



Influência do Tamanho da Malha em Simulações Numéricas Via Elementos Finitos

Felipe Nascimento Arroyo¹; Francisco Antônio Rocco Lahr²; André Luis Christoforo¹

✉ lipe.arroyo@gmail.com

1. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP - Brasil
2. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos (USP), São Carlos, SP - Brasil.

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 17 de novembro de 2021 Aceito em: 29 de junho de 2022 Publicado em: 31 de agosto de 2022

Resumo: Novos sistemas estruturais na construção civil estão sempre surgindo, e por isso é necessária uma avaliação de desempenho. Para esta avaliação, ensaios laboratoriais são necessários, mas, devido à escassez de centro de pesquisas, as simulações numéricas surgiram como alternativa. Para melhor confiabilidade nos resultados obtidos na simulação, um teste de malha é necessário, verificando a influência desta nos resultados. Neste trabalho foi realizado a análise de dois tipos de malha principais (tetraédrica e hexaédrica) e vários tamanhos possíveis de discretização, tendo como objetivo avaliar a influência destes parâmetros em uma simulação numérica de um corpo de prova solicitado à flexão estática 3 pontos. Os dois tipos de malha e três tamanhos (1mm, 5mm e 10mm) foram adotados. Através dos resultados obtidos, pode-se concluir que a malha tetraédrica obteve melhores resultados. Foi possível concluir também que o tamanho da malha não alterou os resultados das tensões e deslocamentos no contorno da peça, apenas influenciando nos resultados das tensões no interior.

Palavras-chave: ABAQUS, Condições de contorno, Deslocamento, Tensão.

Mesh Size Influence in Numerical Simulations by Finite Elements

Abstract: New structural systems in civil construction are always emerging, and therefore a performance evaluation is necessary. For this evaluation, laboratory tests are necessary, but, due to the scarcity of research centers, numerical simulations have emerged as an alternative. For better reliability in the results obtained in the simulation, a mesh test is necessary, verifying the influence of the results. In this paper, the analysis of are two main types of mesh (tetrahedral and hexahedral) and several possible discretization sizes, aiming to evaluate the parameters in a numerical simulation of a specimen requested with 3-point static bending. Two mesh types and three sizes (1mm, 5mm and 10mm) were adopted. Through the obtained results, it can be reached that the tetrahedral mesh obtained better results. It was also possible to achieve that the mesh size did not change the results of stresses and displacements in the contour of the part, only influencing the results of stresses in the interior.

Keywords: ABAQUS, Boundary conditions, Deflection, Tension.

Influencia del Tamaño de Malla en Simulaciones Numéricas Mediante Elementos Finitos

Resumen: Siempre surgen nuevos sistemas estructurales en la construcción civil, por lo que es necesaria una evaluación del desempeño. Para esta evaluación son necesarias las pruebas de laboratorio, pero, debido a la escasez de centros de investigación, las simulaciones numéricas han surgido como una alternativa. Para una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos en la simulación, es necesaria una prueba de malla, verificando su influencia en los resultados. En este trabajo se realizó el análisis de dos tipos principales de malla (tetraédrica y hexaédrica) y varios tamaños de discretización posibles, con el objetivo de evaluar la influencia de estos parámetros en una simulación numérica de una probeta sometida a flexión estática en 3 puntos. Se adoptaron dos tipos de malla y tres tamaños (1 mm, 5 mm y 10 mm). A través de los resultados obtenidos, se puede concluir que la malla tetraédrica obtuvo mejores resultados. También se pudo concluir que el tamaño de la malla no modificó los resultados de tensiones y desplazamientos en el contorno de la pieza, solo influyó en los resultados de tensiones internas.

Palabras clave: ABAQUS, Condiciones de contorno, Desplazamiento, Tensión.

