

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ELEMENTOS DE LIGAÇÃO - CON-2016-0355

Nome do primeiro autor, e-mail1 (Times New Roman, negrito, tamanho 10) ¹

Nome do segundo autor, e-mail1 (Times New Roman, negrito, tamanho 10) ¹

Nome do terceiro autor, e-mail1 (Times New Roman, negrito, tamanho 10) ¹

Nome do quarto autor, e-mail1 (Times New Roman, negrito, tamanho 10) ¹

¹Nome da instituição, endereço para correspondência, (Times New Roman, tamanho 10)

Resumo: Ao iniciar o estudo de qualquer estrutura, é recorrente a necessidade de efetuar ligações, que na maioria das vezes são feitas utilizando elementos diferentes (ex. madeira e aço, aço e solda, dentre outros). A opção por adotar diferentes materiais em um mesmo componente deve-se a necessidade dos projetistas em buscar sempre um meio mais eficiente de suportar as cargas aplicadas e a realidade dos produtos existentes no mercado. Ao analisar a madeira percebe-se a existência de uma variedade muito grande de ligações devido à facilidade de perfuração, corte e ajuste da forma. Estas ligações, no entanto, se dão geralmente por meio de pregos e parafusos (como porcas e arruelas) em aço, ou ainda com colas e entalhes. Na perspectiva de obter e analisar novos produtos e melhorar as ligações em estruturas de madeira, este artigo analisa por meio de simulação numérica usando o método dos elementos finitos o comportamento de parafusos feito em madeira Parajú, em relação aos esforços de tração, verificando a viabilidade de uso do mesmo em elementos estruturais.

Palavras-chave: Propriedades Mecânicas, Parafusos, Madeira, Métodos dos Elementos Finitos

1. INTRODUÇÃO

Na construção civil existe o consenso que ligações entre os diversos tipos de estruturas são a parte mais propícia ao colapso. Estas ligações em quase totalidade das vezes são necessárias tendo em vista a necessidade de alterar a direção dos esforços ou de vencer grandes vãos. Cada projeto destas ligações requer o devido cuidado, levando em considerações as cargas atuantes, bem com as propriedades do material, objeto de análise.

Ao estudar o material madeira e seus produtos compostos como um material estrutural percebe-se que existe uma variedade muito grande de possibilidades de conexões, tendo em vista a facilidade de perfuração e corte desses elementos estruturais. Em geral as ligações desses elementos se dão com diferentes tipos de adesivos ou fixadores mecânicos como pregos e parafusos (com porcas e arruelas) fabricados geralmente em ligas de ferro ou de cobre e, menos usualmente, de outros materiais (Albuquerque (1980)).

Neste sentido, foram desenvolvidos parafusos feitos em madeira parajú (Fig.1), de tamanho M20, com passos de 2,0 mm e 2,5 mm e roscas triangular, que podem ser utilizados em diversos tipos de meios agressivos como áreas molhadas (decks de piscinas) ou áreas industriais, onde nestes locais é visível que as ligações com parafusos convencionais feito em ligas de ferro ou de cobre serão os pontos mais propícios a iniciar uma falha da estrutura, devido a facilidade de corrosão destes elementos.

Estes parafusos foram testados experimentalmente à tração, sendo avaliado a capacidade de carga e a viabilidade de uso dos mesmos na construção civil. No entanto, ocorreram algumas falhas localizadas nos parafusos quando da execução dos ensaios o que gerou questionamento quanto à viabilidade técnica do mesmo.

Para melhorar essas ligações e corrigir essas falhas localizadas é possível utilizar modelos teóricos/numéricos baseados no método dos elementos finitos, em que simulações numéricas permitem definir pontos de reforço com base nos resultados experimentais.

Com base nos fatos apresentados estes parafusos foram simulados numericamente, sendo observado um desempenho muito satisfatório.

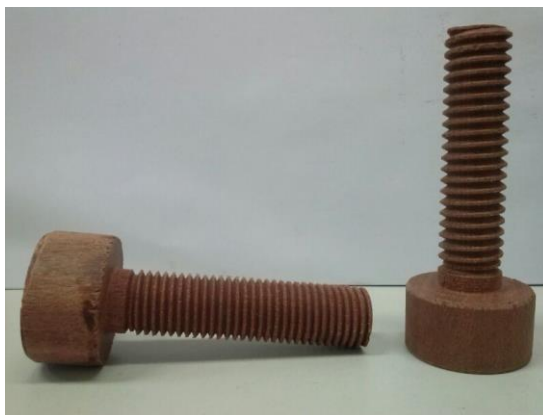


Figura 1. Parafuso feito em madeira Parajú

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Elementos de ligação em madeira

Desde as mais antigas construções até os mais modernos exemplos arquitetônicos, nota-se a presença da madeira como elemento estrutural, podendo ser aplicada comumente para resolver problemas relacionados em desenvolvimento de coberturas, construções rurais, cimbramentos em estruturas de concreto armado e pontes.

