



TENSÕES DE FLEXÃO EM VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA ARMADA AVALIADAS POR MODELAGEM COMPUTACIONAL

BENDING STRESSES OF REINFORCED GLUED-LAMINATED TIMBER BEAMS EVALUATED BY COMPUTATIONAL MODELING

Lucas S. Peixoto^{1*}, Julio Soriano², Bruno P. Pellis³

⁽¹⁾ Mestrando em Eng. Agrícola, FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Brasil

⁽²⁾ Professor Livre Docente. FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Brasil

⁽³⁾ Allpine Comércio de Madeiras e Serviços, Salto, Brasil

* Contato: lucas.sacramoni@gmail.com

CÓDIGO: 4619970

Resumo

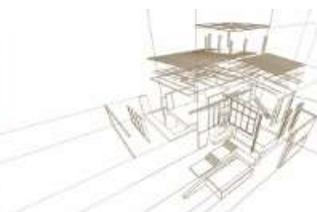
Um dos principais produtos tecnológicos e derivados da madeira é a madeira laminada colada (MLC) formada por lâminas solidarizadas por adesivo estrutural em processo industrial, que apresenta diversas vantagens em relação às peças usuais de madeira serradas. O desempenho estrutural de vigas de MLC pode ser melhorado através da utilização de reforços internos às peças, como, por exemplo, barras de aço coladas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de vigas de MLC reforçadas com barras de aço, tendo por base as tensões normais máximas obtidas em ensaios de flexão e as tensões obtidas com a modelagem computacional. Para tanto, vigas de MLC com e sem reforços metálicos foram ensaiadas sob flexão estática por quatro pontos e, também, modeladas com o software ANSYS®. Nas peças reforçadas foram empregadas as taxas de armadura (relação entre as áreas de aço e de madeira) iguais a 2% e 4%. Foi observado que a modelagem computacional proporcionou tensões normais de flexão máximas muito precisas quando comparadas com os resultados experimentais. As tensões normais de flexão na seção transversal da MLC, para um carregamento dentro do estado limite de serviço de 5 kN, com as taxas de 2% e 4%, foram reduzidas de 3,1 MPa e 4,9 MPa, respectivamente. Foi possível concluir que a maior taxa de armadura reduz as diferenças dos resultados da modelagem computacional em relação aos experimentais.

Palavras-chave: Derivados da madeira; barras de aço; rigidez à flexão.

Abstract

One of the main technological products and derivatives of wood is the glued laminated timber (Glulam) industrially produced with laminates bonded by structural adhesive, that presents several advantages over to sawed timbers pieces. The structural performance of Glulam beams can be improved by reinforcements inserted internally in the cross-sections, as example with steel bars. This work aimed to evaluate the performance of Glulam beams reinforced with steel bars, based on the maximum experimental bending stresses and results obtained by the computational modeling. For this, unreinforced and reinforced Glulam beams were tested by bending at four points and were modeled by ANSYS software®. In the reinforced beams, the reinforcement ratio (ratio of cross-sections of steel and timber) were equal to 2% and 4%. It was observed that the modeling provided bending stresses very accurate when compared with the testing results. The normal bending stresses at the cross-section of glulam beams, under a loading intensity that respects the serviceability limit states of 5 kN, with the reinforcement ratio of 2% and 4%, were reduced of 3.1 MPa and 4.9 MPa, respectively. It was concluded that the higher reinforcement ratio reduces the differences between the modeling and experimental results.

Keywords: Wood derivatives; steel bars; bending stiffness.



1. INTRODUÇÃO

Os produtos derivados da madeira podem proporcionar para as construções civis diversas vantagens quando comparados às peças convencionais de madeira serrada, contribuindo, assim, para o uso racional e sustentável da madeira, matéria prima proveniente de fonte natural e renovável. Um desses produtos derivados da madeira, é a madeira laminada colada (MLC), formada por lâminas coladas por adesivo estrutural e sob pressão em processo industrial, que apresenta alguns benefícios, entre eles: a possibilidade de fabricação de peças com maiores dimensões, bem como a inovação arquitetônica com peças de formatos diferenciados (Ferreira et al. 2017; Fiorelli and Dias 2006; Mascia et al. 2018).

