


## Influência da densidade na resistência à flexão de vigas de madeira sob situação de fogo e proposta de uma nova equação

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.026-028>

**Pedro Verona Perini**

Escola Politécnica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo (SP) Brasil.

**Fabício Longhi Bolina**

Departamento de Estruturas e Construção Civil (DECC), Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria (SC) Brasil.

---

### RESUMO

Com o objetivo de identificar a correlação entre densidade, taxa de carbonização e resistência à flexão, foram comparados os diferentes métodos apresentados pelo Eurocódigo 5 para verificação de vigas de madeira sob exposição ao fogo, com o uso do software Abaqus/CAE para obter as isotermas das vigas no método de cálculo avançado, e então proposta uma nova equação para obter sua profundidade de carbonização de acordo com o tempo de exposição ao fogo. Confirmou-se que a densidade da madeira é inversa à sua taxa de carbonização e à sua perda de resistência à flexão, sendo que o método de cálculo avançado apresenta resultados menos conservadores do que os métodos simplificados. A equação proposta neste estudo teve resultados um pouco mais conservadores do que o cálculo avançado, mostrando-se adequada em relação ao tempo gasto no cálculo, esforço computacional e economia.

**Palavras-chave:** Densidade, Carbonização, Fogo, Eurocódigo 5, Cálculo avançado.

## 1 INTRODUÇÃO

Importantes edifícios históricos com estrutura de madeira foram danificados pelo fogo neste século, entre os quais podem ser destacados o telhado da Catedral de Notre-Dame em Paris, uma das catedrais mais icônicas do mundo, e o Museu Nacional do Rio de Janeiro, o maior museu de história natural da América Latina. Destruição maciça Além disso, eles levantam o ceticismo de construtores e projetistas quando se trata de estruturas de madeira em situação de incêndio [1].

Por outro lado, percebe-se atualmente um crescimento na utilização da madeira como principal material de estruturas construtivas [2], estando fortemente relacionado à sua industrialização, o que, juntamente com suas características renováveis e de estocagem de carbono, torna esse material uma boa alternativa para criar sistemas construtivos sustentáveis, facilitando o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU [3]. O aumento da área de florestas plantadas – otimizando custo, qualidade e durabilidade – também traz interesse para a construção [4], tornando o tema fogo extremamente importante de ser abordado.

Em vez de queimar diretamente, a madeira é afetada pelo efeito da pirólise, na qual altas temperaturas (em torno de 300 °C) geradas pelo fogo decompõem o material em carvão – produzindo então combustão [5]. O carvão forma uma camada de proteção quando se trata de aumento de temperatura no interior da seção de madeira, pois sua condutividade térmica é menor do que a encontrada na madeira em condições ambientais [5]. Devido à variabilidade de sua composição natural, é plausível que a profundidade do carvão seja ligeiramente diferente em cada seção (incluindo seções do mesmo corpo de prova, principalmente em madeira serrada ou maciça) [5].

Sendo considerada a importância de compreender o comportamento das estruturas de madeira sob fogo, é razoável encontrar alternativas aos ensaios experimentais, que tendem a ter um alto custo associado. Uma opção conveniente é o Método dos Elementos Finitos (FEM), que apresenta resultados realistas em operações mais baratas e eficientes [6]. O Eurocódigo 5 (EC5) indica valores a serem usados no que chama de métodos de cálculo avançados [7] e diferentes autores [6; 8] atestaram esses números executando análises numéricas e comparando seus resultados com os experimentais, embora se saiba que os especialistas podem discordar da precisão dos valores sugeridos por ele [6].

THI et al (2016) compararam testes experimentais com análise numérica baseada em cinco abordagens diferentes. Uma análise numérica foi construída sobre as características térmicas da madeira aquecida fornecidas pelo EC5 usando a curva ISO 834 de temperatura versus tempo, enquanto as outras usaram uma curva de regressão com quatro conjuntos diferentes de propriedades térmicas descritas por diferentes fontes: EC5, Janssens, Fredlund e Knudson. O autor afirma que, devido à dispersão significativa dos resultados nos testes experimentais, os cinco métodos podem ser aceitos [6]. No entanto, é essencial afirmar que ambas as análises do EC5 foram semelhantes entre si, sendo

visivelmente diferentes da análise baseada nos outros autores – que também foram semelhantes entre si.

Embora o EC5 apresente os métodos de cálculo avançados para encontrar resultados precisos, ele também sugere procedimentos simplificados – método da seção reduzida e método das propriedades reduzidas – com taxas de carbonização constantes e pré-definidas como alternativa para encontrar a seção transversal residual de um membro de madeira, dando diferentes etapas para atingir sua resistência final [7]. Os métodos simplificados tendem a apresentar resultados menos precisos quando comparados aos MEF, mas são uma forma mais rápida de encontrá-los, sendo razoáveis para casos simples. Os procedimentos simplificados dados pelo EC5 não consideram diretamente a densidade da madeira, embora estudos experimentais [9; 10] tenham demonstrado que ela é uma característica que afeta a taxa de carbonização da madeira.

NJANKOUO et al. [11] contrastaram os resultados experimentais da taxa de carbonização de diferentes espécies de madeira com os valores recomendados pelos simplificados da versão anterior do EC5. Quando comparados com a versão atual (0,70 mm/min para madeiras macias e 0,55 mm/min para madeiras duras), seus resultados mostraram uma segurança razoável – 3 dos 20 corpos de prova apresentaram maior taxa de carbonização nos testes experimentais, sendo um de uma espécie de madeira macia (0,71 mm/min) e dois de espécies de madeira dura (0,58 e 0,59 mm/min). Os testes também confirmaram taxas de carbonização mais baixas para espécies de madeira mais densa.

CACHIM & FRANSSEN [12] afirmam que a taxa de carbonização depende de vários fatores, como espécies de madeira, densidade, teor de umidade, direção da queima (paralela ou perpendicular ao grão), etc.; no entanto, para fins práticos, apenas alguns deles podem ser considerados. Em seu estudo, eles definiram as taxas de carbonização de madeiras macias com diferentes densidades usando um método de cálculo avançado, comparando-as com as taxas de carbonização dos métodos simplificados. Os autores afirmam que há uma inconsistência entre os métodos de cálculo simplificado e avançado apresentados pelo EC5, pois o segundo leva em consideração a influência da densidade. Sua análise numérica demonstrou que maiores densidades de madeira resultam em menores taxas de carbonização, convergindo com a relação inversa entre densidade e difusividade térmica, mostrando que os métodos simplificados sugeridos pelo EC5 podem negligenciar uma correlação significativa da mesma com a degradação mecânica da madeira – diferente das Normas Australianas, por exemplo, que utilizam a densidade da madeira como principal característica para obter sua taxa de carbonização para procedimentos simplificados.

