



ANÁLISE NUMÉRICA DE ELEMENTOS DE MADEIRA LAMINADA COLADA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Gisele Cristina Antunes Martins

Jorge Munaiar Neto

Carlito Calil Junior

giselemartins@usp.br

jmunaiar@sc.usp.br

calil@sc.usp.br

Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Av. Trabalhador Sãocarlense, 400, 13566-590, São Carlos, São Paulo, Brasil

Resumo. A Madeira Laminada Colada (MLC) é um produto de madeira fabricado por lamelas de madeira serrada, as quais são coladas paralelamente em linhas horizontais, construídas em um processo industrializado com elevado controle de qualidade. A proposta do presente trabalho é avaliar o comportamento térmico e mecânico de elementos estruturais de MLC em exposição à curva de incêndio – padrão de acordo com a ISO 834: 1999, por meio de uma análise numérica utilizando o pacote computacional ABAQUS®. Para tanto, foram desenvolvidos modelos tridimensionais considerando os parâmetros térmicos e as propriedades mecânicas de acordo com a proposta do método de cálculo avançado disponível em EN 1995-1-2. Avaliou-se uma viga de MLC construída com madeira da espécie *Lyptus*® com densidade igual a 742,69 kg/m³, seção transversal de 420 mm por 150 mm e vão livre de 3000 mm, com carregamento aplicado no meio do vão. O tempo de exposição ao incêndio-padrão foi de 45 minutos, após este período as dimensões da seção transversal residual registradas foram igual a 89 mm de largura e 388 mm de altura e a flecha no meio do vão aproximadamente igual a 5 mm. Bem como, a taxa de carbonização média foi calculada sendo igual a 0,631 mm/min.

Palavras-chaves: Análise Numérica, Madeira Laminada Colada, Incêndio, ABAQUS®, Resistência ao Fogo.

1 INTRODUÇÃO

A Madeira Laminada Colada (MLC) é um produto de madeira fabricado com lamelas de madeira serradas coladas paralelamente em linhas horizontais em um processo industrializado. A qualidade final do produto depende de várias etapas do processo de fabricação, de modo que a capacidade de resistência e rigidez dos elementos de MLC seja necessariamente garantida pelos fabricantes por meio de controle de qualidade de cada componente do processo.

Como observado por Mettem (1988), devido ao processo de controle da umidade durante a secagem, e o cuidado durante as etapas de manufatura, resultam em distorções e fissuras bastante reduzidas, esses fatores tem efeitos benéficos na capacidade resistente e rigidez dos elementos. Além disso, favorecem a resistência ao fogo dos elementos de MLC.

Outro fator positivo em relação à resistência ao fogo é o fato de que as seções transversais e o comprimento dos elementos de MLC não serem restringidos ao tamanho das toras, sendo que na produção das peças, as lamelas são sobrepostas até atingir a seção transversal determinada no dimensionamento do elemento estrutural, portanto é possível calcular as dimensões iniciais da peça para que a seção residual após a exposição ao fogo (com um tempo pré-determinado) mantenha a capacidade resistente. A seção residual mantém as propriedades mecânicas do elemento, sendo a propriedade base para o cálculo da resistência ao fogo, como ressaltado por Mettem (1988).

Para estimar as dimensões da seção residual é necessário determinar a camada que será carbonizada com base nos dados da taxa de carbonização. Fonseca e Barreira (2009) definem a taxa de carbonização sendo uma taxa constante de perda de calor por unidade de área, o limite entre o material que sofreu pirólise e o núcleo da madeira, sendo que a madeira que sofreu pirólise pode ser considerada carbonizada e a madeira que não chegou à fase de pirólise mantém-se com as propriedades originais.

Elementos estruturais de madeira são pouco empregados no Brasil, entretanto este cenário tem possibilidades de mudanças nos próximos anos. O número de empresas que investem em propostas tecnológicas com materiais à base de madeira está aumentando e o mercado está suscetível às novas propostas. Todavia, para o sucesso da aplicação destes elementos é necessário estudos com espécies de madeira brasileiras para caracterizar, regulamentar e fomentar o uso na construção.

A realização de ensaios em elementos estruturais em grande escala tem custo elevado, além de serem muitos dispendiosos. O alto custo dos ensaios torna inviável a realização de uma série com maior quantidade de ensaios, sendo assim limita as variações de parâmetros. Dessa maneira a utilização de modelos numéricos é fundamental para os projetistas, porque permite estudar o comportamento mecânico das estruturas.

A proposta do presente trabalho é avaliar o comportamento térmico e mecânico de elementos estruturais de MLC em exposição à curva de incêndio – padrão estabelecido na ISO 834: 1999, por meio de uma análise numérica utilizando o pacote computacional ABAQUS®, aplicando as diretrizes da EN 1995-1-2:2004 para métodos de cálculo avançados.