A madeira é um material de origem biológica, que possui variações nas características físicas, químicas e anatômicas ao analisar árvores de mesma espécie e dentro da árvore, sendo essa variação resultado de atividades cambiais, transmissão de características hereditárias e condições ambientais do sítio, como solo, relevo, declividade (SILVA et al., 2012).

Pensando também em fatores sustentáveis, a madeira é a única com caráter renovável, uma vez que aplicada as devidas técnicas de plantio e colheita. Outro fator importante da madeira é que ela minimiza a quantidade de carbono liberado na atmosfera, amenizando assim, os problemas gerados pelo chamado efeito estufa. Isso ocorre porque materiais de madeira ocasiona o armazenamento do carbono durante toda sua vida útil, considerando o seu uso no estado sólido.

A escolha da madeira na construção civil leva a uma economia de energia desde a formação da matéria prima bruta até a etapa de processamento, além do que, ao contrário de outras matérias-primas, a madeira ao envelhecer ou ao deixar de desempenhar a sua função estrutural, não constitui qualquer perigo para o meio ambiente, já que é facilmente reconvertida e tem-se o aproveitamento de seus resíduos como energia calorífica.

Observa-se então, que conhecer as características e propriedades dos materiais disponíveis para uso é de suma importância. Tais variações podem gerar benefícios e os produtos oriundos de fonte orgânica, às vezes, são abandonados, sem ponderar e avaliar suas vantagens principalmente àquelas ligadas a fatores de sustentabilidade, como listado acima e a sua durabilidade elevada, tendo em vista que a madeira não oxida como, por exemplo, é comum em materiais metálicos.

Por meio de inovações no ramo da engenharia e arquitetura é possível vislumbrar novas possibilidades de aplicação de diversos sistemas de construção e tecnologias. Os elementos de ligação são um exemplo clássico de aplicabilidade da madeira em projetos estruturais. Para a madeira, os meios ligantes podem ser classificados, basicamente, em quatro classes: ligações por penetração entre peças (encaixes), ligações por pinos (pregos, parafusos e cavilhas), ligações por conectores (anéis e discos e chapas dentadas) e ligações por adesão (cola).

Em geral esses materiais são confeccionados de maneira que atendam as expectativas e suporte as solicitações as quais serão submetidas, como, por exemplo, nos pinos de madeira, levam-se em conta a resistência ao embutimento, ou seja, o esmagamento na área de contato entre o pino.

Para a confecção do parafuso, objeto de análise do trabalho, foi utilizada a madeira Maçaranduba. Pertencente ao grupo de espécies do gênero *Manilkara* que produzem madeiras pesadas, duras, de coloração castanho-avermelhada. Essas Madeiras recebem nomes típicos em suas regiões de ocorrência, como por exemplo na região sul da Bahia até as regiões Sul e Sudeste, é conhecida como Parajú. A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas desta madeira.

Tabela 1. Propriedades da madeira Parajú. Valores retirados (Nahuz et al., 2013)

Propriedade	Valor
Densidade [Kg/m ³]	833
Módulo de Young [-]	0,394
Tração normal às fibras [MPa]	8,2

2.2. Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) surgiu com a necessidade de aperfeiçoar os desenvolvimentos em diversas áreas, de forma a otimizar tempo e trabalho, devido a eficiência da análise dos elementos em estudo.

Quando se depara com problemas muito complexos, onde não tem uma solução exata e que não se consegue representar analiticamente, o MEF é usado para analisar e determinar o estado de tensão e de deformação de um elemento ou estrutura que estão sujeitos a forças externas. Este método basicamente realiza a discretização (subdivisão) de elementos com as mesmas propriedades do real. Equações diferenciais descrevem esses elementos, e são resolvidas através de modelos matemáticos. Para a grande quantidade de cálculo existente por trás desses problemas complexos, é necessário utilizar computadores para uma resposta rápida.