Como as peças de MLC são fabricadas com lâminas que passam por um processo de seleção, classificação e disposição, um número menor de defeitos estarão presentes, tais como nós e rachaduras, resultando num produto mais homogêneo e com melhores propriedades de resistência e rigidez (Mascia et al. 2018). Além dessas vantagens, a MLC possibilita que sejam empregadas madeiras de reflorestamento e com baixa massa específica (Tienne et al. 2011).

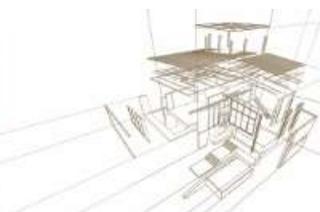
Uma técnica que pode proporcionar outras vantagens para as peças de MLC, resultando em peças estruturais com um melhor desempenho, são as aplicações de reforços, tanto sob aspectos do aumento da rigidez, quanto da resistência mecânica e da durabilidade (Ghazijahani et al. 2017; Soriano, Pellis and Mascia 2016; Luca and Marano 2012; Negrão 2012). Dentre as possibilidades de reforços tem-se, por exemplo, as fibras naturais (Mascia, Mayer and Moraes 2014) ou poliméricas (Raftery and Harte 2011; Buligon et al. 2013; D'Ambrisi et al. 2013; Ghazijahani et al. 2017; Mascia et al. 2018), que são coladas interna ou externamente nas zonas tracionadas das vigas. Os reforços com elementos metálicos, que podem ser aplicados tanto nas zonas tracionadas quanto comprimidas das peças de MLC, são eficientes para a redução das flechas e para o aumento da capacidade de carregamento (Luca and Marano 2012; Soriano, Pellis and Mascia 2016; Ghazijahani et al. 2017).

O desempenho mecânico das peças de madeira reforçada depende de alguns parâmetros, como, por exemplo, propriedades dos materiais (madeira e reforço), taxa de armadura e disposição do reforço na seção transversal (Soriano, Pellis and Mascia 2016; Luca and Marano 2012; Negrão 2012). Com isto, para avaliar o desempenho mecânico das peças reforçadas, além da análise experimental, pode-se utilizar a simulação numérica com a estrutura discretizada pelo método dos elementos finitos (Miotto and Dias 2012; Zhang et al. 2015; Uzel et al. 2018).

A presente pesquisa teve por objetivo avaliar o desempenho de vigas de MLC armadas com barras de aço, tendo por base as tensões normais experimentais e as tensões normais obtidas com a modelagem computacional.

2. METODOLOGIA

Para se alcançar os objetivos deste trabalho foram simuladas vigas de MLC, com seção transversal $b \times h$ (52 mm x 154 mm) e comprimento igual a 2.820 mm, sem e com reforço de barras de aço. As vigas (Figura 1 a-c) foram denominadas segundo a taxa de armadura



(relação entre a área de aço e a área da seção transversal da viga), sendo: MLC (sem reforço), MLCA-2 (taxa de armadura igual a 2%) e MLCA-4 (taxa de armadura igual a 4%). As barras de aço das vigas reforçadas foram posicionadas simetricamente em relação a linha neutra e distantes de 27 mm das bordas inferior e superior.

Essas concepções da seção transversal, assim como o comprimento das vigas, foram baseadas na pesquisa experimental desenvolvida por Pellis (2016) e Soriano, Pellis and Mascia (2016); em vigas compostas com sete lâminas de *Pinus elliotti* processadas com 22 mm de espessura. Dessas pesquisas foram utilizados os dados de tensões para comparação com os resultados das simulações computacionais.