2 METODOLOGIA

Neste trabalho, o comportamento de vigas de MLC será estudado por meio de análises não lineares em elementos finitos tridimensionais. O objetivo das análises numéricas é estudar o desempenho de vigas de Madeira Laminada Colada avaliando a sua resistência ao fogo.

Os modelos foram desenvolvidos no pacote computacional ABAQUS®, tendo como base as diretrizes apresentadas na Eurocode EN 1995-1-2:2004 para aplicação de métodos avançados de cálculos. O método avançado de cálculo proposto na Eurocode 5 pode ser aplicado para determinar a profundidade de carbonização, distribuição de temperatura no interior dos elementos (modelo térmico) e avaliação do comportamento estrutural (modelo estrutural).

As análises numéricas são realizadas em duas etapas. Inicialmente é realizado o modelo térmico, avaliando apenas o comportamento com o aumento da temperatura. Posteriormente, é realizado o modelo estrutural com aplicação do carregamento e a inclusão dos dados obtidos no modelo térmico.

2.1 Elemento Estrutural Analisado

O elemento estrutural em estudo são vigas de Madeira Laminada Colada com seção transversal de 150 mm de largura por 420 mm de altura e vão entre apoios igual a 3000 mm. Sendo a madeira utilizada da espécie *Lyptus*® com densidade igual a 742,69 kg/m³. A avaliação foi realizada com a exposição ao fogo em três faces (inferior e laterais) durante 45 minutos.

Para a determinação das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à compressão e tração) do elemento foi realizado ensaios em temperatura ambiente, Figura 1. Com o ensaio a flexão em três pontos foi determinada a carga de ruptura.



Figura 1: Ensaios a temperatura ambiente: (a) flexão; (b) compressão; (c) tração.

2.2 Modelo Térmico

O modelo térmico leva em conta as variações das propriedades do material (condutividade térmica, calor específico e densidade) de acordo com a temperatura seguindo uma curva padrão, entretanto não considera fenômenos como o aumento da transferência de calor devido ao deslocamento de massa. A curva de aquecimento utilizada neste trabalho é

proposta pela ISO 834-1: 1999 pela Eq. 1, em que T é a temperatura, em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) e o t é o tempo de exposição, em minutos.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

As propriedades dos materiais sofrem variações com o aumento da temperatura, sendo os valores adotados na análise apresentados na EN 1995-1-2:2004 por meio de gráficos e tabelas, cujos valores possuem correspondência para temperaturas até 1200°C . A transferência de calor devido à radiação e convecção foi modelada usando valores independentes da temperatura, de acordo com a EN 1991-1-2 (2002), sendo igual a 0,8 para o parâmetro de emissividade por radiação (ϵ_{res}) e igual a $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ para o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Como ressaltado por Klippel (2014), as fissuras na parte carbonizada aumentam o fluxo de calor devido à radiação e convecção. Em König (2005) foi esclarecido que os valores de condutividade térmica na linha carbonizada usados nas análises são valores “efetivos” em vez de valores “reais” das propriedades do material para levar em consideração o aumento do fluxo de calor devido às fissuras que ocorre em temperaturas em torno de 500°C e a degradação da linha carbonizada em torno de 1000°C .

Na Tabela 1 são apresentados os valores da relação entre as propriedades dos materiais e a temperatura proposto pela Eurocode 5. Sendo que para a densidade dos materiais há um fator de redução e em temperaturas inferiores a 100°C deve-se levar em consideração a influência do teor de umidade (w).

Tabela 1. Relação das propriedades dos materiais com a temperatura. Fonte: EN 1995-1-2:2004 (continua)

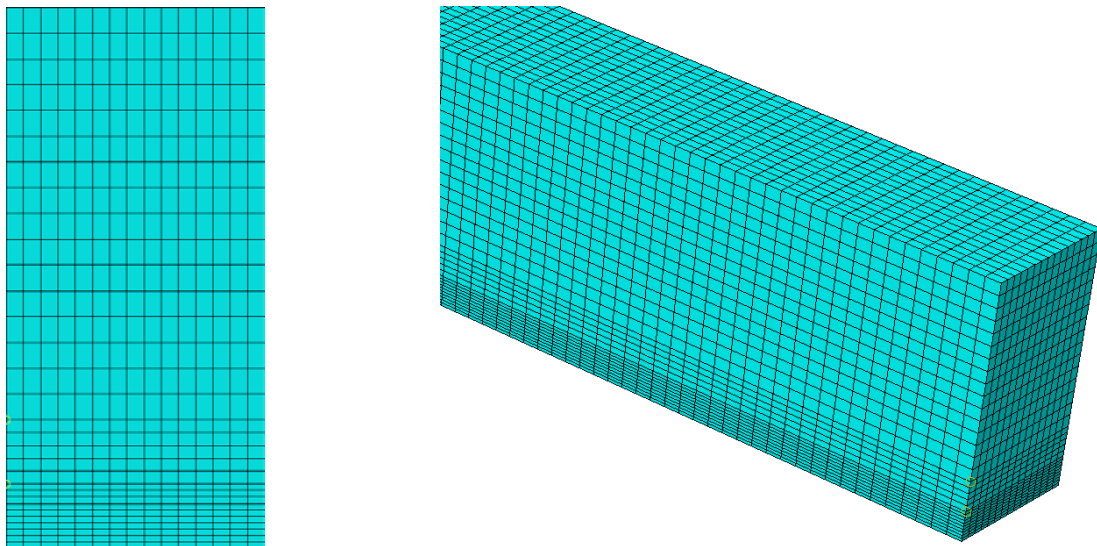
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Condutividade Térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Calor Específico ($\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Fator de Redução da Densidade
20	0,12	1,53	1+w
99	-	1,77	1+w
99	-	13,60	1+w
120	-	13,50	1,00
120	-	2,12	1,00
200	0,15	2,00	1,00
250	-	1,62	0,93
300	-	0,71	0,76
350	0,07	0,85	0,52
400	-	1,00	0,38
500	0,09	-	-