Correntemente a análise de estruturas é feita com recurso de modelos de sistemas discretos. Este tipo de análise caracteriza-se por fazer uso de um conjunto de elementos que modelam o domínio em estudo e que se encontram unidos pelas suas extremidades (Vaz, 2011). Estes elementos podem estar sujeitos a um conjunto diversificado de ações exteriores. São exemplo de sistemas discretos as estruturas articuladas, as estruturas reticuladas e as grelhas.

A formulação matemática do Método dos Elementos Finitos aplicada a meios contínuos consiste em substituir o integral sobre um domínio complexo por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria mais simples. Se for possível calcular todos os integrais estendidos aos subdomínios, no final, basta efetuar o somatório para obter o valor do integral estendido a todo o domínio (Soriano, 2001).

Para estudar um domínio seja ele através de meios discretos ou contínuos, é necessário discretizá-lo em uma malha de elementos finitos. Essa malha gerada influencia no resultado com que a solução numérica converge para os valores teóricos esperados. Assim, surge a necessidade de desenvolver estratégias de refinamento de malhas de elementos finitos que assegurem a convergência da solução. Existem diversos tipos de malhas e elas são dependentes do tipo de domínio. Temos formulações de domínios unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. O primeiro, prevalecem os elementos que são barras ligadas por nós, treliças e barras. Nos bidimensionais, são condições de análise no plano, onde a espessura é desprezível para a análise. Os tridimensionais são utilizados em objetos sólidos, com geometrias complexas e para análises pontuais das diversas regiões do todo (Huebner, 2001)

O Método de Elementos Finitos nos fornece a vantagem de analisar estruturas com geometrias, carregamentos e condições de contorno mais complexas. Realizar análises não só estáticas, mas também dinâmicas, com grandes deslocamentos e deformações, e com diversos tipos de materiais não lineares. Isso faz com que a análise geral da estrutura seja mais rápida, se comparando que no início não tem um caminho a ser seguido.

A desvantagem do Método de Elementos Finitos é a de fornecer uma aproximação dos valores, uma vez que se trata de uma análise numérica, dependendo muito do tipo de malha que é utilizada, valores de entrada e condições impostas, ou seja, não é 100% confiável.

O MEF tem diversas aplicações, dentre elas, análises de estruturas reticuladas, como treliças e vigas, e estruturas bidimensionais e tridimensionais. Uma das aplicações se iniciou com a análise de estruturas de comportamento linear elástico, e desenvolveu-se para o não-linear geométrico e físico e a análise dinâmica. Em seguida, o MEF abrangeu mais áreas, como a interação fluido-mecânica e análises de transmissão de calor.

Atualmente, existem uma infinidade de programas para realizar essa análise numérica, tais como o Ansys, Abaqus, Flux, Go Mesh, SAP, Nastranetc, Pro/Engineer, Solidworks Simulation. O programa que será utilizado nesse trabalho é o Solidworks Simulation pela facilidade de manuseio e disponibilidade do mesmo.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais e Equipamentos

Para o ensaio experimental utilizou-se o laboratório de Resistência dos Materiais da PUC Minas, unidade do Coração Eucarístico. Os equipamentos utilizados foram:

- Prensa Servo Controlada EMIC - 200kN;
- Software Tesc para controle da prensa servo-controlada e obtenção dos dados de carga e deslocamento
- Parafuso M20 em madeira Parajú, com passo de 2,0mm e 30 filetes;
- Parafuso M20 em madeira Parajú, com passo de 2,5mm e 20 filetes;
- Porca de aço, com passo interno de 2,0mm e 5 filetes;
- Porca de alumínio, com passo interno de 2,5mm e 5 filetes;

A Figura 2 apresenta os parafusos ensaiados bem como a montagem dos mesmos na prensa servo-controlada.

3.2. Metodologia

Para a execução do ensaio foi utilizado um dispositivo que afixava a cabeça do parafuso em uma extremidade e a porca na outra. Esse ensaio permitiu obter a resistência dos filetes da madeira. A Figura 3 apresenta a execução do ensaio para os parafusos M20 x 2,0 e M20 x 2,5.



Figura 2. Máquina de tração e Parafusos ensaiados.