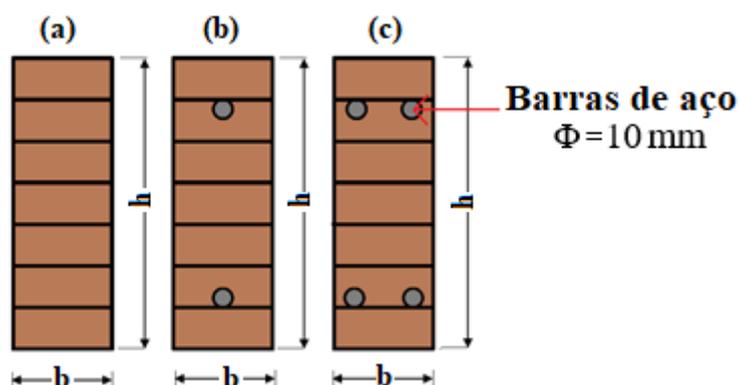


Figura 1: Seções transversais e parâmetros geométricos das vigas simuladas. (a) MLC, (b) MLCA-2 e (c) MLCA-4

As taxas de armadura empregadas neste trabalho e de acordo com Soriano, Pellis and Mascia (2016), possibilitam avaliar os efeitos nas tensões em relação ao material base, no caso a MLC, tanto para a situação de máxima taxa de armadura (4%) quanto para a situação intermediária (2%). Essas taxas de 2% e 4% estão de acordo com De Vecchi et al. (2008) que avaliaram experimentalmente vigas de MLC reforçadas com taxas variando entre 0,2% e 4%.

2.1. Especificação dos materiais

A madeira é um material considerado ortotrópico, segundo os três eixos (longitudinal, radial e transversal), com as constantes elásticas definidas por três valores para o módulo de elasticidade (E_L , E_R , E_T), três módulos de cisalhamento (G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}) e, seis coeficientes de Poisson (ν_{LR} , ν_{LT} , ν_{RL} , ν_{RT} , ν_{TL} , ν_{TR}). Nesta pesquisa foram realizadas simulações nas peças submetidas a flexão simples, onde a direção predominante é a longitudinal e, dessa forma simplificada, a madeira foi considerada isotrópica, com o módulo de elasticidade E_{MLC} igual a 12.435 MPa, coeficiente de Poisson igual a 0,4 e massa específica de 537 kg m^{-3} (Tabela 1).

Para os reforços foram empregadas barras de aço usuais em estruturas de concreto armado, com resistência característica ao escoamento igual a 500 MPa (categoria CA-50), com módulo de elasticidade (E_s) igual a 210.000 MPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,3 (Tabela 1).

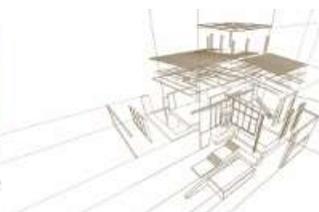


Tabela 1: Materiais utilizados e suas respectivas propriedades

Material	Propriedade		
	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson	Densidade (kg.m ⁻³)
Madeira	12.435	0,4	537
Aço	210.000	0,3	7.850

2.2. Esquema estático das vigas

As vigas foram simuladas seguindo o esquema estático de flexão por quatro pontos (Figura 2), de acordo com a norma ASTM D198:2014. Esse modelo de ensaio é interessante por ocasionar no trecho central da viga a anulação do esforço cortante e, também, por resultar num valor de momento fletor máximo e constante. Os apoios (um fixo e o outro móvel) bem como as cargas concentradas ($P/2$), foram aplicados em linhas na largura da viga.