Tabela 2. Relação das propriedades dos materiais com a temperatura. Fonte: EN 1995-1-2:2004 (conclusão)

Temperatura (°C)	Condutividade Térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Calor Específico ($\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Fator de Redução da Densidade
600	-	1,40	0,28
800	0,35	1,65	0,26
1200	1,50	1,65	Zero

A distribuição da temperatura na seção transversal foi realizada usando a análise de transferência de calor com o elemento linear de oito nós DC3D8 (tridimensional). Foi considerado a análise do elemento com exposição ao fogo em três faces (inferior e laterais), desta maneira os cantos da seção na região inferior estão submetidos à transferência de calor em duas direções, portanto a carbonização é mais rápida causando o efeito de arredondamento dos cantos, como discutido em TR 10 (2013). Para representar o efeito de arredondamento nos cantos da seção no modelo numérico é realizado o refinamento da malha na região inferior, como ilustrado na Figura 2.

A linha da camada carbonizada foi considerada sendo a posição da isoterma de 300 °C, como recomendado pela EN 1995-1-2. Desta maneira, a região com temperatura acima de 300 °C foi considerada carbonizada e desconsiderada para determinação da seção residual.

**Figura 2: Refinamento da malha no modelo térmico**

2.3 Modelo Estrutural

O modelo estrutural foi desenvolvido com elementos lineares C3D8R com oito nós e integração reduzida. Foi considerada a aplicação de um carregamento no meio do vão correspondente a 40% da carga de ruptura obtida em temperatura ambiente e com condição de

apoio bi apoiada. Os resultados do campo térmico foram utilizados como dados de entrada na análise mecânica.

Os parâmetros térmicos e as propriedades mecânicas com influência da temperatura foram utilizados de acordo com as recomendações da norma EN 1995-1-2: 2004. Para a análise do modelo estrutural são fornecidos valores de fatores de redução para a resistência e o módulo de elasticidade paralela às fibras para madeiras coníferas com variação até a temperatura de 300 °C, ressaltando que para temperaturas superiores a 300 °C esses valores são admitidos nulos, Figura 3.

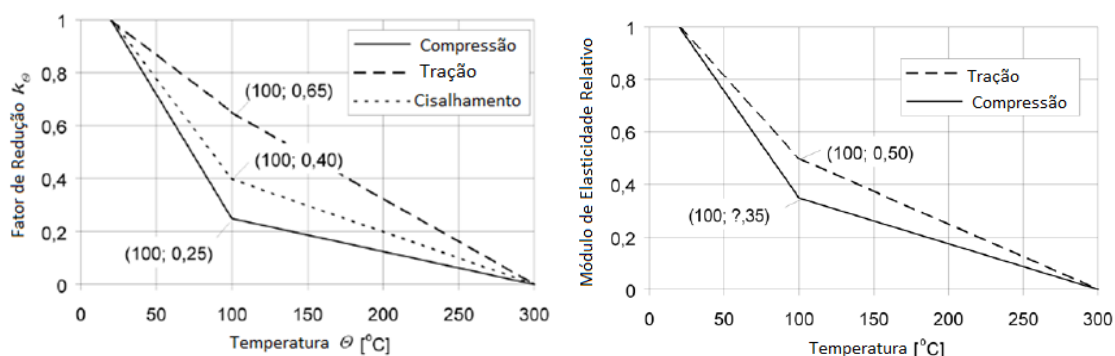


Figura 3: Fator de redução das propriedades mecânicas. Fonte: EN 1995-1-2: 2004

Para representar o comportamento mecânico da madeira foi utilizado o modelo CDP – “Concrete Damaged Plasticity” disponível na biblioteca de materiais do ABAQUS. O modelo CDP é aplicado para modelagem de concreto e outros materiais quase-frágeis em todos os tipos de estruturas como vigas, treliças, placas e sólidos. O modelo usa conceitos de dano elástico isotrópico em combinação com plasticidade isotrópica de tração e compressão para representar o comportamento inelástico do concreto. (ABAQUS Documentation).