Este estudo, mais do que obter a taxa de carbonização com base na orientação EC5 para cálculo avançado, comparou os resultados da perda de resistência à flexão em vigas de madeira de quatro espécies de madeira com densidades distintas em diferentes durações de fogo. Identificou-se o grau de conservadorismo adotado pelos métodos simplificados e propôs-se uma nova equação contemplando



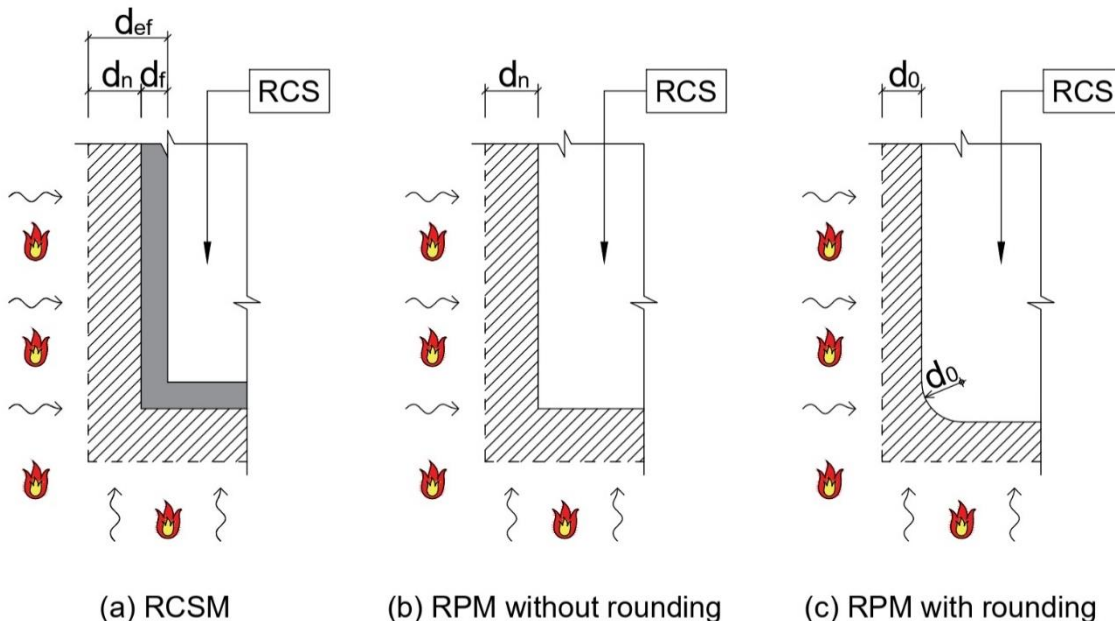
a influência da densidade da madeira. O software Abaqus/CAE foi utilizado para determinar as isotermas de temperatura nas seções do feixe nas diferentes durações do fogo.

## 2 EUROCÓDIGO 5 MÉTODOS PARA VERIFICAR A RESISTÊNCIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O EC5 define dois métodos simplificados para verificar elementos estruturais lineares de madeira (colunas, vigas) em situação de incêndio. O método da secção reduzida (RCSM) consiste em determinar uma profundidade de carbonização com base na taxa de carbonização nocional ( $\beta_n$ ) e no tempo de ocorrência do fogo, acrescentando-lhe uma profundidade extra a reduzir a partir da secção transversal (7 mm para incêndios com duração igual ou superior a 20 minutos); A verificação é feita usando a seção transversal reduzida e considerando as propriedades integrais da madeira. O método das propriedades reduzidas (RPM) também leva em consideração a taxa de carbonização e o tempo de exposição ao fogo, considerando um fator de modificação ( $k_{mod,fi}$ ) para compensar a mudança nas propriedades da madeira em altas temperaturas;  $k_{mod,fi}$  depende do perímetro e da área da seção transversal residual e para a resistência à flexão é dada pela Eq. (1). O método das propriedades reduzidas pode ser utilizado com duas taxas de carbonização diferentes: a taxa de carbonização nocional ( $\beta_n$ ), que é maior para compensar não considerando o efeito de arredondamento dos cantos, e a taxa de carbonização unidimensional ( $\beta_0$ ), que deve considerar o efeito de arredondamento. Figo. 1 demonstra as particularidades de cada método, considerando os membros de madeira desprotegidos.

$$k_{mod,fi} = 1,0 - p \div (200 \times A_r) \quad \text{Eq. (1)}$$

Fig. 1: Particularidades de cada método simplificado proposto pelo Eurocódigo 5



RCS = residual cross-section

$$d_n = \beta_n \times t$$

$$d_0 = \beta_0 \times t$$

$$d_r = 7t/20, \text{ for } t < 20$$

$$7, \text{ for } t \geq 20$$

- - - initial surface

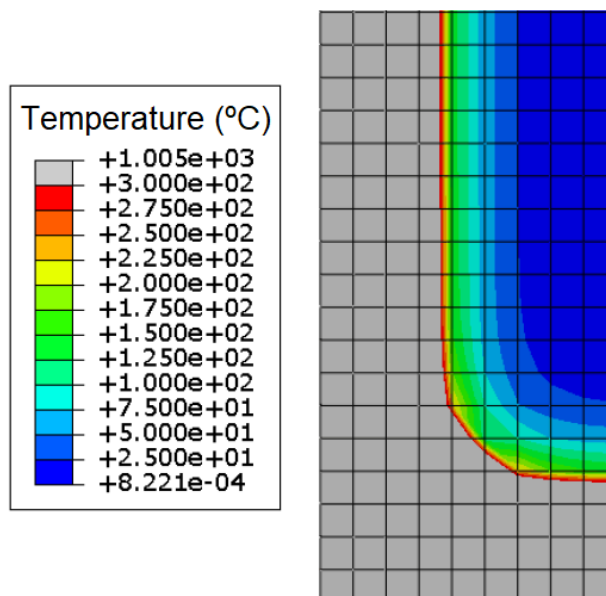
▨ charred wood

■ extra charred depth

□ remaining wood

Entre as opções que o EC5 oferece para métodos de cálculo avançados, há uma que conduz à obtenção da profundidade de carbonização usando o método dos elementos finitos (FEM) e introduzindo essa profundidade dentro do RPM. Neste caso, o MEF é utilizado para análise térmica e os resultados são apresentados por um software na forma de isothermas. A Fig. 2 ilustra um exemplo obtido neste estudo, para o qual foi utilizado o software Abaqus/CAE para modelar o elemento de madeira e o cenário de incêndio proposto pelo EC5. A área cinza – representando 300°C ou mais –, indica a madeira carbonizada ou desbotada, sendo desconsiderada no procedimento de cálculo.

Fig. 2: Resultado da análise térmica do elemento de madeira com modelação FEM



### 3 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONIZAÇÃO

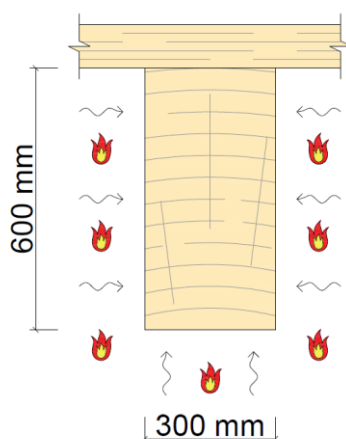
Para confrontar os resultados dos métodos simplificados, este estudo utilizou duas espécies de madeira macia (*Pinus elliotti* – SW1; *Pinus taeda* L. – SW2) e duas espécies de madeira de folhosas (*Eucalyptus saligna* – HW3; *Tabebuia serratifolia* – HW4) para determinar a profundidade de carbonização e a seção transversal residual por meio da análise FEM, sendo as espécies de densidades distintas, a fim de possibilitar a discussão sobre a influência da densidade na taxa de carbonização e na resistência à flexão. Os valores de densidade utilizados foram obtidos a partir das Normas Brasileiras [13] e são apresentados na Tabela 1, com suas respectivas propriedades termofísicas para diferentes valores de temperatura de acordo com EC5.