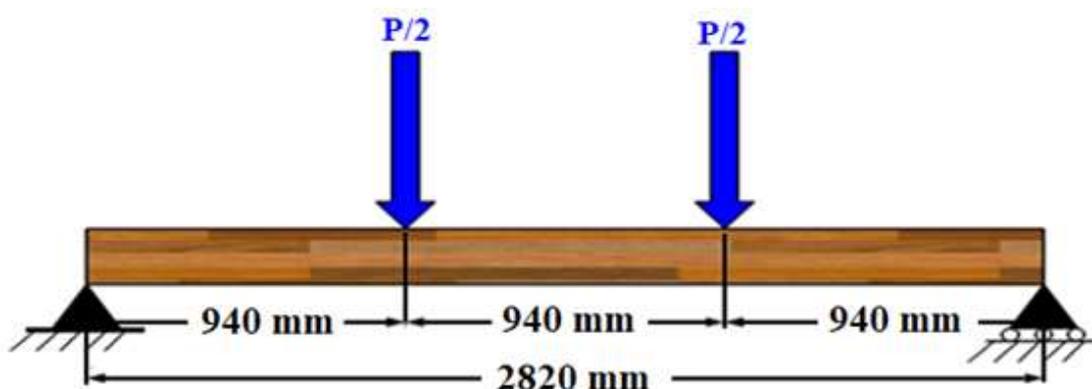


Figura 2: Esquema estático das peças simuladas em flexão por quatro pontos

2.3. Modelagem pelo método dos elementos finitos

As simulações das vigas foram realizadas com uso de modelos tridimensionais, pelo método dos elementos finitos, utilizando o software ANSYS *mechanical research* (versão 19.1). As geometrias de todas as peças foram concebidas pelo Workbench (versão 19.1), com a geração de malhas automáticas. As malhas foram discretizadas (Figura 3) com elementos tridimensionais quadráticos solid186 (Figura 4), que possui três graus de liberdade por nó (translação segundo os eixos X, Y e Z), contendo 20 nós.

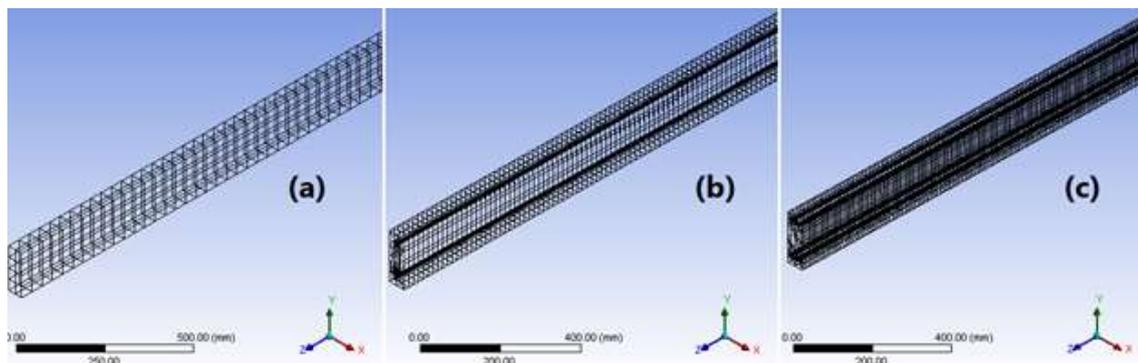
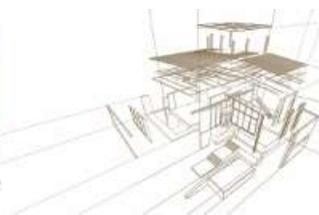


Figura 3: Vigas discretizadas com elementos solid186 (Ansys, R19.1): (a) MLC; (b) MLCA-2 e (c) MLCA-4

O elemento solid186 pode ser considerado homogêneo ou constituído por camadas heterogêneas (Figura 4). Para o aço foi considerado o solid186-homogêneo e para a MLC o solid186-heterogêneo (dividido em camadas com a espessura das lâminas da MLC).

A adesão entre as lâminas foi considerada perfeita, isto é, sem ocorrência de delaminação, graças a adesão monolítica entre o aço e a madeira.