Como observado em Klippel (2014), a madeira assim como o concreto tem um comportamento quase-frágil na região de tração, entretanto na região de compressão tem um comportamento dúctil. O modelo CDP do ABAQUS não permite o uso de duas relações de módulo de elasticidade, portanto no trabalho foi adotada a relação do MOE em tração, desde que a falha em vigas à flexão é esperada ocorrer principalmente na região tracionada. Para evitar erros de convergência, as regiões de aplicação de carregamento e os pontos de apoio foram considerados com comportamento elástico linear e sem a influência da temperatura. Na Figura 4 são ilustradas as regiões nas quais foi atribuído cada tipo de material.

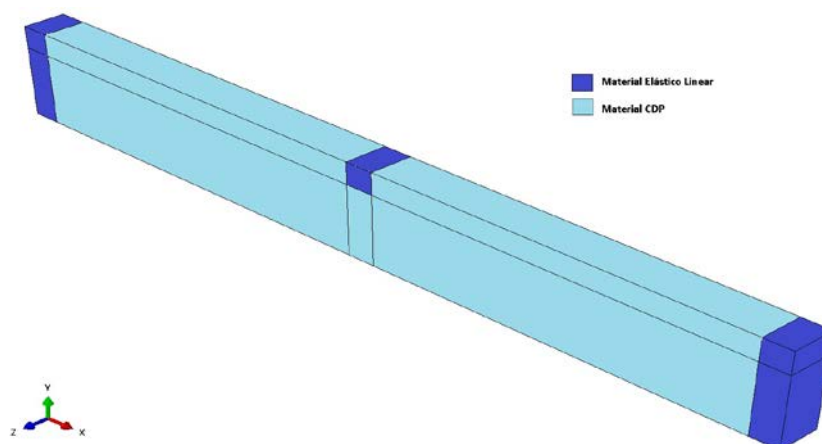


Figura 4: Modelo Tridimensional com regiões em destaque da aplicação

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento de vigas de madeira expostas ao fogo foi simulado em uma sequência de análises térmica e mecânica no pacote computacional ABAQUS. Primeiramente, foi realizada a análise térmica para determinação da distribuição da temperatura na seção transversal exposta ao incêndio-padrão definido pela curva ISO 834: 1999 durante 45 minutos.

Posteriormente, é realizada a análise mecânica com a aplicação de uma carga constante, sendo que os dados da análise térmica foram introduzidos como dados de entrada. A análise mecânica é realizada independente da análise térmica, sendo que a distribuição de temperatura nos elementos não é afetada pela distribuição de tensão.

A simulação do comportamento de elementos de madeira em temperaturas elevadas foi realizada com uma análise de transferência de calor. O tamanho da malha utilizado na análise térmica é muito menor do que na análise mecânica, sendo que para a avaliação da seção transversal residual é interessante avaliar o arredondamento dos cantos para a determinação das dimensões finais. Analisando a Figura 5 (a) e (b) observa-se que o arredondamento da seção ficou mais definido na Figura 5 (a) devido o maior refinamento na região inferior.

No modelo térmico foi realizado uma variação do tamanho da malha ao longo da seção com a finalidade de diminuir o custo computacional, sendo assim na região inferior foi realizado uma malha mais refinada do que no restante da seção, como pode ser observado Figura 5 (a).