Tabela. 1: Propriedades termofísicas das espécies de madeira de acordo com o Eurocódigo 5

Temperatura (°C)	Densidade				Condutividade (W / m.K)	Calor específico (kJ/kg. K)
	SW1	SW2	HW3	HW4		
20	560	645	731	1068	0,12	1530
99	560	645	731	1068		1770
99	560	645	731	1068		13600
120	500	575,9	652,7	953,6		13500
120	500	575,9	652,7	953,6		2120
200	500	575,9	652,7	953,6	0,15	2000
250	465	535,6	607	886,8		1620
300	380	437,7	496	724,7		710
350	260	299,5	339,4	495,9	0,07	850
400	190	218,8	248	362,4		1000
500					0,09	
600	140	161,3	182,8	267		1400
800	130	149,7	169,7	247,9	0,35	1650
1200	0	0	0	0	1,5	1650

A profundidade de carbonização foi determinada para durações de fogo de 30, 60, 90, 120 e 150 min, sendo também considerado um "incêndio de minuto zero", representando o instante de ignição, no qual o método de cálculo considera a seção transversal inicial integral com procedimentos de verificação de incêndio, portanto, não há discrepância no desenvolvimento da perda de resistência devido aos diferentes fatores de modificação adotados. Optou-se por uma seção transversal retangular de 300 mm x 600 mm e considerou-se a incidência de fogo em três dos quatro lados do elemento estrutural, simulando uma laje apoiada no lado mais fino de uma viga, conforme mostrado na Fig. 3.

Fig.3: Seção transversal com a correspondente incidência de incêndio



Os resultados da profundidade de carbonização para os métodos simplificados são mostrados na Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4. Pode-se observar que os resultados não são determinados por espécies, mas por sua classe, e a profundidade de carbonização é maior para madeiras nobres, pois EC5 adota valores de taxa de carbonização mais baixos para esta classe.

Tabela.2: Profundidade de carbonização para o método da secção reduzida

Viga	Profundidade de carbonização (mm) – RSCM				
	30'	60'	90'	120'	150'
SW1/SW2	31	55	79	103	127
HW3/HW4	23,5	40	56,5	73	89,5

Tab.3: Profundidade de carbonização para o Método de Propriedades Reduzidas sem efeito de arredondamento

Viga	Profundidade de carbonização (mm) – RPM sem efeito de arredondamento				
	30'	60'	90'	120'	150'
SW1/SW2	24	48	72	96	120
HW3/HW4	16,5	33	49,6	66	82,5

Tab.4: Profundidade de carbonização para o Método de Propriedades Reduzidas com efeito de arredondamento

Viga	Profundidade de carbonização (mm) – RPM com efeito de arredondamento				
	30'	60'	90'	120'	150'
SW1/SW2	19,5	39	58,5	78	97,5
HW3/HW4	15	30	45	60	75

Por outro lado, os resultados do cálculo com o MEF mostram que a densidade desempenha um papel importante na determinação da perda de material lenhoso das vigas de madeira, concordando com diferentes autores [9 – 12, 14] e com a AS 1720.4 [15]. A tab. 5 apresenta os valores de profundidade de carbonização encontrados com a análise numérica, enquanto a Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 e Fig. 6 os comparam com os resultados dos métodos simplificados.

Tabela. 5: Profundidade de carbonização para a análise numérica da Modelação de Elementos Finitos

Viga	Profundidade de carbonização (mm) – FEM				
	30'	60'	90'	120'	150'
SW1	18	36	51	65	78
SW2	17	34	47	60	73
HW3	16	31	45	57	68
HW4	15	26	36	46	56

