espessura de carbonização, determinada por meio da Equação 3, resulta do produto entre a taxa de carbonização (β_n) e o tempo de exposição ao fogo (t). Nesse caso, β_n é associada a peças com mais de uma face exposta ao fogo e leva-se em consideração o arredondamento dos cantos da seção (PINTO, 2005).

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t \quad (3)$$

A espessura efetiva de carbonização é calculada conforme a Equação 4, que considera a espessura de carbonização acrescida em 7 mm – esse valor representa a região interna aquecida e é definido pelo produto $k_0 \cdot d_0$ exposto na Figura 1.

$$d_{ef} = d_{char,n} + 7 \text{ mm} \quad (4)$$

A partir da espessura efetiva de carbonização, é possível obter as dimensões da seção transversal residual por meio das Equações 5 e 6, considerando a situação de uma viga com seção transversal retangular, carbonizada em três faces.

$$b_{ef} = b - 2 \cdot d_{ef} \quad (5)$$

$$h_{ef} = h - d_{ef} \quad (6)$$

As propriedades geométricas da seção transversal podem ser calculadas a partir das dimensões da seção transversal residual: área (A_{ef}), momento de inércia ($I_{x,ef}$) e módulo elástico ($W_{x,ef}$), conforme expressam as Equações 7, 8 e 9, respectivamente.

$$A_{ef} = b_{ef} \cdot h_{ef} \tag{7}$$

$$I_{x,ef} = \frac{b_{ef} \cdot h_{ef}^3}{12} \tag{8}$$

$$W_{x,ef} = \frac{I_{x,ef}}{h_{ef}/2} \tag{9}$$

O momento resistente da seção transversal em situação de incêndio ($M_{Rd,fi}$) é verificado por meio da Equação 10, definido pelo produto entre $W_{x,ef}$ e a resistência à compressão paralela às fibras em situação de incêndio ($f_{c0,fi}$). Considera-se que, nesse caso, a flexão é simples e ocorre em relação ao eixo x.

$$M_{Rd,fi} = W_{x,ef} \cdot f_{c0,fi} \tag{10}$$

A resistência à compressão paralela às fibras em situação de incêndio é obtida a partir da Equação 11, sendo $f_{c0,2}$ a resistência à compressão paralela às fibras à temperatura normal para o 20º percentil sem o efeito de duração da ação e da umidade. Os coeficientes $k_{mod,fi}$ e $\gamma_{w,fi}$ são considerados unitários, conforme mencionado na descrição da Equação 2.

$$f_{c0,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{c0,2}}{\gamma_{w,fi}} \tag{11}$$

Sendo: $f_{c0,2} = k_{fi} \cdot f_{c0,k}$

O valor de k_{fi} depende do tipo de madeira empregado, conforme a Tabela 1. Para madeiras serradas tem-se $k_{fi} = 1,25$, enquanto no caso de madeira laminada colada observa-se $k_{fi} = 1,15$.

Tabela 1 – Valores de k_{fi}

Material	k_{fi}
Madeira serrada	1,25
Madeira laminada colada	1,15
Painéis à base de madeira	1,15
LVL	1,10

Fonte: Eurocode 5 (CEN, 2004)

A força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio ($V_{Rd,fi}$) é definida pela Equação 12, obtida a partir da equação da tensão de cisalhamento em vigas com seção retangular.

$$V_{Rd,fi} = \frac{A_{ef} \cdot f_{v0,fi}}{1,5} \tag{12}$$

De forma análoga à resistência à compressão, a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em situação de incêndio é calculada a partir da Equação 13, sendo $f_{v0,2}$ a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras à temperatura normal para o 20º percentil sem o efeito de duração da ação e da umidade.

$$f_{v0,fi} = k_{mod,fi} \cdot \frac{f_{v0,2}}{\gamma_{w,fi}} \tag{13}$$

Sendo: $f_{v0,2} = k_{fi} \cdot f_{v0,k}$

3 Material e métodos

Os esforços resistentes em situação de incêndio são determinados conforme as Equações 10 e 11, posteriormente à consideração da redução da seção transversal resistente devido às espessuras carbonizadas. O tempo de exposição ao fogo é atribuído como variável na análise, de 0 a 40 minutos para as vigas de madeira serrada e de 0 a 120 minutos para as vigas de MLC. Em todos os casos, as vigas são expostas ao fogo em três faces, sendo afetadas as duas faces laterais e a face inferior, e não há aplicação de proteção térmica.