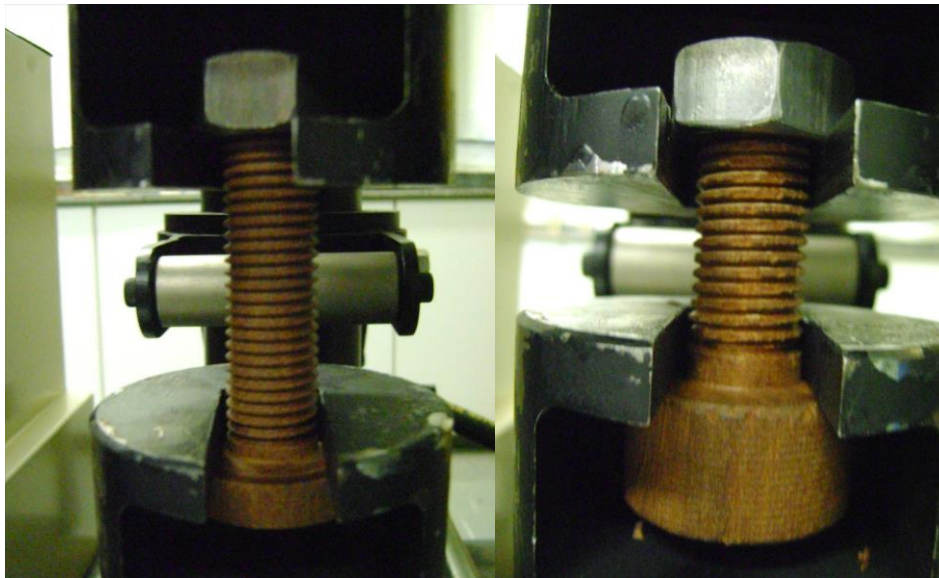


Figura 3. Ensaio dos parafusos M20 x 2,0 e M20 x 2,5.

Por limitações de espaço e pela metodologia utilizada, o ensaio foi realizado com 5 filetes de cada vez, com um incremento de 1N/s, na carga do equipamento, até a ruptura do material, repetindo-se o ensaio até o final do parafuso, a fim de se obter o gráfico de Força por deslocamento.

A curva obtida Carga versus Deslocamento foi levantada e comparada para cada série de filetes e entre cada tipo de parafuso. A tensão de ruptura do material é dada pela eq. (1).

$$\tau_{rup} = \frac{F_{ult}}{A_0} \quad (1)$$

Onde, a carga final é obtida por meio do ensaio experimental e a área é retirada da eq. (2).

$$A_0 = D_{int} \cdot \pi \cdot passo \quad (2)$$

3.3. Resultados experimentais

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados obtidos para os ensaios M20 com passos 2,0 mm e 2,5 mm. Observa-se que a madeira apresenta um comportamento frágil, com uma queda brusca na capacidade de carga.