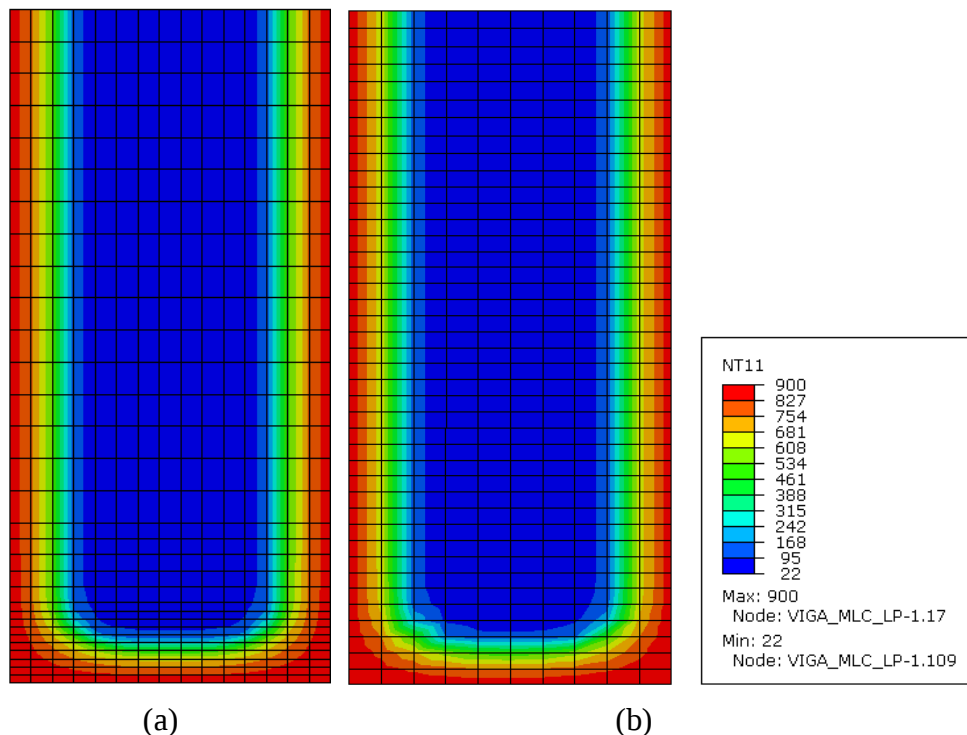


Figura 5: Distribuição da temperatura na seção transversal das vigas: (a) modelo térmico; (b) modelo mecânico.

Na Figura 6 é apresentada a comparação entre o perfil de temperatura registrado na análise térmica e na análise mecânica. O ABAQUS realiza uma interpolação dos valores para as temperaturas nodais devido à incompatibilidade da malha dos dois modelos.

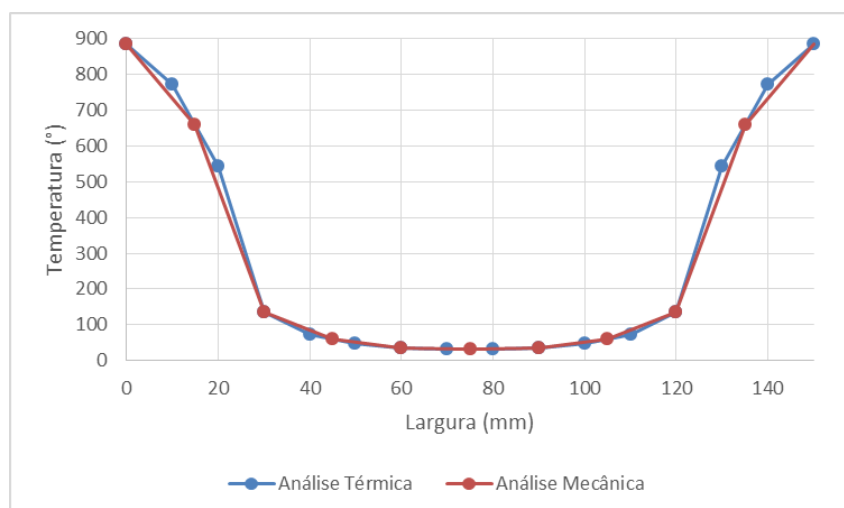


Figura 6: Comparação do perfil de temperatura ao longo da largura da seção

Quando a madeira é exposta ao fogo, tanto a madeira quanto o carvão produzido pela combustão são isolantes térmicos e retardam o fluxo de calor para o interior da seção, sendo assim diminuem a velocidade da degradação térmica. Tal comportamento pode ser observado na análise da Figura 5, a temperatura máxima registrada na superfície do elemento foi de 900 °C, entretanto no interior da seção foram registradas temperaturas iguais a 22 °C depois de 45 minutos de exposição ao fogo.

Na análise numérica de elementos de madeira em temperaturas elevadas é considerada carbonizada a região com temperaturas acima de 300 °C, sendo assim utiliza-se a isoterma de 300 °C como linha divisória. Na Figura 7 é apresentada a evolução da temperatura ao longo da exposição ao fogo na seção transversal, sendo a região em cinza a área considerada carbonizada.