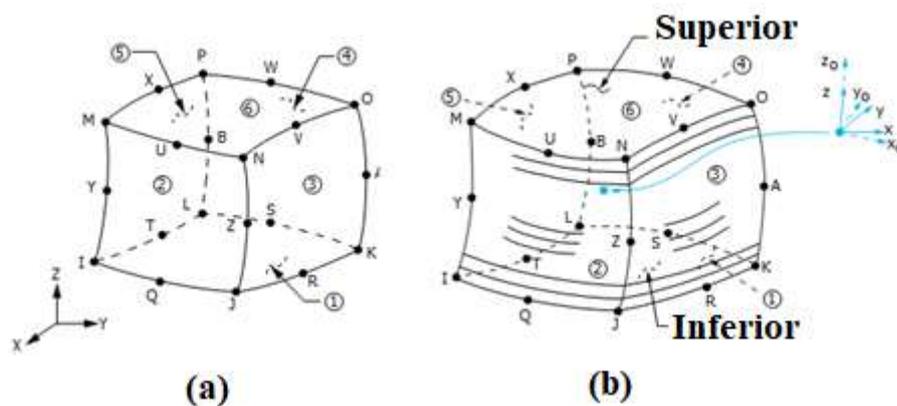


Figura 4: Representação do elemento solid186 (a) solid186-Homogêneo (camada única) e (b) solid186-Heterogêneo (em camadas). (Fonte: Ansys R19.1)

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a avaliação do desempenho estrutural de vigas de MLC reforçadas com barras de aço, foram analisadas as tensões normais máximas obtidas ao longo da altura da seção transversal posicionada no meio do vão de cada uma das vigas (MLC, MLCA-2 e MLCA-4).



3.1. Comparação entre os resultados experimentais e da modelagem

Para comparação dos resultados obtidos com a simulação e os experimentais obtidos por Soriano, Pellis and Mascia (2016), foram plotadas as curvas de tensão normal versus altura da seção transversal das peças MLC, MLCA-2 e MLCA-4 (Figura 5), para os carregamentos (P) correspondentes ao estado limite de serviço (ELS, definido pelo deslocamento vertical máximo de $2.820/200 = 14,1$ mm) dessas peças ensaiadas, ou seja, 6,57 kN, 10,23 kN e 13,98 kN. Os resultados da Figura 5 mostram que as tensões normais obtidas com as simulações foram próximas aos obtidos experimentalmente, indicando uma boa precisão do modelo de elementos finitos empregado. No caso das bordas tracionadas, região em que o reforço pode evitar a ruptura frágil das peças, as diferenças dos resultados numéricos em relação aos experimentais foram de 17%, 9,69% e 2,98%, para a MLC, MLCA-2 e MLCA-4, respectivamente.

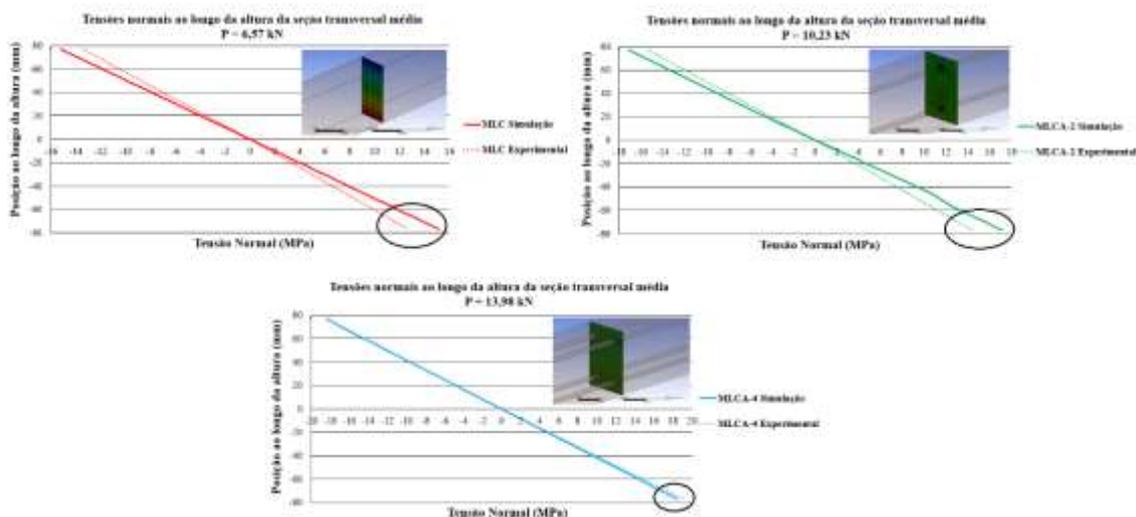


Figura 5: Tensões normais ao longo da altura da seção transversal posicionada no meio do vão das vigas sob a intensidade de carga correspondente ao ELS