INTRODUÇÃO

Devido às expansões na construção civil, novos processos construtivos e sistemas estruturais vem sendo desenvolvidos, visando agilidade e economia nas construções (PIGOZZO *et al.*, 2017, 2018a; PILLON *et al.*, 2018). Um dos processos para o desenvolvimento de novas tecnologias é a caracterização do material, seja utilizando corpos de prova em pequena ou grande escala. Corpos de prova pequenos são utilizados para a caracterização de um material (ANTONIO ROCCO LAHR *et al.*, 2016; CHRISTOFORO *et al.*, 2017), por exemplo, enquanto os de grande escala são utilizados para um melhor entendimento de um sistema estrutural completo (PIGOZZO *et al.*, 2018a, 2018b), como de uma ligação em situação de incêndio (ERCHINGER; FRANGI; FONTANA, 2010).



Figura 1. Ensaio de resistência ao fogo de ligações de estruturas em madeira.
Fonte: Adaptado de Menis (2012).

Contudo, alguns ensaios, seja em pequena ou grande escala, são de difícil realização e acabam sendo executados apenas em poucos centros de pesquisa, visto que os equipamentos necessários são relativamente caros. A vista disso, simulações numéricas via elementos finitos estão sendo utilizadas para redução de custo, além de possibilitar a realização de estudos paramétricos com maior facilidade e agilidade (FRAGIACOMO *et al.*, 2010; MENIS, 2012; PALMA; FRANGI, 2019).

O método dos elementos finitos (MEF) permite simular a deformação de elementos sólidos e o estado de tensão de quaisquer tipos de geometria, sendo estes submetidos a ações externas, o que pode garantir confiabilidade e simplicidade na implementação computacional (AZEVEDO, 2003). Atualmente, um dos softwares mais utilizados neste tipo de simulação é o ABAQUS (FRAGIACOMO *et al.*, 2010; KORGESAAAR; ROMANOFF, 2014; LI *et al.*, 2019; MENIS; FRAGIACOMO; CLEMENTE, 2012), no qual permite realizar simulações mecânicas, térmicas, termomecânicas, entre outras (ABAQUS, 2016).

Korgesaar e Romanoff (2014) indicam que, para uma melhor confiabilidade dos resultados da simulação, um teste de malha deve ser realizado antes, provando que a malha do elemento finito adotado não está influenciando nos resultados finais. Em seu estudo, 4 tamanhos de malha (10mm; 4mm; 2,50mm e ~1mm) e um elemento finito (hexaédrica de 8 nós – C3D8) foi utilizado, analisando a influência na tensão triaxial e no dano do material. Como pode-se notar nas Figuras 2 a 4, o dano visual do material foi altamente influenciado pela malha, sendo que malhas inferiores apresentaram resultados melhores. O mesmo ocorreu quando analisado a curva entre a tensão \times deslocamento do material. Importante destacar que outros autores também confirmam a necessidade de uma malha menor para analisar o dano do material (EHLERS *et al.*, 2012; KARLSSON *et al.*, 2009).



Figura 2. Dano no material no ensaio experimental.

Fonte: Adaptado de Korgesaar e Romanoff (2014).

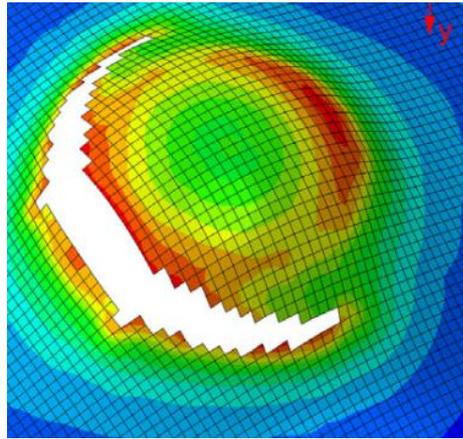


Figura 3. Dano no material na simulação numérica com uma malha de ~1mm.
Fonte: Adaptado de Korgesaar e Romanoff (2014).