Fig. 4: Profundidade de carbonização de SW1 para os diferentes métodos

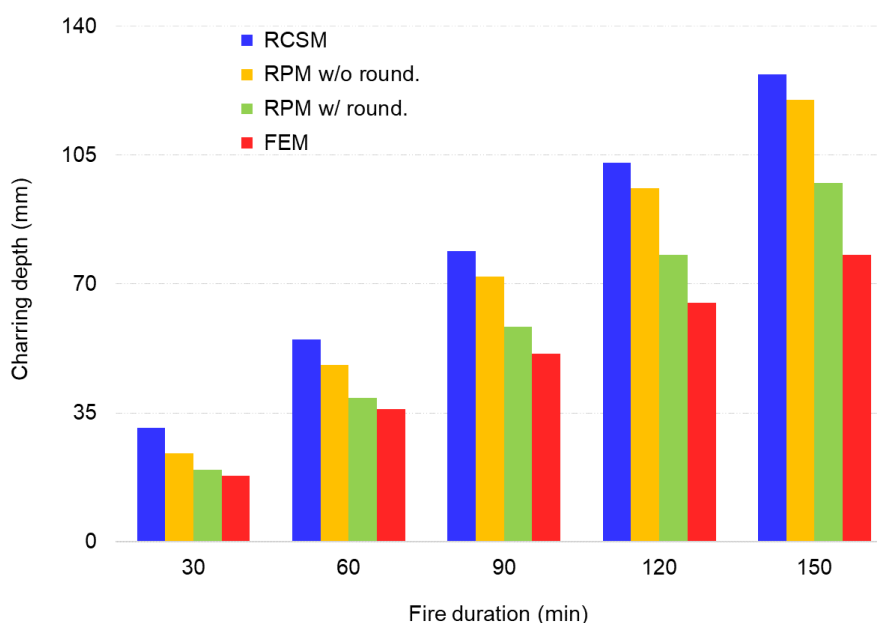




Fig. 5: Profundidade de carbonização de SW2 para os diferentes métodos

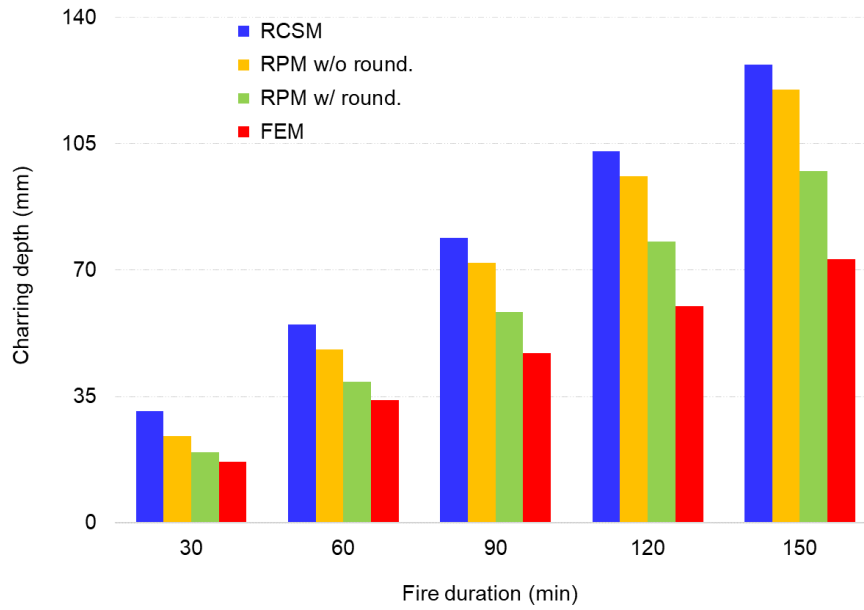


Fig. 6: Profundidade de carbonização de HW3 para os diferentes métodos

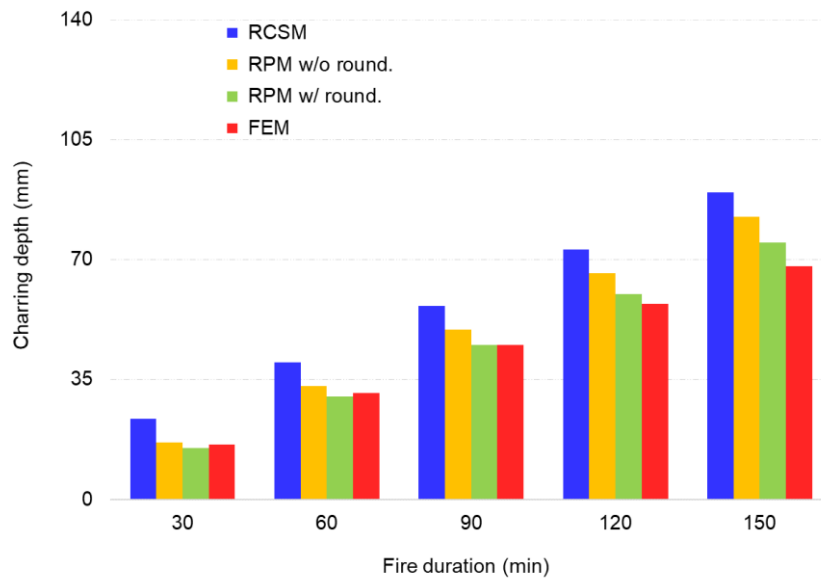
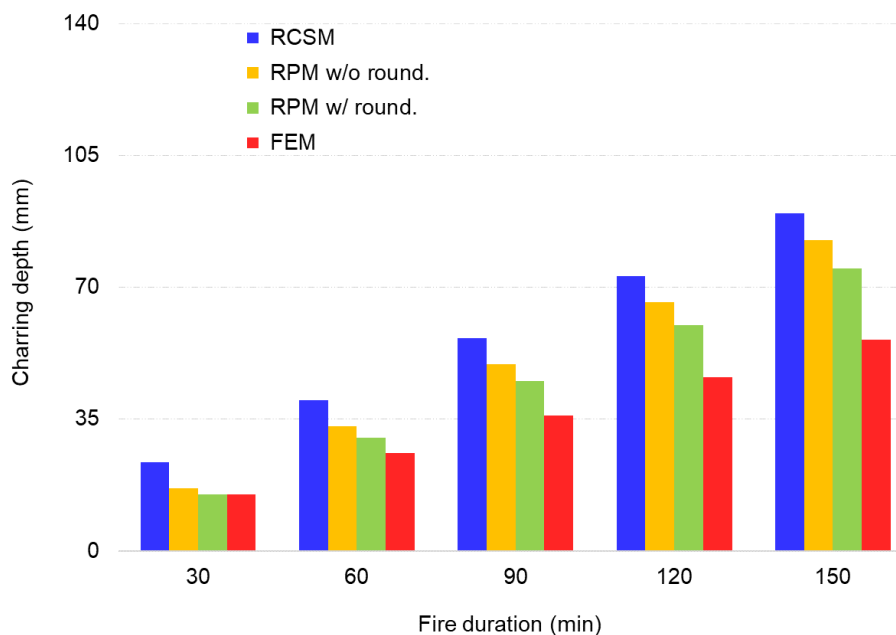


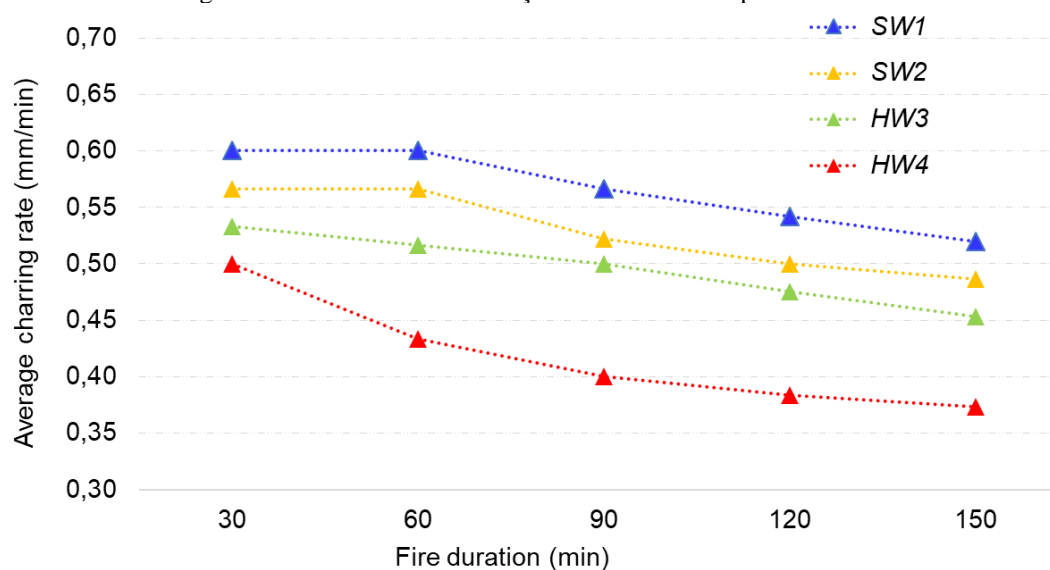
Fig. 7: Profundidade de carbonização de HW4 para os diferentes métodos



Pode-se observar que a profundidade de carbonização é maior para densidades menores e, com exceção de HW3 com 30 e 60 min, foram inferiores para análise numérica se comparadas com o uso de métodos simplificados.