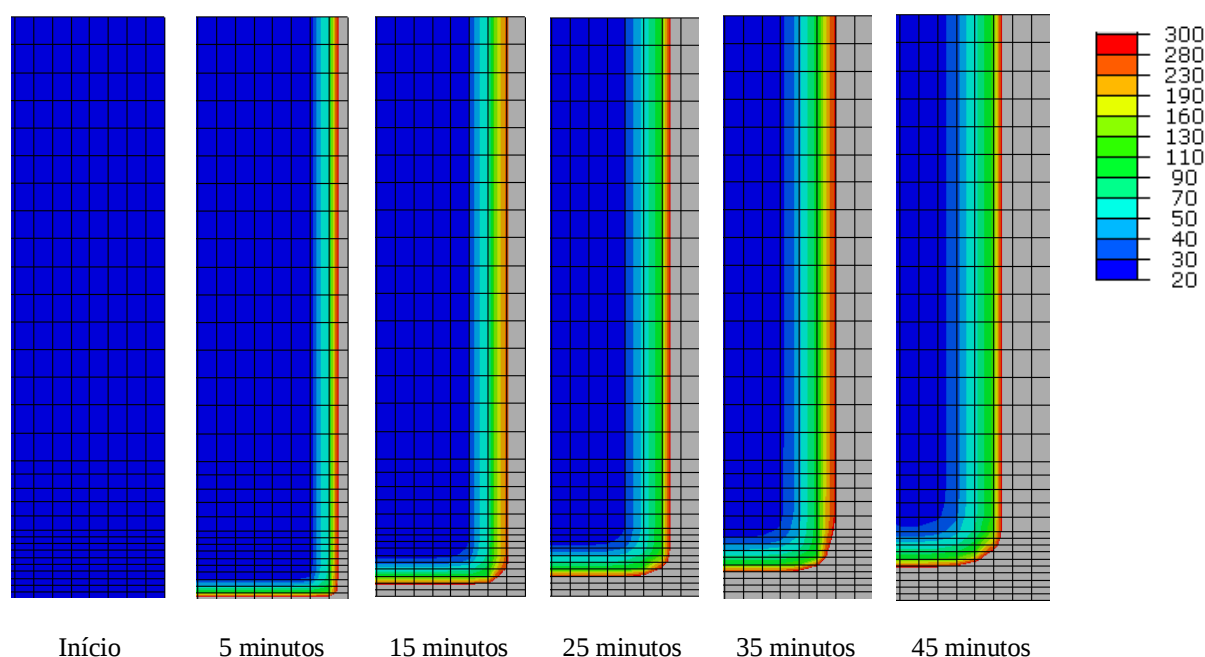


Figura 7: Evolução da distribuição da temperatura na seção transversal.

A camada carbonizada ($d_{char,n}$) pode ser determinada avaliando a região entre a camada inicial da seção até isoterma de 300 °C. Por meio da avaliação da Figura 7 e considerando as dimensões dos elementos a camada carbonizada foi determinada sendo igual a 26 mm. Sendo assim, é possível calcular a partir do método avançado a taxa de carbonização (β) para a espécie de madeira analisada e comparar com o valor encontrado na EN 1995-1-2 para aplicação do método simplificado. Na Figura 8 observa-se a taxa de carbonização determinada ao longo da exposição ao fogo obtida por meio da análise térmica.

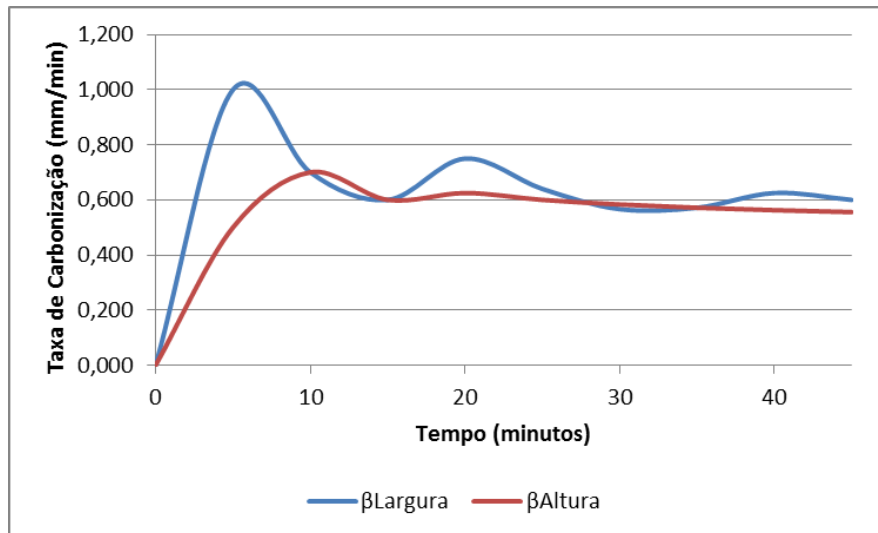


Figura 8: Perfil de evolução da taxa de carbonização

Os valores médios de taxa de carbonização encontrados no modelo térmico são $\beta_{largura}$ igual a 0,673 e β_{altura} igual a 0,589. Por meio de análises experimentais e numéricas é possível observar diferenças na carbonização da face inferior em relação às faces laterais, como foi apresentado em Yang et al. (2009). Entretanto, quando realizado o método simplificado de cálculo proposto pela EN 1995-1-2 não é levado em consideração esse comportamento.