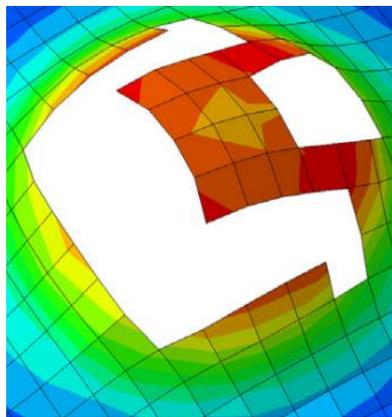


Figura 4. Dano no material na simulação numérica com uma malha de 10mm.
Fonte: Adaptado de Korgesaar e Romanoff (2014).

Todavia, ao analisar apenas as tensões e reações no contorno do material, uma malha maior pode obter o mesmo resultado de uma malha pequena com um tempo de processamento inferior. A vista disso, este trabalho tem como objetivo realizar um teste de malha para um corpo de prova retangular em madeira utilizando o software ABAQUS, avaliando a influência da malha nas tensões e reações apenas no ponto de maior tensão e deslocamento. Para isso, dois tipos e três tamanhos de malhas foram adotados. Como forma de julgar a malha que melhor adequou ao real, a tensão e o deslocamento foram calculados manualmente e comparados com o resultado da simulação numérica. Dessa forma, poderá julgar se é necessário uma malha refinada (pequena), que demanda um tempo extremamente maior quando comparado com uma malha menos refinada, para simulações em que importa apenas os pontos de maior tensões e deslocamento.

MATERIAL E MÉTODOS

A simulação foi baseada nos ensaios realizados por Almeida *et al.* (2018) e executada no software SIMULIA ABAQUS, em que foi realizado um ensaio de flexão três pontos em corpos de prova em madeira da espécie *Simarouba amara Aubl.* Esta espécie foi adotada aleatoriamente, visto que o tipo de madeira não alteraria as conclusões da presente pesquisa. Entretanto, vale destacar que essa específica espécie foi adotada pelo autor ter disponibilizado todos os dados necessários para simulação (caracterização completa da madeira).

Neste caso, conforme indicado e comprovado pelo autor, as tensões e deslocamentos máximos ocorrem no meio do corpo de prova e na parte inferior, que possui dimensões 20mm × 20mm × 320mm. A distância entre apoios é de 280mm, conforme mostrado na Figura 5.

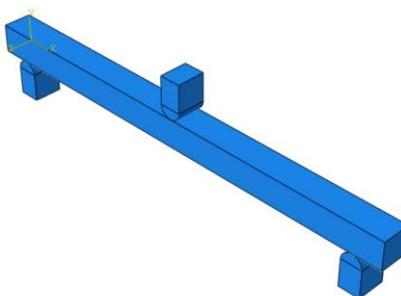


Figura 5. Corpo de prova simulado no ABAQUS.
Fonte: Autoria própria.

Os apoios foram definidos como rígidos, indeslocáveis e em formato de casca, objetivando diminuir o tempo de processamento. A malha do apoio utilizada em todas as simulações foi de 1 mm, sendo hexaédrica na parte retangular e tetraédrica no topo, onde o formato é circular. A malha tetraédrica foi adotada nessa região devido à melhor adaptação do que a malha hexaédrica, conseguindo captar melhor o contato entre o apoio e a viga. Em cada apoio, um total de 17849 elementos foram criados.

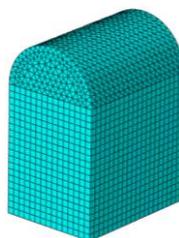


Figura 6. Detalhe da malha no apoio utilizado.
Fonte: Autoria própria.

Para as condições de contorno, foi adotado um contato rígido entre todas as partes (corpo de prova, apoios e suporte de carregamento), habilitando a função atrito conforme indicado no manual do programa (ABAQUS, 2016). Por final, foi permitido a separação entre as partes após o contato, ou seja, o corpo de prova pode escorregar sobre os apoios e depois serem separados, caso aconteça. Para análise da tensão e deslocamento máximos, uma força de 500N foi aplicada no suporte de carregamento, localizado no centro da peça.

Neste estudo, três tamanhos (1 mm, 5 mm e 10 mm) e dois tipos de malha foram adotados (hexaédrica de 8 nós com integração reduzida – C3D8R – e tetraédrica de 10 nós – C3D10). A Figura 7 ilustra as duas malhas utilizadas.