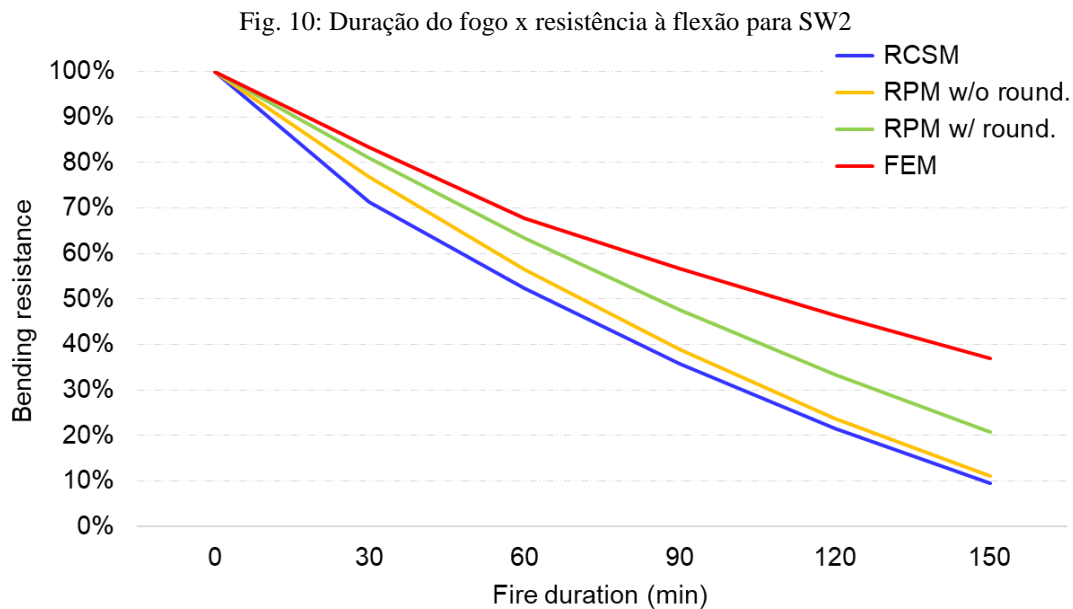
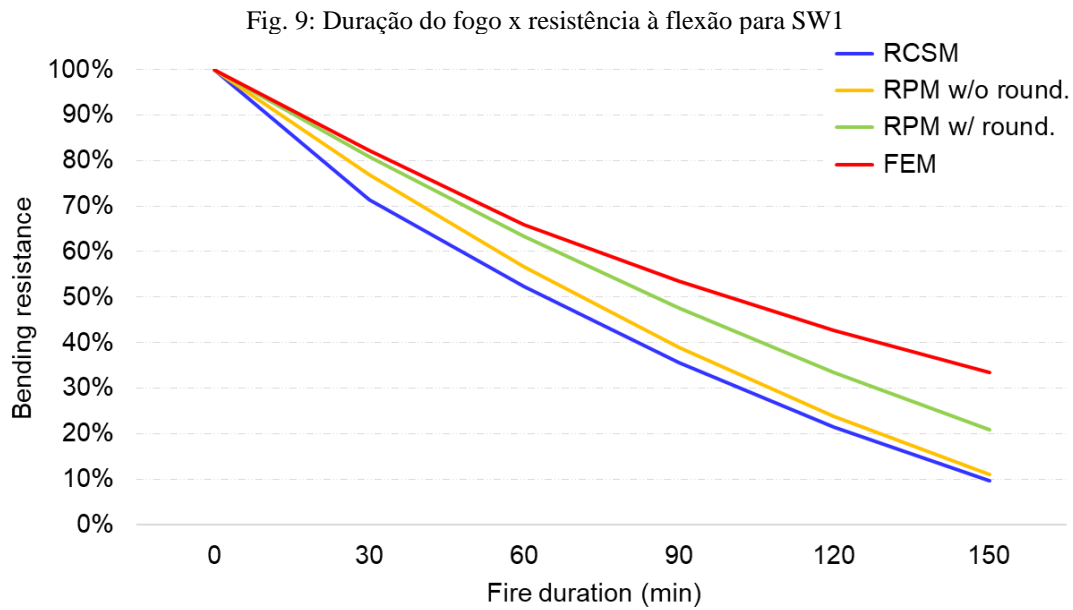
Avaliando a taxa média de carbonização resultante da análise numérica, que é apresentada pela Fig. 7, pode-se observar que ela diminui à medida que ocorre o incêndio, devido à condutividade térmica do carvão ser menor do que a condutividade da madeira que o originou, conforme indicado por EC5 e FRIQUIN [5, 7]. A taxa média de carbonização tende a ser constante por infinitas vezes de exposição ao fogo, corroborando com [5, 16].

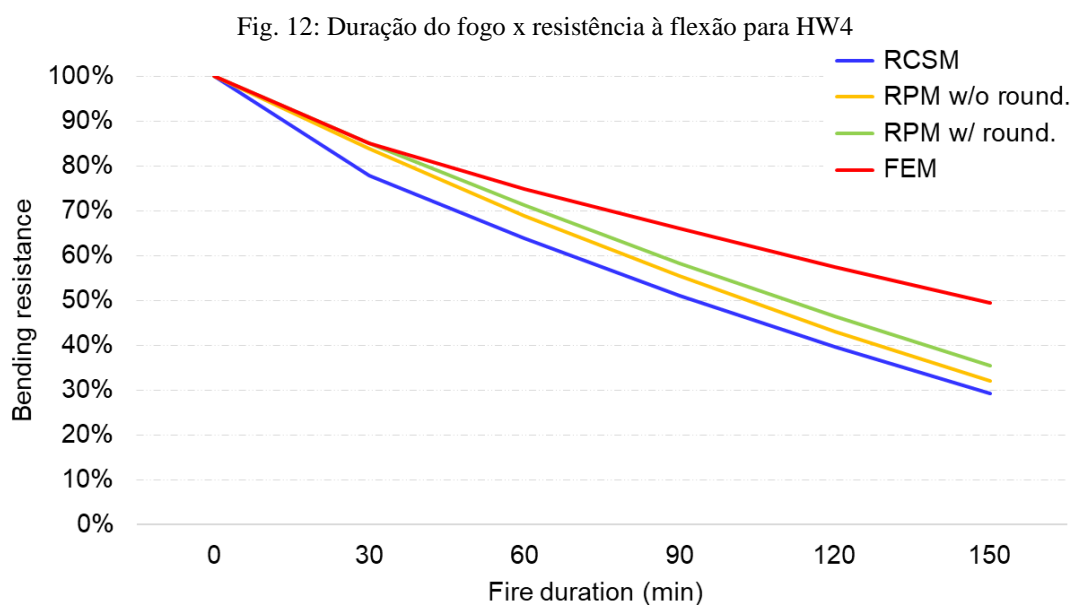
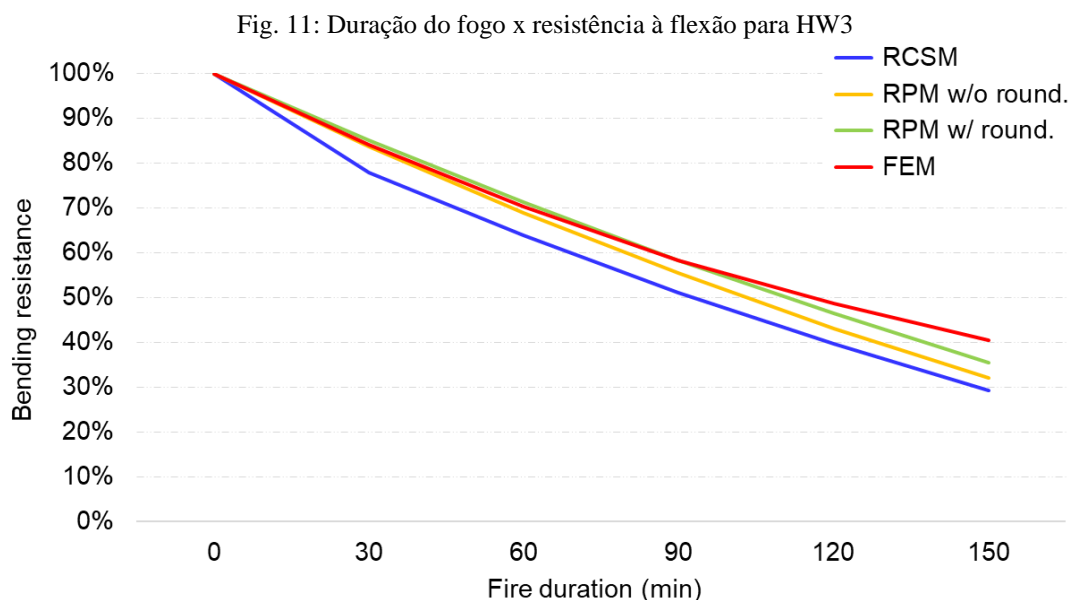
Fig. 8: Taxa média de carbonização das diferentes espécies estudadas