Ao se associar a madeira com o aço, é esperada uma maior homogeneidade da peça, visto que, diferentemente da madeira, o aço é um material homogêneo. Essa característica das vigas compostas de MLC e aço, foi observada na comparação de tensões normais entre peças simuladas e ensaiadas, onde a maior aproximação de resultados ocorreu para a MLCA-4, que possui a maior quantidade de aço, ou seja, maior homogeneidade.



3.2. Capacidade de carga

As peças MLC, MLCA-2 e MLCA-4, quando simuladas em flexão simples e com o carregamento incremental de 0 até o valor máximo de 5 kN (valor este fixado para todas as peças e inferior aos correspondentes para o ELS) mostraram o comportamento linearizado para os resultados de tensões normais máximas nas bordas (Figura 6).

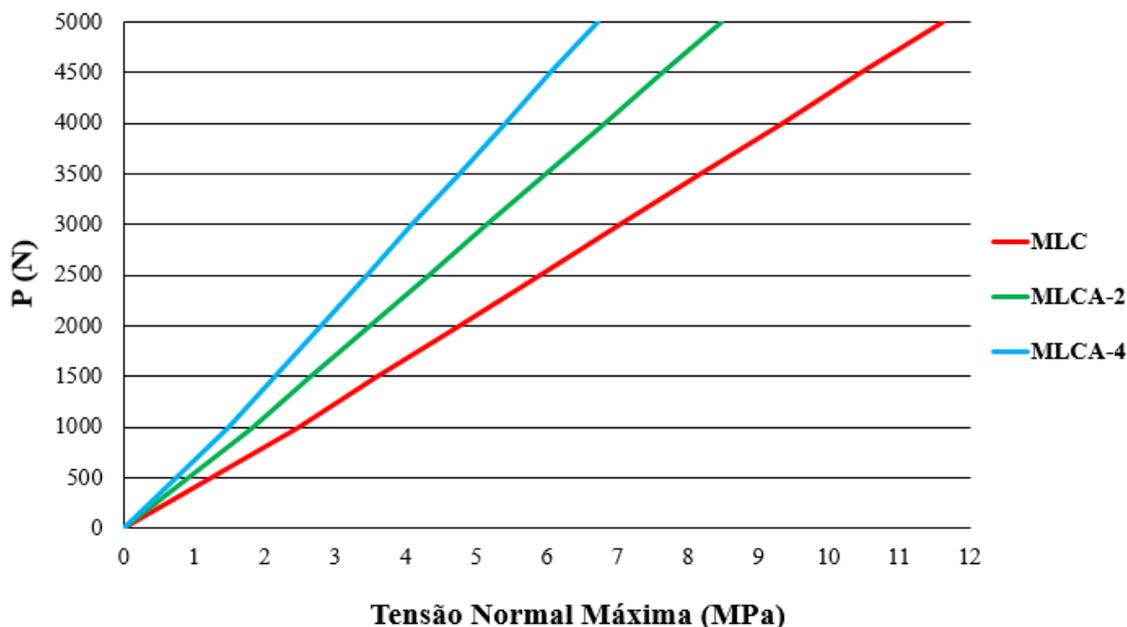


Figura 6: Carregamento incremental versus Tensão normal máxima (bordas da seção transversal posicionada na região central das vigas)

As reduções das tensões nas bordas, como mostrado na Figura 6, em relação a peça sem reforço (MLC), foram em média de 26,6 % e 41,5% para as taxas de armadura de 2% e 4%, respectivamente. Essas reduções se devem ao maior módulo de elasticidade do aço em relação a madeira.