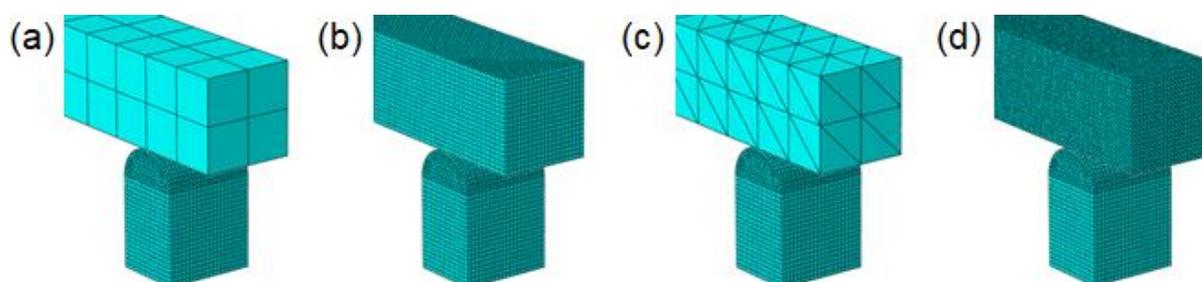


Figura 7. Malha hexaédrica de 10mm (a) e 1mm (b) e tetraédrica de 10mm (c) e 1mm (d) utilizadas no teste de malha.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 1 mostra a quantidade de elementos criados em cada malha adotada, visando destacar a densidade de nós geradas em cada malha.

Tabela 1. Quantidade de elementos criados em cada malha estudada.

Malha	Tamanho [mm]	Elementos
C3D8R	10	128
C3D8R	5	1024
C3D8R	1	128000
C3D10	10	854
C3D10	5	7933
C3D10	1	610928

Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, com a força de 500N aplicada, foi verificada qual dentre as 6 malhas adotadas obteve o resultado de tensão e deslocamento próximo do real. Com o melhor tipo de malha definido, foi verificada a tensão na superfície, 5mm da superfície e 10mm da superfície (centro), objetivando analisar se o tamanho de malha tem influência nas regiões centrais.

O deslocamento máximo obtido na simulação foi comparado com o deslocamento calculado conforme Pinheiro, Catoia e Catoia (PINHEIRO; CATOIA; CATOIA, 2010) (Equação 1). A tensão de tração máxima foi a calculada segundo Calil Jr, Lahr e Dias (2003) (Equação 2). Importante destacar que as únicas propriedades consideradas nas simulações foram a densidade (400 kg/m³), coeficiente de Poisson (0,20) e o módulo de elasticidade (7203,30 MPa), sendo estas as propriedades da madeira *Simarouba amara Aubl.* (ALMEIDA, 2019; ALMEIDA *et al.*, 2018). Apenas estas propriedades foram adotadas pois o dano do material não foi avaliado. Dessa forma, esse estudo evidencia os deslocamentos e tensões apenas no Estado Limite de Serviço (ELS), visto que analisa o trecho linear e elástico da curva. Porém, o mesmo seria observado caso tivesse analisado o dano do material, conforme exibido por Korgesaar e Romanoff (2014).

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{1}{48} \cdot \frac{P \cdot l^3}{E \cdot I} \quad (1)$$