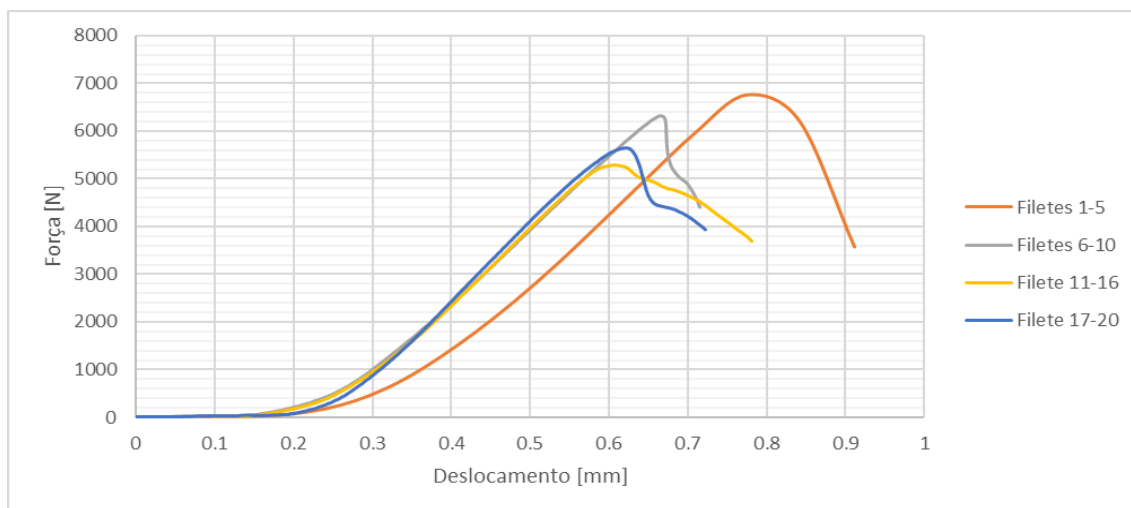


Figura 4. Força x Deslocamento para o M20 com passo de 2mm

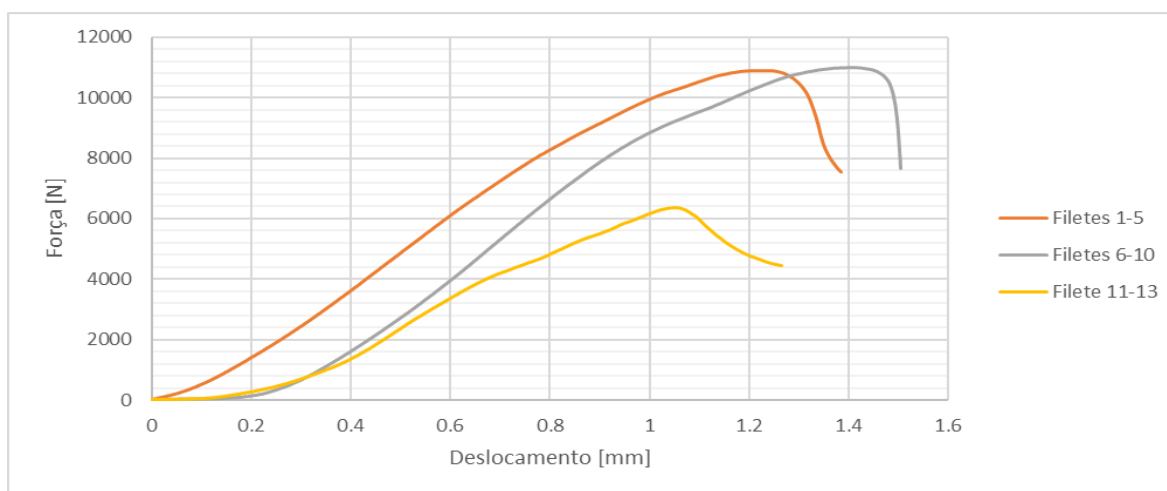


Figura 5. Força x Deslocamento para o M20 com passo de 2,5mm.

A Tabela 2 apresenta as tensões obtidas por filete. Para o parafuso de passo de 2mm observou-se que o valor da tensão última deste parafuso foi na ordem de $\sigma = 53,15$ MPa, representando uma tensão de 10,63 MPa por filete. Já para o parafuso de passo 2,5mm a tensão última foi de $\sigma = 66,61$ MPa, representando 15,35 MPa por filete. Isso era esperado, uma vez que a “espessura” do filete era maior.

Tabela 2. Resultados experimentais para as cargas nos filetes da madeira, valores médios obtidos em 3 ensaios.

Parafuso M20	Deslocamento Médio[mm]	Carga Média [N]	Carga por filete [N]	Tensão Média [Mpa]	Tensão por filete [Mpa]
Passo 2,0	0,67	6.011,025	1.202,205	53,15	10,63
Passo 2,5	1,23	9.417,27	2.166,24	66,61	15,32

Analisando o deslocamento médio obtido no ensaio de tração, observa-se que o ponto de carga máxima, ou carga de ruptura, ocorreu em proporções diferentes para cada tipo de parafuso. Para o M20 com passo de 2,0mm a ruptura ocorreu à 33,5% da espessura da rosca, (0,65 mm). Já para o M20 com passo de 2,5mm a ruptura, ocorreu quase na metade da espessura (1,23 mm), representando 49,2% do total do passo. A partir destes pontos houve a quebra do restante do filete reduzindo a capacidade de carga do parafuso.

Uma observação interessante é que o parafuso de 2 mm passo suportou uma carga de 1202,205N por filete. Como o parafuso possui um total de 30 filetes estima-se que o mesmo suportaria uma carga total de 36,07 kN. Já o parafuso de 2,5 mm de passo suportou uma carga de 2166,24N por filete, estimando-se uma carga total de 43,32 kN, considerando 20 filetes no total. Esses valores atenderiam as necessidades de uma gama muito grande de obras da construção civil.