Para análise da variação dos esforços resistentes, são verificados dois grupos de vigas com seção transversal retangular, sendo o primeiro de madeira serrada e o segundo de MLC. As seções das vigas de madeira serrada possuem dimensões de 6 cm x 16 cm, valores típicos utilizados na construção de estruturas de cobertura no Brasil. As seções das vigas de MLC possuem dimensões de 15 cm x 42 cm, cujos valores foram baseados em vigas similares ensaiadas por Martins (2016) e representadas na Figura 2.

Foram consideradas cinco classes de resistência para verificação da influência da resistência da madeira na capacidade resistente, conforme a evolução do incêndio. Todas as classes avaliadas são relativas a madeiras folhosas, e suas propriedades são apresentadas na Tabela 2 de acordo com a ABNT NBR 7190 (ABNT, 2011).

Figura 2 – Viga de MLC ensaiada em laboratório



Fonte: Martins (2016)

Tabela 2 – Propriedades das madeiras folhosas verificadas

Classes	$f_{c0,k}$	$f_{v0,k}$	$E_{c0,m}$	ρ_{ap}
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(kg/m ³)
D30	30	5	14500	800
D40	40	6	19500	950
D50	50	7	22000	970
D60	60	8	24500	1000

$f_{c0,k}$ = resistência característica à compressão paralela às fibras;
 $f_{v0,k}$ = resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras;
 $E_{c0,m}$ = módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras;
 ρ_{ap} = densidade aparente.

Fonte: projeto de revisão da ABNT NBR 7190 (ABNT, 2011)

Para estimativa das espessuras de carbonização, foi adotada a taxa de carbonização de 0,55 mm/minuto em todos os casos. Esse valor é associado a elementos de madeiras de média e alta densidade com mais de uma face exposta ao fogo, conforme os parâmetros do Eurocode 5 (CEN, 2004), expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Taxas de carbonização segundo o Eurocode 5 (CEN, 2004)

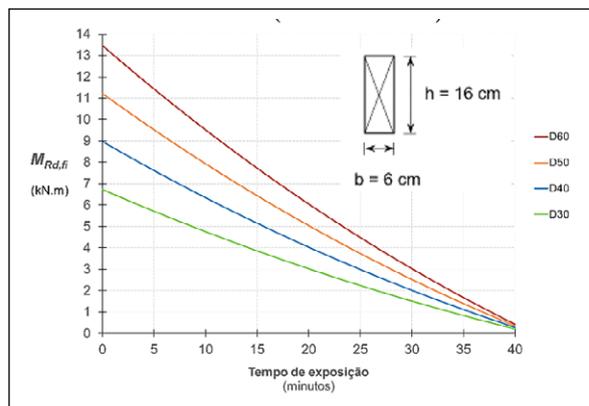
Tipo de madeira	Taxa de carbonização (mm/min)	
	β_o	β_n
Coníferas		
MLC ($\rho \geq 290$ kg/m ³)	0,65	0,70
Madeira serrada ($\rho \geq 290$ kg/m ³)	0,65	0,80
Folhosas		
MLC ou madeira serrada ($\rho = 290$ kg/m ³)	0,65	0,70
MLC ou madeira serrada ($\rho > 450$ kg/m ³)	0,50	0,55

Fonte: adaptado de Purkiss (2007)