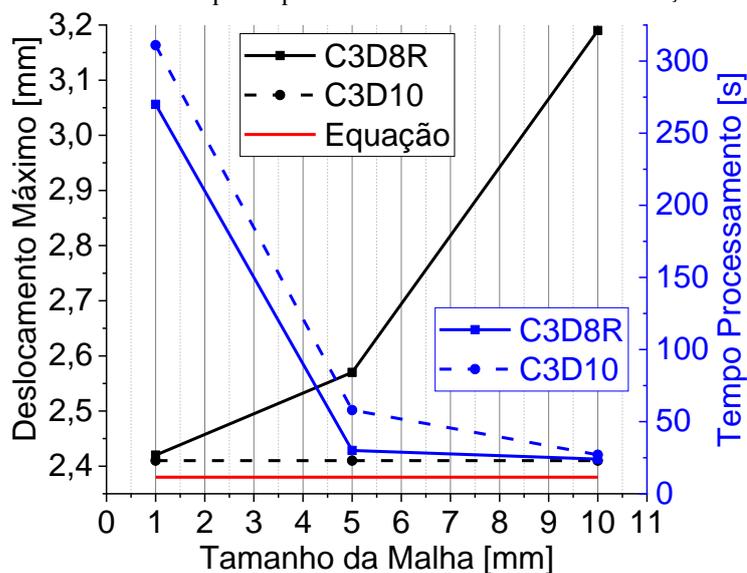
$$\sigma_c = \sigma_t = \gamma \cdot \frac{M}{I} \quad (2)$$

Sendo que: P é o valor da carga aplicada; l a distância entre os apoios; E o módulo de elasticidade da madeira; I a inércia da seção; σ_c e σ_t as tensões de compressão e tração atuantes, respectivamente; M o momento fletor máximo; e γ a posição do centro de gravidade da peça.

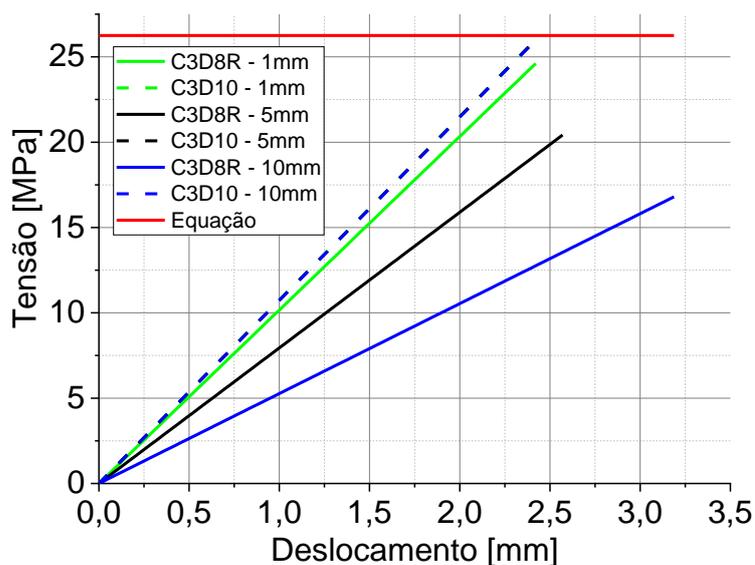
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através das Equações 1 e 2, ao aplicar uma força de 500N o corpo de prova possui uma deformação máxima de 2,38mm, além de uma tensão de tração máxima de 26,25 MPa. Sendo assim, esses foram os valores utilizados na validação e escolha da melhor malha e tipo do elemento finito.

Os gráficos 1 e 2 mostram os resultados das simulações realizadas.

Gráfico 1. Deslocamento máximo e tempo de processamento obtido nas simulações.

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 2. Tensão de tração máxima obtida em cada simulação.

Fonte: Autoria própria.

Através dos resultados obtidos a malha hexaédrica não obteve resultados positivos para um tamanho de 5mm e 10mm, quando comparado com os outros resultados, tendo um erro aproximado de 10% e 30%, respectivamente. Isso evidencia que a distância entre os elementos finitos altera o resultado. Também é possível concluir que qualquer malha tetraédrica obteve erro de apenas 1,13%, assim como a malha de 1mm hexaédrica, evidenciando a influência da

malha nos resultados obtidos. Dessa forma- pode-se concluir que a malha tetraédrica foi mais efetiva nos resultados, visto que, com qualquer tamanho de malha, obteve resultado satisfatório.