Na Figura 9 é ilustrada a redução das dimensões da seção transversal da viga obtidos por meio da análise térmica. Para a determinação da seção transversal residual é levado em consideração à adição de uma camada de madeira no interior da seção com espessura de $k_0 d_0$ na qual a resistência e rigidez são nulas, como proposto no método simplificado. Nomeada de camada carbonizada efetiva (d_{ef}), sendo d_0 igual a 7 mm e k_0 fornecido na EN 1995-1-2 sendo igual a 1 para superfícies sem proteção e com tempo de exposição ao incêndio-padrão superior a 20 minutos. Portanto, a seção transversal residual após 45 minutos de exposição ao incêndio-padrão obtida pelo método numérico possui dimensões com 89 mm de largura e 388 mm de altura.

Pelo método simplificado de cálculo a taxa de carbonização (β_n) utilizada é igual a 0,70 (valor tabelado em EN 1995-1-2:2004) e a camada carbonizada ($d_{char,n}$) é igual a 31,5 mm calculada a partir da equação $\beta_n \cdot t$ sendo t o tempo de exposição ao fogo. Portanto, as dimensões da seção residual por meio do método simplificado de cálculo são iguais a 73 mm de largura e 381,5 mm de altura.

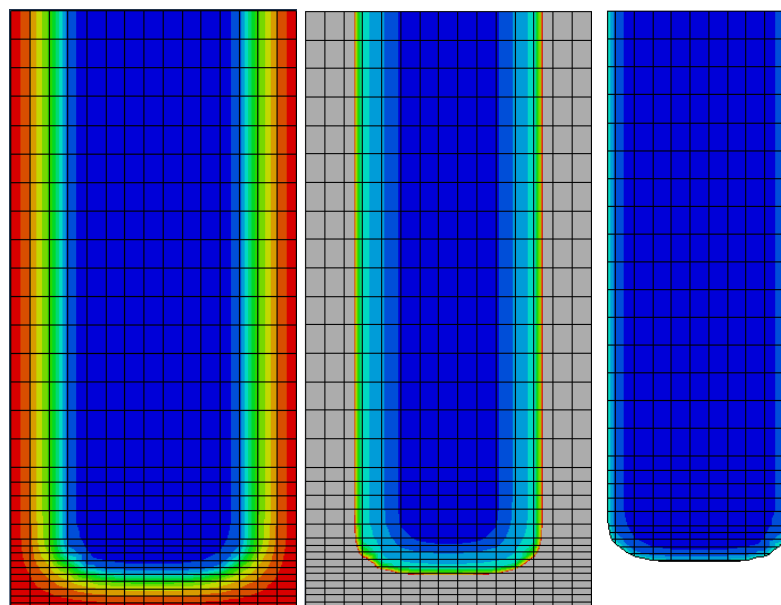


Figura 9: Ilustração da redução das dimensões da seção transversal da viga.

Os ensaios em temperatura ambiente foram realizados com a finalidade de determinar as propriedades mecânicas para aplicação no modelo mecânico. A resistência à tração determinada foi igual a $51,4 \text{ N/mm}^2$ e a resistência à compressão igual $64,9 \text{ N/mm}^2$. O módulo de elasticidade médio encontrado nas peças analisadas foi igual a 13461 N/mm^2 . A redução das resistências, bem como do módulo de elasticidade foi implementado no ABAQUS seguindo as recomendações da EN 1995-1-2: 2004 citadas anteriormente e ilustradas na Figura 3. A partir do ensaio à flexão foi determinada a carga de ruptura das peças, entretanto no modelo mecânico foi aplicado apenas 40% deste valor, sendo utilizada uma carga de $35573,6 \text{ N}$ distribuída entre os nós da seção.

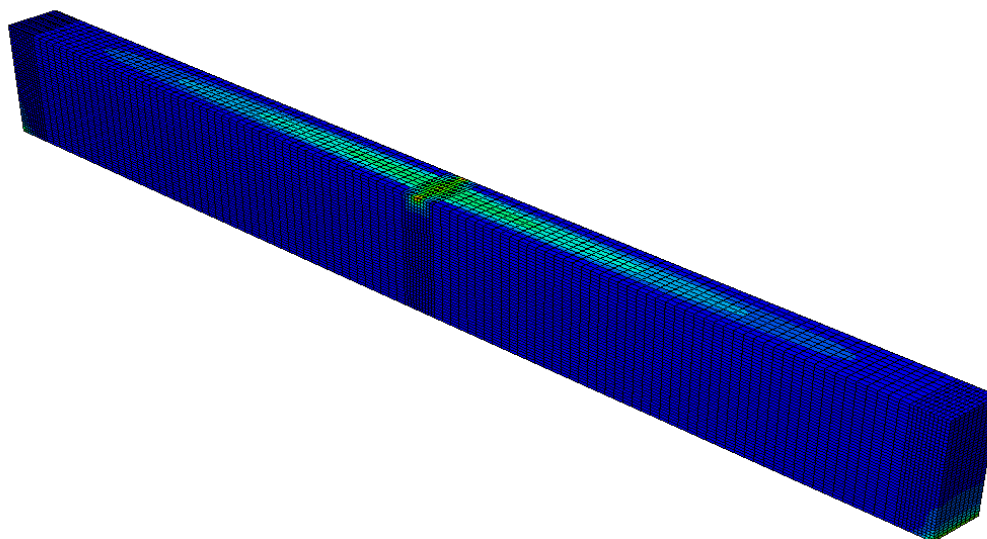


Figura 10: Exemplo de resultados da análise no ABAQUS: distribuição da tensão de Von Mises.