4 Resultados e discussão

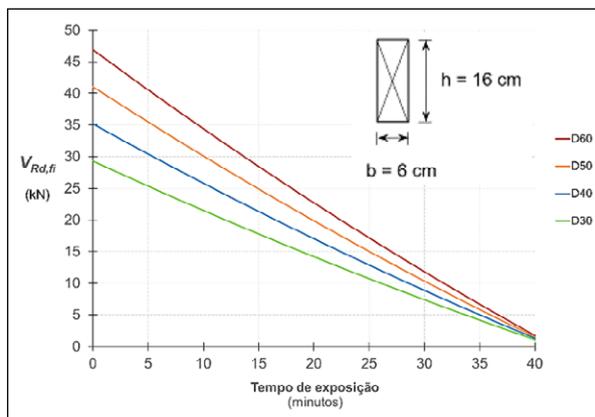
No caso das vigas de madeira serrada, verifica-se graficamente, pela Figura 3, a variação determinada para o momento fletor resistente em situação de incêndio. Já a variação da força cortante resistente nessa situação é apresentada na Figura 4.

Figura 3 – Variação do momento resistente em situação de incêndio (madeira serrada)



Fonte: dados da pesquisa

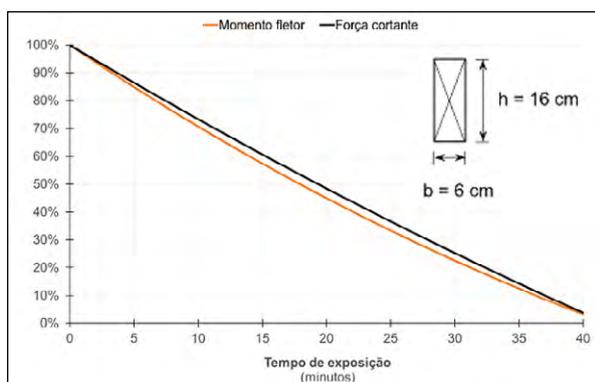
Figura 4 – Variação da força cortante resistente em situação de incêndio (madeira serrada)



Fonte: dados da pesquisa

Observa-se que, no tempo final de exposição ao fogo (40 minutos), as vigas de madeira serrada praticamente já não apresentavam capacidade resistente, devido à transformação de considerável parte da seção transversal (6 cm x 16 cm) em carvão. Aos 20 minutos – metade do tempo total de exposição –, o momento fletor resistente havia sido reduzido em 55%, e a força cortante resistente, em 51,6%. Na Figura 5 é possível notar a variação percentual dos esforços resistentes das vigas de madeira serrada ao longo do tempo de exposição ao fogo. As variações mencionadas são válidas para todas as classes de resistência avaliadas.

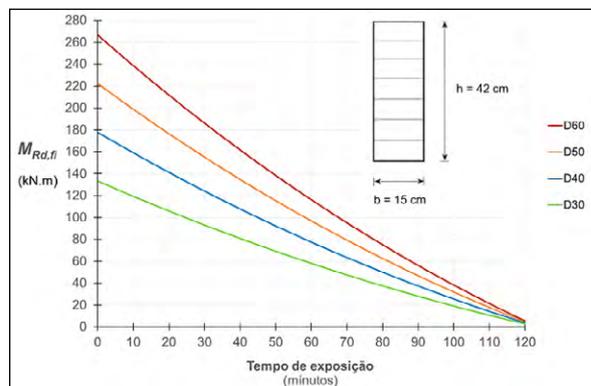
Figura 5 – Variação percentual dos esforços resistentes (madeira serrada)



Fonte: dados da pesquisa

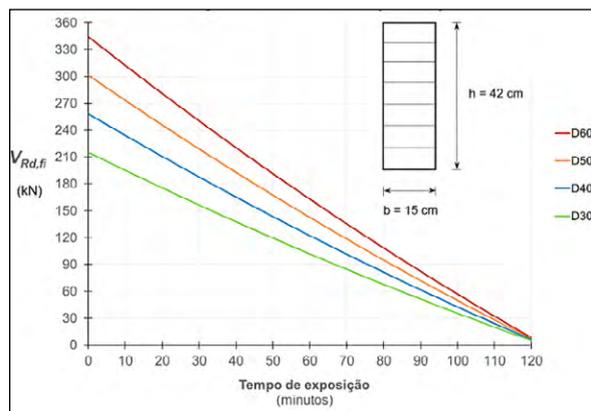
Com relação às vigas de MLC, as variações dos esforços resistentes em situação de incêndio são indicadas nos gráficos das Figuras 6 e 7, para momento fletor e força cortante, respectivamente.