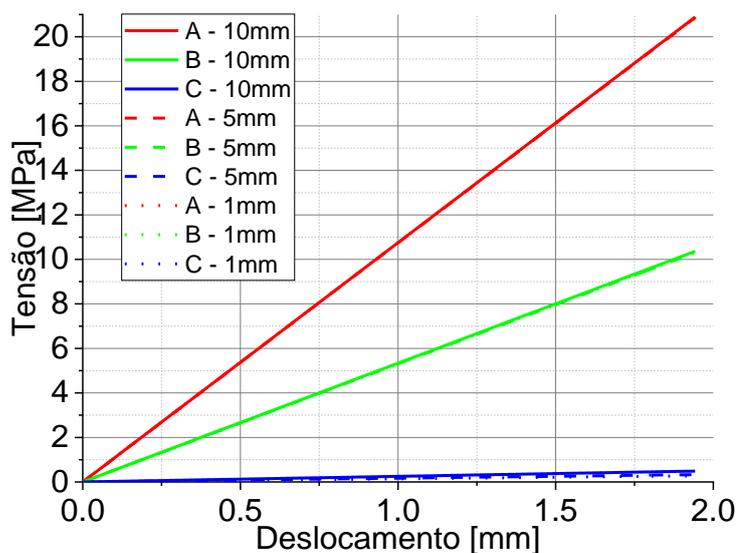
O tempo de processamento da malha de 1mm é mais de dez vezes superior quando comparado com a malha de 10mm, visto que a matriz gerada para resolver a solução é maior quando a malha (distância entre os elementos finitos) é menor (AZEVEDO, 2003). Além da malha tetraédrica possuir um tempo maior (entorno de 15%) de processamento quando comparada com a hexaédrica, visto que possui uma maior quantidade de nós (GRISALES-NOREÑA *et al.*, 2020).

Na análise da tensão máxima de tração na parte inferior, novamente é possível concluir que a malha tetraédrica obteve melhores resultados, tendo um erro de apenas 1,30%. Já analisando a malha hexaédrica, o erro foi de 6,67% a 36%, ou seja, mesmo com um tamanho de malha pequeno, o erro foi muito superior quando comparada com qualquer malha tetraédrica.

Sendo assim, fica evidente que qualquer malha tetraédrica pode ser adotada neste estudo, visto que o erro foi o mesmo para todos os tamanhos utilizados. Sendo assim, é possível utilizar uma malha de maior dimensão, com um tempo de processamento relativamente pequeno, e obter o mesmo resultado que uma malha pequena, com um tempo de processamento muito superior.

Através do Gráfico 3 e Figura 8 é possível analisar a influência do tamanho da malha tetraédrica, considerada a melhor malha no estudo, em diferentes pontos de análise: na superfície, 5mm da superfície e 10mm da superfície (ponto central), determinados como ponto A, B e C, respectivamente.

Gráfico 3. Gráfico da tensão × deformação da malha tetraédrica em diferentes pontos de análise.



Fonte: Autoria própria.