#### 4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Com as profundidades de carbonização definidas, a resistência dos elementos pode ser verificada. Como o elemento estabelecido simula uma viga, geralmente relacionada a carregamentos perpendiculares a ela, foi feita a verificação sobre a resistência à flexão. A Fig. 8, a Fig. 9, a Fig. 10 e a Fig. 11 ilustram a variação dos resultados para as diferentes espécies com cada método, usando o instante da resistência à ignição como valor relativo.





Como a resistência à flexão dos elementos está diretamente relacionada à sua profundidade de carbonização durante a ocorrência do fogo, os resultados foram inferiores para a análise FEM quando comparados ao RPM considerando o efeito de arredondamento para a viga HW3. Para HW3 no tempo de 90 min e HW4 para o tempo de 30 min de fogo, os resultados foram os mesmos. E para todas as outras comparações entre o MEF e os métodos simplificados para diferentes espécies e diferentes épocas, o método de cálculo avançado apresentou valores mais elevados de resistência à flexão.

Opondo-se à igualdade entre diferentes espécies da mesma classe (madeira macia ou de lei) trazida pelo EC5, o MEF apresentou diferença dependendo da densidade da madeira: os resultados de resistência do SW2 foram 10,41% maiores do que o do SW1 no minuto 150 da ocorrência do fogo, enquanto os resultados do HW4 foram de 22,36% para o mesmo tempo. Para os tempos mais baixos, a diferença foi menor, demonstrando que a diferença é maior para incêndios mais longos.

Quando comparados os diferentes métodos para cada espécie, pode-se observar que os resultados usando a análise FEM foram visivelmente superiores aos métodos simplificados para as durações de fogo mais longas analisadas neste estudo. Para o tempo de 150 min, o FEM mostrou resultados:

- Para SW1:
  - 60,3% superior ao RPM com efeito arredondado;
  - 203,89% superior ao RPM sem efeito de arredondamento;
  - 250,51% superior ao RCSM;
- Para SW2:
  - 77,14% superior ao RPM com efeito arredondamento;
  - 235,53% superior ao RPM sem efeito de arredondamento;
  - 287,1% superior ao RCSM;
- Para HW3:
  - 14,7% superior ao RPM com efeito arredondamento;
  - 2643% maior que RPM sem efeito de arredondamento;
  - 3,59% superior ao RCSM;
- Para HW4:
  - 39,57% superior ao RPM com efeito de arredondamento;
  - 54,70% superior ao RPM sem efeito de arredondamento;
  - 69,58% maior que o RCSM.

Novamente, quanto à taxa de carbonização, os resultados com análise FEM mostraram menor resistência à flexão por 30 e 60 min para HW3 quando comparados com RPM com efeito de arredondamento. A diferença foi de 1,12% e 1,25% para os tempos mencionados.

## **5 DESENVOLVIMENTO DE NOVA EQUAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CARBONIZAÇÃO**

Na análise FEM realizada neste estudo, verificou-se que a taxa de carbonização varia de acordo com a densidade da madeira. Além disso, seus valores são maiores para durações mais baixas de fogo, tornando-se mais baixos à medida que o tempo de ocorrência do fogo aumenta. Esses dois comportamentos são observados em dois padrões internacionais diferentes: os padrões australianos abordam a taxa de carbonização como dependente da densidade da madeira, enquanto o AWC usa o tempo de ocorrência do fogo na potência de 0,813 para inserir o pico de taxa de carbonização que ocorre na borda da seção transversal nos instantes iniciais do fogo. Como o comportamento de cada critério internacional se aproxima dos comportamentos encontrados na análise FEM, ambas as

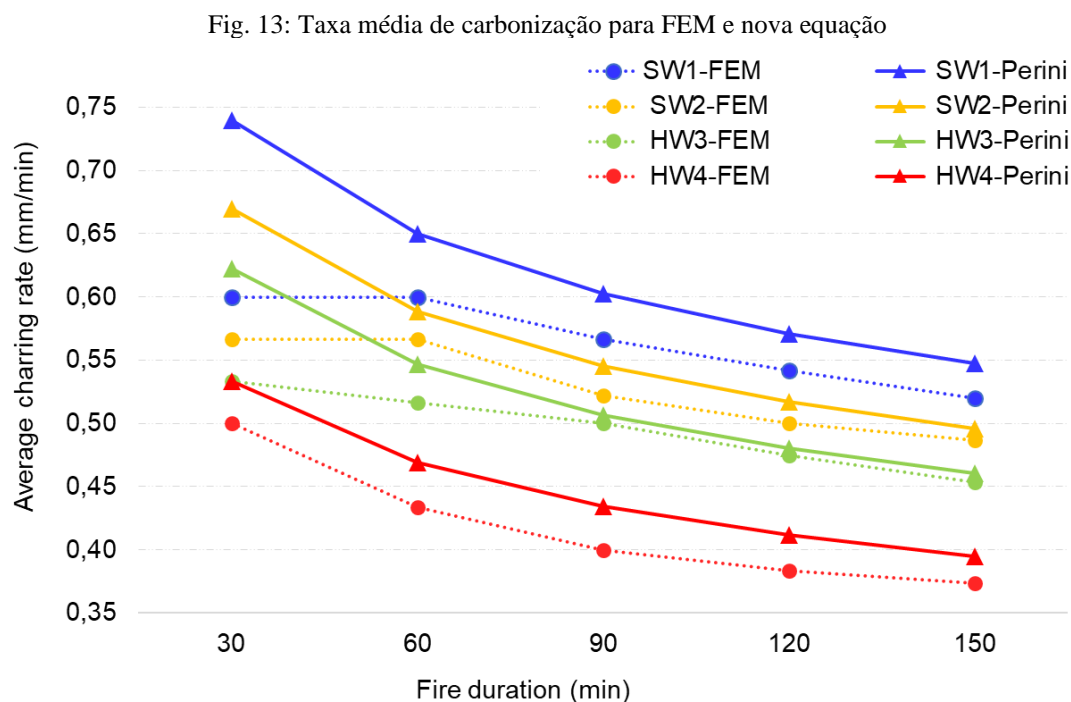
equações que norteiam os padrões (Eq. 2 para o australiano, com taxa de carbonização em mm/min, e Eq. 3 para o norte-americano, com taxa de carbonização em in/h) foram reunidas em uma (Eq.4).

$$\beta = 0,4 + (280 \div \rho_{12})^2 \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\beta = d_{\text{char}} \div t = (\beta_x \times t^{0,813}) \div t \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\beta = \frac{60^{0,187} \times \left[ 0,4 + \left( \frac{280}{\rho_{12}} \right)^2 \right]}{t^{0,187}} \quad \text{Eq. (4)}$$

Com a nova equação, novas curvas foram determinadas para cada espécie analisada, sendo então comparadas com os resultados da análise FEM. A Fig. 13 ilustra a comparação (os novos resultados da equação são identificados como 'Perini').