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para a simulação numérica foi utilizada a função Simulation, do programa Solidworks. Este software possui a função CAD, a qual foi utilizada para matematizar o parafuso. Dentre os testes que podem ser realizados com o Solidworks, têm-se os de durabilidade, dinâmica do fluxo de fluido, movimentos, resposta dinâmica e estática e transferência de calor. Tendo sido o de análise estática utilizado para este trabalho.

A Figura 6 apresenta os dois tipos de parafusos, desenvolvidos no ambiente 3D do software, seguindo os padrões de passo e quantidades de filetes.

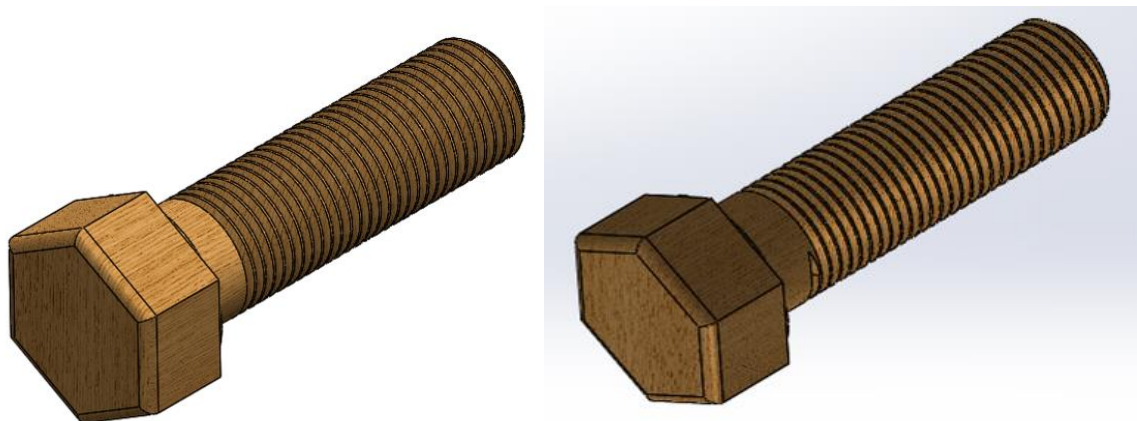


Figura 6. Parafusos, respectivamente M20 passo 2,0mm e M20 passo 2,5mm, confeccionados em ambiente 3D com o programa SolidWorks

Após a modelagem, teve início o pré-processamento da análise. Nessa etapa os desenhos foram aprimorados, visando reduzir os esforços de cálculos e maximização do tempo. O modelo aprimorado ficou conforme apresentado na Fig.07. Para reduzir o tempo de processamento, foi reduzida a quantidade de elementos considerando somente metade do parafuso, além de terem sido suprimidas as regiões de engaste e as estruturas internas.



Figura 7. Aprimoramentos do parafuso, em ambos os tipos de parafuso analisados.

Na sequência, as condições de contorno foram aplicadas, onde cada filete recebeu uma carga unitária, na região B, de 601N, para o passo de 2,0mm e 1083N, para o passo de 2,5mm, valor comparado com o experimental. A condição de deslocamento igual à zero foi aplicada na região A, da cabeça do parafuso, simulando o ensaio experimental.

A escolha da malha foi feita com auxílio do programa, que se adequa ao tamanho entre nós para o processamento. A Tabela 03 contém as informações para a malha utilizada, com as informações fornecidas pelo programa. e a Fig. 08 representa a peça ao final do pré-processamento.

Tabela 3. Dados da criação da malha. Valores obtidos por meio do software

Parafuso M20	Passo 2,0	Passo 2,5
Tipo	Tridimensional - triangular	Tridimensional - triangular
Número de elementos	11.923	10.158
Número de Nós	21.549	18.014