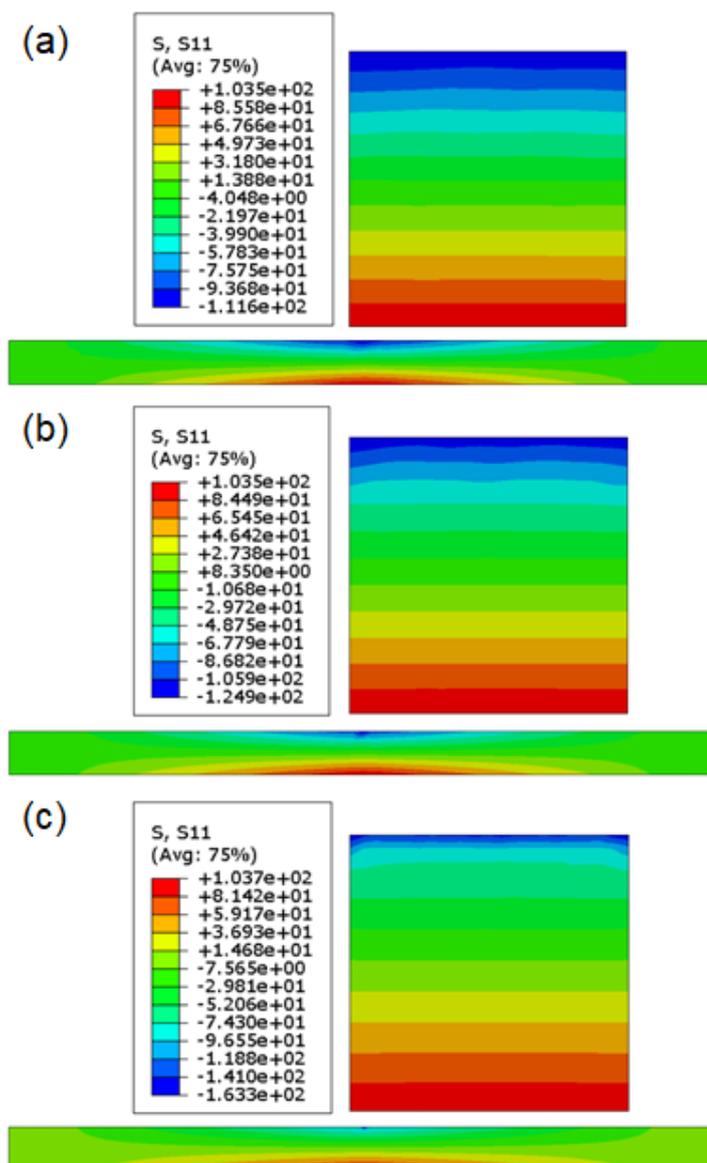


Figura 8. Gráfico da distribuição de tensões ao longo do corpo de prova e na seção central para a malha tetraédrica com os diferentes tamanhos de malha analisadas: 10mm (a), 5mm (b) e 1mm (c).

Fonte: Autoria própria.

Pode-se concluir que a tensão máxima na parte inferior do corpo de prova (ponto A) permanece o mesmo em todos os tamanhos de malha (diferença de 0,17%), sendo a mesma tensão calculada com a Equação 2. No ponto B a diferença também é pouco, sendo de apenas 0,40%. Porém, quando analisado no interior (ponto C), a diferença chegou até 42,86% quando comparada a malha de 1mm e 10mm.

Sendo assim, fica evidente que, para uma análise da tensão máxima (ocorrendo na parte inferior do corpo de prova), qualquer tamanho de malha pode ser adotado, contudo, para uma análise da distribuição de tensões em todo o corpo de prova, incluindo no ponto de aplicação da carga, uma malha menor pode discretizar melhor os esforços e trazer resultados mais próximos

do real, sendo necessário à validação destes valores. O mesmo ocorreu no estudo de Grisales-Noreña *et al.* (2020), em que uma malha menor foi mais efetiva para discretizar o comportamento do material, principalmente o dano.

CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- i. Teste de malha deve ser realizado em todas as simulações numéricas, visto que o tamanho de malha e o tipo de elemento finito altera os resultados;
- ii. No estudo proposto, a malha tetraédrica foi mais efetiva que a malha hexaédrica, visto que obteve deslocamento e tensão próxima da formulação;
- iii. Qualquer tamanho de malha tetraédrica foi efetiva na determinação do deslocamento e tensão máximos, porém uma malha de 10mm possui um tempo de processamento muito inferior à 1mm. Sendo assim, essa pode ser escolhida como a malha ideal na determinação destas propriedades; e
- iv. Quando analisado o interior do corpo de prova, a malha de 1mm discretiza melhor as tensões, obtendo uma diferença de 43% em relação à malha de 10mm e 5mm. Sendo assim, para uma análise mais completa do comportamento do material, um teste mais detalhado é necessário, sendo que uma malha menor pode ser mais indicada.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS. DE SIMULIA. Abaqus/CAE User's Guide, 2016. Disponível em: <http://130.149.89.49:2080/v2016/books/usi/default.htm>

ALMEIDA, T. H. DE *et al.* Static Bending Loading Diagram in Wood. **International Journal of Materials Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1-4, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20180801.01>

ALMEIDA, T. H. DE. **Efeito do intemperismo sobre propriedades da madeira**. 2019. 121 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.18.2019.tde-02102019-142233>

ANTONIO ROCCO LAHR, F. *et al.* Full Characterization of *Erismia uncinatum* Warm Wood Specie. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 5, p. 147-150, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20160605.01>

AZEVEDO, A. F. M. Método dos Elementos Finitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1ª Edição, 258 p., 2003.