Ao nível da posição do centro de gravidade das barras de aço, as tensões na seção transversal discretizada (Figura 7) mostram para uma mesma intensidade de carga, a redução da tensão solicitante nos elementos que representam a madeira. Para um carregamento de 5 kN essas tensões, por exemplo, na região comprimida (região indicada na Figura 7) resultaram iguais à 7,5 MPa (MLC), 5,5 MPa (MLCA-2) e 4,5 MPa (MLCA-4) e, por outro lado, as correspondentes tensões nas barras resultaram iguais à 88,7 MPa e 69,8 MPa. Esse comportamento de distribuição de tensões com valores bem distintos para a madeira e o aço ainda que posicionados numa mesma altura em relação a linha neutra (portanto, com uma mesma deformação específica) se deve a alta razão modular para esses materiais.

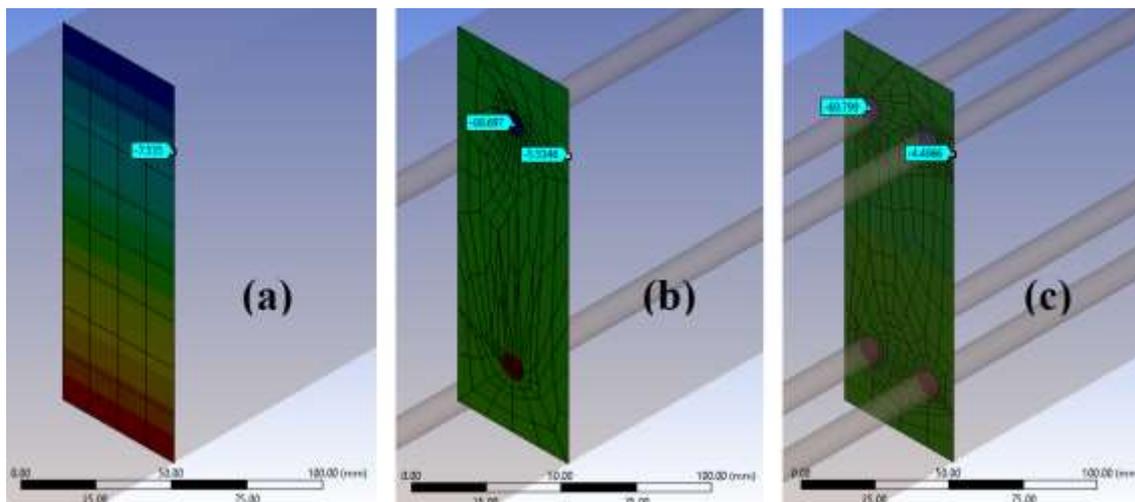


Figura 7: Tensões normais na MLC e no aço em uma mesma posição em relação a linha neutra das peças para um carregamento $P= 5\text{kN}$, (a) MLC, (b) MLCA-2 e (c) MLCA-4

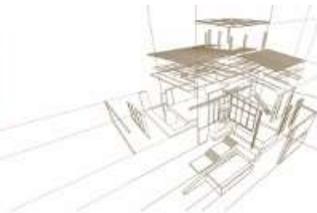
No que concerne à análise das tensões nas peças MLC, MLCA-2 e MLCA-4, evidenciou-se que ao dobrar a taxa de armadura, passando-se de 2% para 4%, tensão normal na madeira não foi reduzida pela metade. Em relação a peça de MLC, a redução da tensão normal para o carregamento de 5 kN, para a taxa de 2% foi de 3,13 MPa, enquanto para a taxa de 4% foi de 4,90 MPa. Esses resultados mostram a importância de estudos futuros com propostas metodológicas para a taxa de armadura, assim como a disposição das barras na seção transversal, de forma a se obter a maior eficiência no uso do reforço metálico.