Figura 6 – Variação do momento resistente em situação de incêndio (MLC)



Fonte: dados da pesquisa

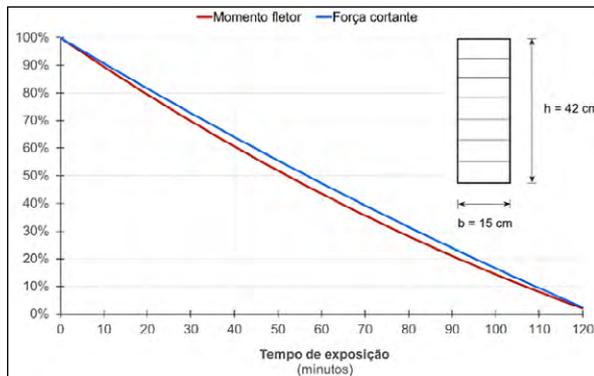
Figura 7 – Variação da força cortante resistente em situação de incêndio (MLC)



Fonte: dados da pesquisa

O tempo de exposição ao fogo das vigas de MLC foi três vezes superior – aproximadamente 120 minutos. Além de apresentar maior desempenho quanto ao incêndio, os esforços resistentes foram mais significativos em comparação à seção de madeira maciça. Aos 60 minutos, o momento fletor resistente havia sido reduzido em 56,4%, e a força cortante resistente, em 52,6%, para todas as classes de resistência das vigas de MLC. A variação percentual dos esforços resistentes é representada graficamente na Figura 8.

Figura 8 – Variação percentual dos esforços resistentes (MLC)



Fonte: dados da pesquisa

Em geral, é possível notar que a variação dos esforços resistentes em função do tempo de exposição ao fogo foi aproximadamente linear para a força cortante ($V_{Rd,fi}$), enquanto o momento fletor ($M_{Rd,fi}$) apresentou uma variação ligeiramente não linear. Esse comportamento pode ser observado nos casos referentes às vigas de madeira serrada e às vigas de MLC, constatando-se a semelhança entre os gráficos das Figuras 5 e 8.

A variação da classe de resistência promoveu diferenças proporcionais nos esforços resistentes dos elementos em situação de incêndio. Por exemplo, as vigas com madeira pertencente à classe de resistência D60 alcançaram aproximadamente o dobro do valor do momento resistente das vigas de madeira classe D30, uma vez que possuem o dobro de resistência à compressão paralela às fibras. Essa premissa é válida tanto em temperatura ambiente quanto em situação de incêndio, considerando as vigas de madeira analisadas.

O desempenho mecânico das vigas de MLC foi consideravelmente superior ao das vigas de madeira serrada, devido às dimensões da seção transversal. A base da seção transversal das vigas de MLC foi equivalente a duas vezes e meia a base da viga de madeira serrada, e a altura foi sete vezes superior. Na comparação dos esforços resistentes, o momento fletor resistente das vigas de MLC foi vinte vezes maior, em média, e a força cortante resistente superou em sete vezes a das vigas de madeira serrada. De tal modo, nota-se que as dimensões da seção transversal influenciam consideravelmente o desempenho mecânico das vigas de madeira em situação de incêndio.

5 Considerações finais

Neste trabalho, avaliou-se a variação da capacidade resistente de vigas de madeira serrada e de MLC sem proteção térmica em situação de incêndio, a partir do método da seção transversal reduzida. Considerou-se que as vigas foram expostas ao fogo em três faces, e foram adotadas quatro classes de resistência segundo a norma brasileira ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997). Para determinação das espessuras carbonizadas, adotou-se como taxa de carbonização o valor de 0,55 mm/minuto, o qual é recomendado para madeiras de média e alta densidade considerando exposição ao fogo em mais de uma face do elemento.