Na Figura 10 é ilustrado um exemplo dos resultados obtidos via análise numérica. O deslocamento máximo encontrado no meio do vão foi de $4,803 \text{ mm}$. Pela norma ABNT NBR 5628: 2001 – “Componentes construtivos estruturais- Determinação da resistência ao fogo” à

flecha máxima para considerar atingido o limite último por deformação excessiva seria igual a $l/30$, sendo l o vão livre, portanto a flecha máxima seria igual a 100 mm.

4 CONCLUSÕES

A madeira é um material combustível, entretanto é consumido lentamente e superficialmente. O interior da seção permanece intacto, sendo capaz de manter as propriedades mecânicas do elemento. Por meio da análise térmica determina-se a camada carbonizada, sendo assim pode-se calcular a seção transversal residual que é a base para o cálculo da resistência ao fogo dos elementos de madeira.

A viga avaliada no trabalho possuía dimensões iniciais iguais a 150 mm de largura e 420 mm de altura. Depois de 45 minutos de exposição ao fogo por meio do método avançado a seção residual foi determinada tendo 89 mm de largura por 388 mm de altura, entretanto por meio do método simplificado as dimensões finais são 73 mm de largura por 381,5 mm de altura. Pelo método simplificado de cálculo não é considerado a diferença entre as espessuras da camada carbonizada entre as faces lateral e inferior, entretanto pelo método avançado de cálculo é possível observar esse fenômeno.

A taxa de carbonização determinada pelo modelo térmico apresenta diferença entre as faces laterais e a face inferior, sendo a média dos valores igual a 0,631 mm/min. O valor sugerido para utilizado no método simplificado de cálculo é maior do que o encontrado, sendo igual a 0,7 mm/min, sendo mais conservador.

No modelo mecânico foi aplicada 40% da carga de ruptura obtida em temperatura ambiente e considerada a carga térmica durante 45 minutos. Foi obtido um deslocamento máximo no centro do vão de aproximadamente 5 mm, sendo assim de acordo com a norma ABNT NBR 5628:2001 o elemento garante a resistência mecânica durante este período.

A vantagem da utilização do método simplificado de cálculo é a rapidez e facilidade com o que o projetista pode realizar os cálculos, entretanto com a utilização do método avançado é possível avaliar o gradiente de distribuição da temperatura no interior da seção, bem como o comportamento mecânico dos elementos estruturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento da bolsa de estudo processo Nº 2013/07548-1 e pelo auxílio ao projeto processo Nº 2013/25401-8.

REFERÊNCIAS

ABAQUS.2013. *Software Documentation*. Version 6.13 by SIMULIA. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1980. *NBR 5628: Componentes construtivos estruturais, determinação da resistência ao fogo*. Rio de Janeiro.

EUROPEAN STANDARD. 2004. *EN 1995-1. Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design*. Brussels.

_____. 2002. *EN 1991-1. Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*. Brussels

FONSECA E M M., BARREIRA L M S. 2009. *Charring rate determination of wood pine profiles submitted to high temperatures*. In Third International Conference on Safety and Security Engineering. In: Safety and Security Engineering III. Southampton: Wit Press. p. 449-458. ISBN 978-1-84564-193-1. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10198/1569>>

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

KLIPPEL, M. 2014. *Fire Safety of Bonded Structural timber elements*. PhD thesis, Institute of Structural Engineering, ETH Zürich, Switzerland, thesis No. 21843.

KÖNIG J. 2005. *Structural fire design according to Eurocode 5 – design rules and their background*. Fire and Materials 29 (3): 147-163.

METTEM, C. J. 1988. *The versatility of glued -laminated timber*. The structural engineer. Londres, v. 66, n. 18, set.

TECHNICAL REPORT 10. TR10:2013. *Calculating the fire resistance of exposed wood members*, American Wood Council, Washington, DC. 2013

WANG Y, BURGESS I, WALD F, GILLIE M. 2013. *Performance based fire engineering of structures: Timber Structures*. ISBN: 978.0.203.86871. New York : CRC Press Taylor & francis Group. P. 170-173.

YANG, T.H; WANG, S.H; TSAI, M.J, LIN, C.Y. 2009. *The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test*. Building and Environment, v. 44, p. 231-236.