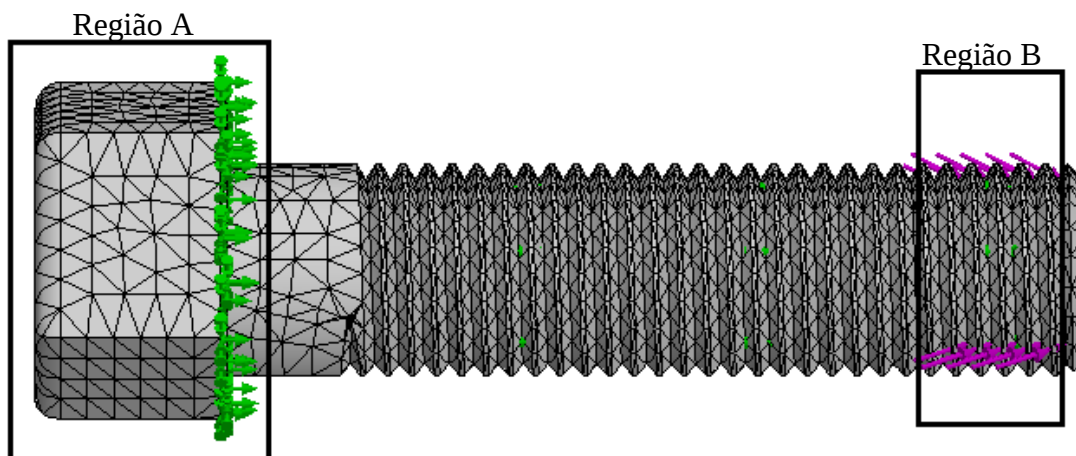


Figura 8. Parafuso ao finalizar o pré-processamento, em ambos os casos analisados.

Os valores das malhas foram fixados, bem como as regiões de engaste e regiões de aplicação da força, dessa forma o modelo precisava ser ajustado, para se aproximar dos valores experimentais. O processo de ajuste foi feito utilizando-se o valor do módulo de elasticidade ($E=16,5\text{MPa}$) para a madeira Parajú sobre compressão. Porém a análise seria feita sobre tração e valores para esta condição não foram encontrados.

O solver para o programa foi executado, e a Fig.09 apresentam as deformações sofridas pelos filetes da rosca, ao final da calibração. O objetivo era chegar aos deslocamentos obtidos experimentalmente, que era de 0,671mm para o passo de 2,0mm e 1,23 para o passo de 2,5mm. Sendo possível encontrar o valor ideal para o módulo de elasticidade do material ensaiado à tração.