Em geral, as seguintes conclusões foram observadas no trabalho:

- as vigas de madeira serrada com seção retangular (6 cm × 16 cm) apresentaram capacidade resistente por até 40 minutos de exposição ao fogo, aproximadamente.
- devido às dimensões (15 cm × 42 cm), as vigas compostas de MLC com seção retangular proporcionaram maior desempenho em situação de incêndio, apresentando capacidade resistente por até 120 minutos de exposição ao fogo, aproximadamente. Os esforços resistentes também foram mais significativos em comparação à seção de madeira maciça.
- a variação da força cortante resistente das vigas em função do tempo de exposição ao fogo foi aproximadamente linear, enquanto o momento fletor resistente apresentou variação ligeiramente não linear.
- houve proporcionalidade nos esforços resistentes com a variação da classe de resistência da madeira.

REFERÊNCIAS

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira (Projeto de Revisão). Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ALMEIDA, J. P. B.; COUTO, N. G.; AQUINO, V. B. M.; WOLENSKI, A. R. V.; PEIXOTO, R. G.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Relações entre propriedades de rigidez para distintas solicitações mecânicas visando projetos de estruturas de madeira. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, p. 25-35, 2020. DOI: 10.1590/s1678-86212020000200385. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/YH6JFjkTzjZG8q64LzHhygK/>. Acesso em: 21 set. 2021.

ARAUJO, V. A.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; GARCIA, J. N.; SOUZA, A. J. D.; SAVI, A. F.; MORALES, E. A. M.; MOLINA, J. C.; VASCONCELOS, J. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Classification of wooden housing building systems. **BioResources**, v. 11, n. 3, p. 7889-7901, 2016. DOI: 10.15376/biores.11.3.dearaujo. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/classification-of-wooden-housing-building-systems/>. Acesso em: 23 set. 2021.

ARAUJO, V. A.; VASCONCELOS, J. S.; MORALES, E. A. M.; SAVI, A. F.; HINDMAN, D. P.; O'BRIEN, M. J.; NEGRÃO, J. H. J. O.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; GARCIA, J. N. Difficulties of wooden housing production sector in Brazil. **Wood Material Science & Engineering**, v. 15, n. 2, p. 87-96, 2020. DOI: 10.1080/17480272.2018.1484513. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17480272.2018.1484513>. Acesso em: 27 set. 2021.

AS – AUSTRALIAN STANDARD. **AS 1720.4**: Timber Structures – Part 4: Fire resistance for structural adequacy of timber members. Homebush: Australian Standard, 1990.

BEECH, E.; RIVERS, M.; OLDFIELD, S.; SMITH, P. P. GlobalTreeSearch: the first complete global database of tree species and country distributions. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 36, n. 5, p. 454-489, 2017. DOI: 10.1080/10549811.2017.1310049. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10549811.2017.1310049>. Acesso em: 26 set. 2021.

CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 1, n. 1, p. 71-77, 1997. DOI: 10.15376/biores.13.2.3377-3385. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43661997000100071&lng=en&nrn=iso&tlng=pt. Acesso em: 27 set. 2021. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v1n1p71-77.

CEN – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-1**: Eurocode 5:

Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design. Brussels: CEN, 2004.

CHRISTOFORO, A. L.; BLECHA, K. A.; CARVALHO, A. L. C.; REZENDE, L. F. S.; LAHR, F. A. R. Characterization of tropical wood species for use in civil constructions. **Journal of Civil Engineering Research**, v. 3, n. 3, p. 98-103, 2013. DOI: 10.5923/j.jce.20130303.02. Disponível em: <http://article.sapub.org/10.5923.j.jce.20130303.02.html>. Acesso em: 23 set. 2021.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 158-174, 2009. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/9547>. Acesso em: 23 set. 2021.