CALIL JR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira. [s.l.] Editora Manole, 2003.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Full characterization of Calycophyllum multiflorum wood specie. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 4, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n4p637-643/2017>

EHLERS, S. *et al.* Numerical and experimental investigation on the collision resistance of the X-core structure. **Ships and Offshore Structures**, v. 7, n. 1, p. 21-29, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2010.532603>

ERCHINGER, C.; FRANGI, A.; FONTANA, M. Fire design of steel-to-timber dowelled connections. **Engineering Structures**, v. 32, n. 2, p. 580-589, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.11.004>

FRAGIACOMO, M. *et al.* Numerical and experimental thermal-structural behaviour of laminated veneer lumber (LVL) exposed to fire. 11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010, v. 4, n. 3, p. 3047-3056, 2010.

GRISALES-NOREÑA, L. F. *et al.* A Comparative Study on Power Flow Methods for Direct-Current Networks Considering Processing Time and Numerical Convergence Errors. **Electronics**, v. 9, n. 2062, p. 1-20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9122062>

KARLSSON, U. B. *et al.* Experimental and Numerical Investigation of Bulb Impact with a Ship Side-Shell Structure. **Marine Technology and SNAME News**, v. 46, n. 1, p. 16-26, 2009. DOI: <https://doi.org/10.5957/mtsn.2009.46.1.16>

KORGESAAR, M.; ROMANOFF, J. Influence of mesh size, stress triaxiality and damage induced softening on ductile fracture of large-scale shell structures. **Marine Structures**, v. 38, p. 1-17, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.05.001>

LI, M. *et al.* Structural response of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork. **Composite Structures**, v. 209, p. 13-22, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.079>

MENIS, A. **Fire resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross-Laminated Timber (XLAM) elements.** Dissertação (Mestrado) - Università Degli Studi Di Cagliari, 2012.

MENIS, A.; FRAGIACOMO, M.; CLEMENTE, I. Numerical investigation of the fire resistance of protected cross-laminated timber floor panels. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, v. 22, n. 4, p. 523-532, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2749/101686612X13363929517659>

PALMA, P.; FRANGI, A. Modelling the fire resistance of steel-to-timber dowelled connections loaded perpendicularly to the grain. **Fire Safety Journal**, v. 107, n. November, p. 54-74, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.12.001>

PIGOZZO, J. C. *et al.* Characteristics Value Estimate of Steel Bar Anchor Strength by Mean Response Confidence Interval. **International Journal of Materials Engineering**, v. 7, n. 6, p. III-III6, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20170706.02>

PIGOZZO, J. C. *et al.* Pull Out Strength Evaluation of Bonded-in Steel Bars in Pinus oocarpa Shiede Structural Members. **International Journal of Materials Engineering**, v. 8, n. 5, p. 85-89, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20180805.01>

PIGOZZO, J. C. *et al.* Pull Out Strength of Bonded-in Steel Rods Perpendicularly to the Grain in Corymbia citriodora and Pinus oocarpa Shiede Timber. **International Journal of Materials Engineering**, v. 8, n. 4, p. 70-75, 2018b. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20180804.03>

PILLON, F. R. *et al.* Technical and Economic Analysis of Structures of Buildings in Reinforced Concrete with Ribbed Slab from 3 to 21 Floors. **International Journal of Materials Engineering**, v. 8, n. 6, p. 142-151, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20180806.02>

Influência do Tamanho da Malha em Simulações Numéricas Via Elementos Finitos

PINHEIRO, L. M.; CATOIA, B.; CATOIA, T. Tabela de vigas: Deslocamentos e Momentos de Engastamento Perfeito São Carlos, 2010.