4. CONCLUSÕES

A simulação pelo método dos elementos finitos de vigas de madeira laminada colada armada com diferentes taxas de armadura possibilitou concluir que:

- A maior taxa de armadura proporcionou uma maior aproximação dos valores das tensões obtidas com a modelagem computacional, em relação aos resultados experimentais, corroborando com o fato de que a presença da armadura (material mais homogêneo que a madeira) torna o comportamento estrutural mais previsível.
- A associação de barras de aço internamente em vigas de madeira laminada colada, que reduz as tensões normais nas partes da madeira, evidencia sob aspectos dos Estados Limites Últimos, uma maior capacidade de carregamento dessas peças reforçadas.
- Os efeitos de reduções das tensões normais em vigas de madeira laminada colada, reforçada com barras de aço, não seguem uma proporção linear com o aumento da taxa de armadura.

Com esses resultados são sugeridos novos estudos de otimização quanto ao posicionamento dos reforços, bem como da taxa de armadura para madeira laminada colada armada.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Ao apoio obtido da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (proc. 2017/18076-4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for testing and materials (2014). Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. ASTM. D198-14. Conshohocken.

ANSYS. Academic Research Mechanical - Release 19.1. ANSYS, Inc.

Associação brasileira de normas técnicas (1997). Projeto de estruturas de madeira. NBR 7190-97. Rio de Janeiro.

Buligon, E.A. et al. (2013). Propriedades físico-mecânicas de painéis de lâminas paralelas reforçadas com PRFV. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 25, n. 3, p.731-741.

D'Ambrisi, A. et al. (2013). Experimental and analytical investigation on bond between Carbon-FRCM materials and masonry. Composites Part B: Engineering v. 46, p.15-20.

De Vecchi, A. et al. (2008). Reinforced Glulam: An Innovative Building Technology. Int. Journal for Housing Science, Miami, v. 32, n. 3, p.207-211.

Fiorelli, J. and Dias, A.A. (2005). Fiberglass-reinforced Glulam Beams: Mechanical Properties and Theoretical Model. Materials Research, São Paulo, v. 9, n. 3, p.263-269.

Ghazijahani, T.G. et al. (2017). Composite Timber Beams Strengthened by Steel and CFRP. Journal of Composites for Construction, v. 21, n. 1, p.1-11.

Luca, V. and Marano, C. (2012). Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars. Construction and Building Materials, v. 30, n. 1, p.206-217.

Mascia, N.T.; Mayer, R.M. and Moraes, R.W. (2014). Analysis of Wood Laminated Beams Reinforced with Sisal Fibres, Key Engineering Materials, v. 600, p. 97-104.

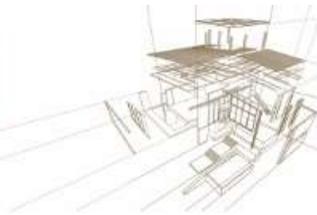
Mascia, N.T. et al. (2018). Numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced by Vectran fibers. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 359-373.

Miotto, J.L. and Dias, A.A. (2012). Evaluation of perforated steel plates as connection in glulam-concrete composite structures. Construction and Building Materials, v. 28, n. 1, p.216-223.

Negrão, J. H. (2012). Prestressing systems for timber beams. Conference. World conference on timber engineering, Auckland, July.

Pellis, B.P. (2015). Método da seção homogeneizada aplicada a vigas de madeira laminada colada armada. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

Raftery, G.M.; Harte, A.M. (2011). Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. Composites Part B: Engineering, v. 42, n. 4, p.724-735.



Soriano, J.; Pellis, B.P. and Mascia, N.T. (2016). Mechanical performance of glued-laminated timber beams symmetrically reinforced with steel bars. *Composite Structures*, v. 150, p.200-207.

Tienne, D. L. C. et al. (2011). Qualidade de adesão de juntas de madeira de pinus coladas em condições simuladas de serviço interna e externa. *Floresta e Ambiente*, Rio de Janeiro, v. 18, n.1, p.16-29.

Uzel, M. et al. (2018). Experimental investigation of flexural behavior of glulam beams reinforced with different bonding surface materials. *Construction and Building Materials*, v. 158, p.149-163.

Zhang, J. et al. (2015). Research on residual bending capacities of used wood members based on the correlation between non-destructive testing results and the mechanical properties of wood. *Journal Of Zhejiang University-science A*. Zhejiang, v.16, n.7, p. 541-550.