Pode-se observar que as curvas da nova equação foram mais próximas dos resultados encontrados na análise do MEF, se comparada a proximidade entre os resultados do MEF e os resultados dos métodos simplificados. Para o tempo de 30 min, a maior diferença foi em torno de 23,3% para SW1. Excluindo-se os resultados de 30 min – que divergiram do padrão da curva –, a diferença foi próxima de 8,6%.

No que diz respeito à resistência à flexão, a Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16 e Fig. 17 mostram que os resultados entre a análise FEM e os resultados utilizando a nova equação adaptada à RPM com efeito

de arredondamento são muito próximos, tendo a maior diferença verificada em torno de 8,4%, para SW1 no tempo 150 min de duração do fogo.

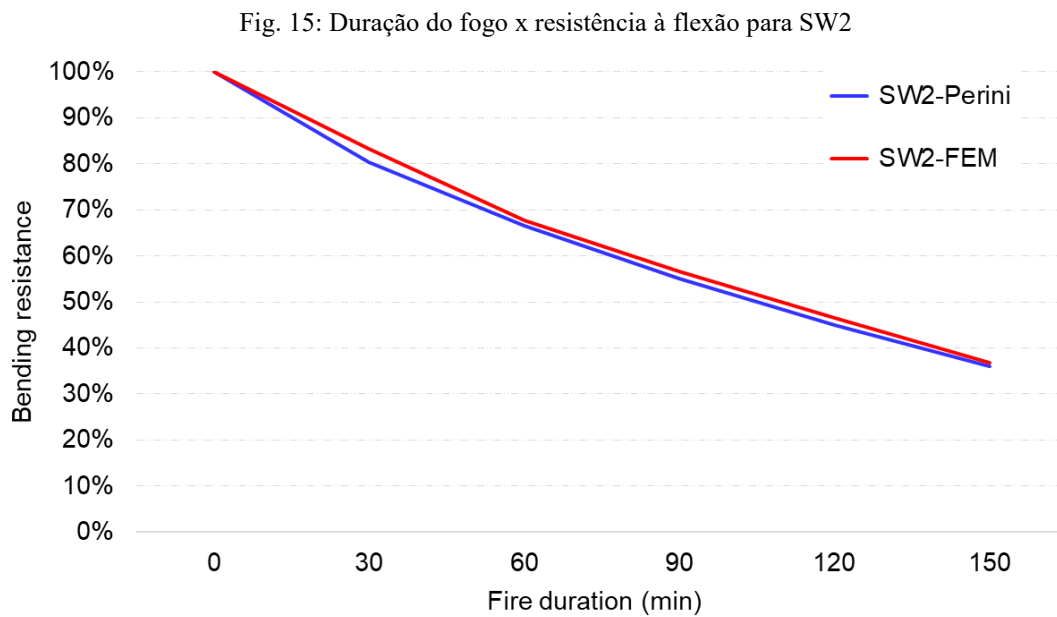
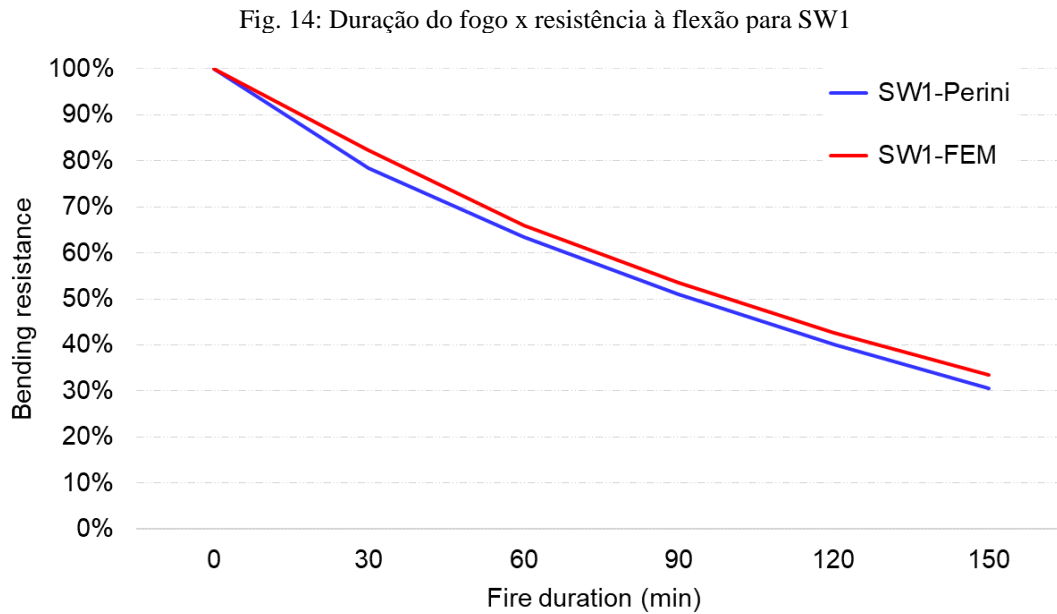