HUBER, J. A. J.; EKEVAD, M.; GIRHAMMAR, U. A.; BERG, S. Structural robustness and timber buildings – a review. **Wood Material Science & Engineering**, v. 14, n. 2, p. 107-128, 2019. DOI: 10.1080/17480272.2018.1446052. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17480272.2018.1446052>. Acesso em: 23 set. 2021.

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

JIANG, J.; LI, J.; GAO, Q. Effect of flame retardant treatment on dimensional stability and thermal degradation of wood. **Construction and Building Materials**, v. 75, n. 30, p. 74-81, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.037. Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20153169065>. Acesso em: 25 set. 2021.

LIMA JUNIOR, M. P.; BIAZZON, J. C.; ARAUJO, V. A.; MUNIS, R. A.; MARTINS, J. C.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; VALARELLI, I. D.; MORALES, E. A. M. Mechanical Properties Evaluation of Eucalyptus grandis Wood at Three Different Heights by Impulse Excitation Technique (IET). **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 3377-3385, 2018. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/mechanical-properties-evaluation-of-eucalyptus-grandis-wood-at-three-different-heights-by-impulse-excitation-technique-iet/>. Acesso em: 23 set. 2021.

MARTINS, G. C. A. **Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C.; KIMURA, E. F. A.; PINTO, E. M.; REGOBELLO, R. Análise numérica do comportamento de elementos de madeira em situação de incêndio. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 162-170, 2012. DOI: 10.4322/floram.2012.019. Disponível em: <https://floram.org/doi/10.4322/floram.2012.019>. Acesso em: 24 set. 2021.

NI, Z. P.; QIU, P. F. Experimental study on fire resistance performance of glulam beams. **Applied Mechanics and Materials**, v. 193-194, n. 1, p. 539-543, 2012. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.193-194.539. Disponível em: <https://www.scientific.net/AMM.193-194.539>. Acesso em: 26 set. 2021.

OLIVEIRA, L. K.; GRAEFF, A. G.; RODRIGUES, E. E. C.; SILVA FILHO, L. C. P. Estudo experimental sobre o comportamento da resistência mecânica de amostras de madeira sob ação de fogo simulando incêndios residenciais. **Revista Alconpat**, v. 3, n. 1, p. 55-70, 2013. DOI: 10.21041/ra.v3i1.43. Disponível em: <https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/view/43>. Acesso em: 25 set. 2021.

PINTO, E. M. **Determinação de um modelo para a taxa de carbonização transversal a grã para a madeira de E. citriodora e E. grandis**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PRIES, M.; MAI, C. Fire resistance of wood treated with a cationic silica sol. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 71, n. 2, p. 237-244, 2013. DOI: 10.1007/s00107-013-0674-7. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-013-0674-7>. Acesso em: 26 set. 2021.

PURKISS, J. A. **Fire safety engineering design of structures**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P. F.; SCHERMAN, O. The wood from the tress: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, part 1, p. 333-359, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.107. Disponível em: <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/261239>. Acesso em: 27 set. 2021.

SCHIMID, J.; MENIS, A.; FRAGIACOMO, M.; CLEMENTE, I.; BOCHICCHIO, G. Behaviour of loaded cross-laminated timber wall elements in fire conditions. **Fire Technology**, v. 51, p. 1341-1370,

2015. DOI: 10.1007/s10694-015-0516-8. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10694-015-0516-8>. Acesso em: 27 set. 2021.

SCHNABL, S.; TURK, G.; PLANINC, I. Buckling of timber columns exposed to fire. **Fire Safety Journal**, v. 46, n. 7, p. 431-439, 2011. DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.07.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379711211001019>. Acesso em: 25 set. 2021.

VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 257-271, 2015. DOI: 10.5902/1980509817484. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/17484/0>. Acesso em: 26 set. 2021.

WIERUSZEWSKI, M.; MAZELA, B. Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Form of Construction Wood. **Drvna Industrija**, v. 68, n. 4, p. 359-367, 2017. DOI: 10.5552/drind.2017.1728. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/191947>. Acesso em: 23 set. 2021.