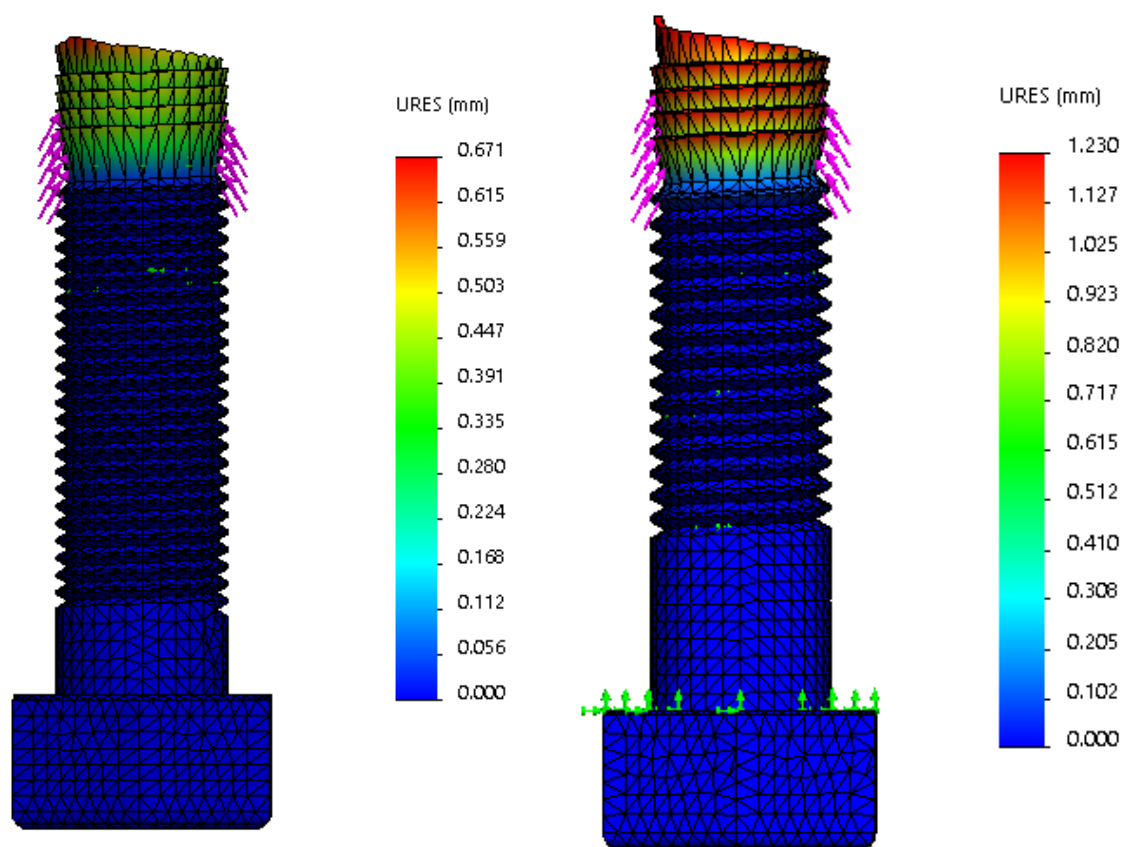


Figura 9. Parafusos analisados com auxílio do programa. Valores à direita para os deslocamentos máximos dos filetes.

Com a simulação numérica foi possível aferir o valor do módulo de elasticidade da madeira à tração, sendo este valor da ordem de 73,3MPa. Este valor se aproxima dos valores indicados na literatura, demonstrando que a simulação numérica realizada está adequada e que esse modelo pode ser utilizado para sugerir outros tipos de passos e rosca de parafusos para utiliza-los na construção civil.

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho analisou por meio de simulação numérica, usando o método dos elementos finitos, o comportamento de parafusos feito em madeira Parajú, em relação aos esforços de tração ensaiados em laboratório. Pela modelagem numérica obteve-se de forma indireta o valor do módulo de elasticidade da madeira à tração. O valor encontrado condiz com os resultados empíricos obtidos na literatura, comprovando que o modelo desenvolvido é adequado para essa análise.

Este trabalho encontra-se em continuidade e novos testes serão realizados com o intuito de desenvolver novos parafusos com parâmetros de rosca e passo diferenciado a partir do modelo numérico sugerido.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Fundo de Incentivo à Pesquisa da PUC MINAS (FIP/PUC MINAS), à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq pelo auxílio financeiro para sua publicação.

7. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6892, 2013, Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente, pp. 1-70
- Albuquerque, Olavo A. L. Pires. (1980) Elementos de Máquinas. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, pp. 485
- Silva, J. R.M.; Melo, L. E. L.; Motta, J. P.; Lima, J.T.; Muniz, G.I. B., Variação radial do ângulo da grã da madeira de *Eucalyptus gradis*, In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 13. 2012
- Nahuz, M. A. R.; Miranda, M. J. A. C.; Ielo, P. K. Y.; Pigozzo, R. J. B.; Yojo, T. Catálogo de madeiras brasileiras para construção civil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2013. pp. 103 (Publicação IPT, 4371).
- Vaz, L. E., Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas, Ed. Campus Elsevier, Rio de Janeiro, 1ªEd. 2011 pp. 296
- Soriano, H. L., Elementos Finitos: Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas, Ed. Ciência Moderna, 1a Ed., Rio de Janeiro, 2001.
- Huebner, K. H., Dewhirst, D. L., Smith, D. E., Byrom, T. G., The Finite Element Method for Engineers, Ed. Wiley, 4th Edition, 2001.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

CON-2016-0355 - NUMERICAL SIMULATION OF CONNECTING ELEMENTS - CON-2016-0355

Nome do primeiro autor, e-mail1 (Times New Roman, negrito, tamanho 10) ¹

Nome do segundo autor, e-mail1 (Times New Roman, negrito, tamanho 10) ¹

Nome do terceiro autor, e-mail1 (Times New Roman, negrito, tamanho 10) ¹

Nome do quarto autor, e-mail1 (Times New Roman, negrito, tamanho 10) ¹

¹Nome da instituição, endereço para correspondência, (Times New Roman, tamanho 10)

Abstract. When beggining the study of any structure, the need for perfoming links, which are mostly made out of different elements (e.g wood and steel, steel and solder, among others). The choice of adopting different materials in the same component is due to the constant draftsmans' need of seeking a more efficient way of supporting the loads and the reality of the availability of products in the market. After analysing wood, we can perceive the existance of a wide variety of links because of the ease of perfuration, cut and form adjustments. These links, however, are mostly built with nails and screws(e.g nuts and washers) into steel, or even with pastes and notches. In the outlook of obtaining and analysing new products and improving links in wood structures, this article analyses, via numerical simulation using the finite elements method, the behaviour of nails made in Parajú wood, regarding to the efforts of tension and compression, verifying the viability for its application in structural elements.

Keywords: Mechanical properties, Screw, Wood, Finite Element Methods (FEM)