Fig. 16: Duração do fogo x resistência à flexão para HW3

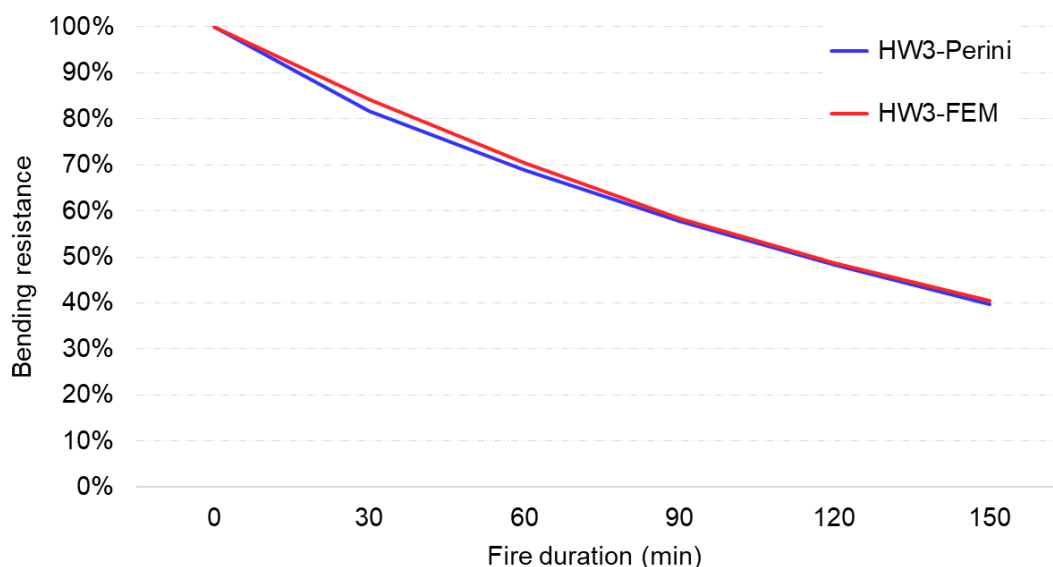
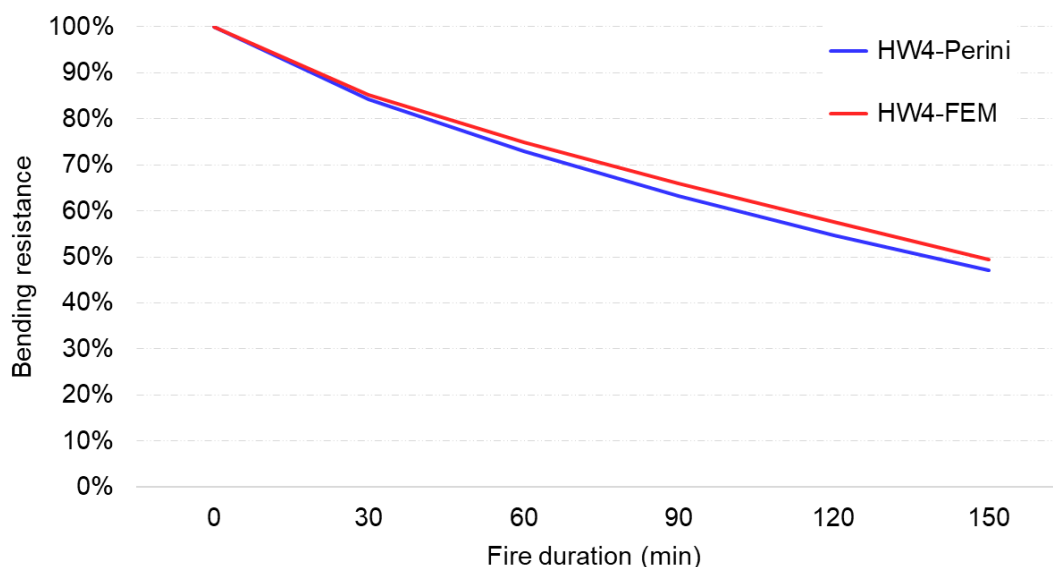


Fig. 17: Duração do fogo x resistência à flexão para HW4



## 6 CONCLUSÃO

Verificou-se que a taxa de carbonização depende forte e diretamente da densidade da madeira que está sendo utilizada no elemento madeira, sendo menor para densidades mais altas. Isso converge para o que foi mencionado por vários autores e é trazido pelos padrões australianos.

A diferença entre os métodos simplificados e a análise FEM de acordo com os parâmetros propostos pelo EC5 são maiores do que a diferença encontrada entre a mesma análise FEM e a RPM com efeito de arredondamento utilizando os resultados de profundidade de carbonização originados da nova equação proposta neste estudo. Além disso, o uso da nova equação alcançou resultados de resistência à flexão inferiores aos cálculos avançados em todos os tempos para todas as espécies estudadas, o que significa que respeitou um certo grau de conservadorismo nesses casos.





Considerando que as ferramentas de cálculo utilizadas para projetar edifícios não são mais limitadas como eram décadas atrás, métodos simplificados como os trazidos pelo EC5 apresentam pouco interesse econômico. A resolução de equações mais complexas como a proposta neste estudo é simples com ferramentas de uso diário pelos profissionais que projetam estruturas, e sua proximidade com a análise FEM justifica sua adoção.

Apesar da utilização dos critérios do EC5 para análise FEM ser aceita por diferentes autores, deve-se ressaltar que os resultados apresentados neste estudo são baseados em valores teóricos, sendo de grande interesse que análises semelhantes tenham sido realizadas experimentalmente para verificar se corroboram com esses resultados.

## REFERÊNCIAS

- Toppinen, A., et al. (2018). The future of wooden multistory construction in the forest bioeconomy: A Delphi study from Finland and Sweden. *\*Journal of Forest Economics, 31\**, 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2017.05.001>
- Zubizarreta, M., et al. (2019). Modeling the environmental sustainability of timber structures: A case study. *\*Environmental Impact Assessment Review, 78\**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106286>
- United Nations (UN). (2024). The 17 goals. <https://sdgs.un.org/goals#goals>
- Shigue, E. K. (2018). *\*Difusão da construção em madeira no Brasil: Agentes, ações e produtos\** [Thesis, Universidade de São Paulo].
- Friquin, K. L. (2011). Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. *\*Fire and Materials, 35\**, 303-327. <https://doi.org/10.1002/fam.1055>
- Thi, V. D., et al. (2016). Finite element modelling of the pyrolysis of wet wood subjected to fire. *\*Fire Safety Journal, 81\**, 85-96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.02.001>
- CEN. (2004). *\*Eurocode 5 – Design of timber structures. Part 1-2: General – Structural fire design\** (EN 1995-1-2). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.
- Quiquero, H., Gales, J., & Abu, A. (2019). Finite element modelling of post-tensioned timber beams at ambient and fire conditions. *\*Fire Technology\**. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00901-0>
- Adetayo, O. A., & Dahunsi, B. I. O. (2018). Development of models for charring rate of selected construction timber species in South-Western Nigeria. *\*FUOYE Journal of Engineering and Technology, 3\**, 17-21. <https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v3i1.115>
- Wen, L., Han, L., & Zhou, H. (2015). Factors influencing the charring rate of Chinese wood by using the cone calorimeter. *\*BioResources, 10\**, 7263-7272.
- Njankouo, J. M., Dotreppe, J. C., & Franssen, J.-M. (2004). Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods. *\*Fire and Materials, 28\**, 15-24. <https://doi.org/10.1002/fam.831>
- Cachim, P. B., & Franssen, J.-M. (2008). Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5. *\*Fire and Materials, 33\**, 129-143. <https://doi.org/10.1002/fam.985>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (1997). *\*NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira\**. Rio de Janeiro, Brasil.
- Fahrni, R., et al. (2017). Fire tests on glue-laminated timber beams with specific local material properties. *\*Fire Safety Journal\**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.11.003>
- AS 1720.4. (2019). *\*Timber structures Part 4: Fire Resistance of Timber Elements\**. North Sydney, Australia: Standard Australia.
- Mikkola, E. (1991). Charring of wood-based materials. *\*Fire Safety Science, 3\**, 547-556. <http://dx.doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.3-547>