



## MODELAGEM COMPUTACIONAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA COMPOSTAS COM MADEIRA CLASSIFICADA

LEONARDO CARRIEL KUROWSKI<sup>1</sup>, JULIO SORIANO<sup>2</sup>, DOUGLAS LAMOUNIER FARIA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia Agrícola, UNICAMP/Campinas-SP, leo.c.kurowski@gmail.com

<sup>2</sup>Engenheiro Civil, Prof. Livre Docente, UNICAMP/Campinas-SP, julio.soriano@feagri.unicamp.br

<sup>3</sup>Engenheiro Civil, Doutorando em Eng. de Biomateriais, UFLA/Lavras-MG, douglas.lamounier@yahoo.com

**RESUMO:** A madeira lamelada colada (MLC) é um dos principais materiais engenheirados de madeira. A liberdade na construção de peças de MLC permite posicionar lamelas com propriedades mecânicas superiores nas zonas mais solicitadas. A presente pesquisa teve como objetivo avaliar os efeitos na rigidez de vigas de MLC com seções compostas por lamelas de módulos de elasticidade distintos. As vigas foram simuladas no software Ansys Academic Research Mechanical, com diferentes estratégias, sendo o uso de dois tipos de elementos finitos (Shell181 e Solid186) e quatro cenários distintos para a distribuição de lamelas na seção transversal. Da análise dos resultados das flechas e das tensões normais de flexão, concluiu-se que a melhor performance estrutural foi alcançada com as lamelas de maiores propriedades mecânicas posicionadas nos terços superior e inferior da seção transversal. Adicionalmente, não houve diferenças significativas nos resultados das modelagens com ambos os tipos de elementos finitos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Derivados da madeira, rigidez, Método dos Elementos Finitos.

**INTRODUÇÃO:** A madeira lamelada colada é um produto composto por lamelas de madeira com as fibras paralelas às camadas, que são unidas graças ao uso de adesivo estrutural e pressão aplicada durante o processo de fabricação. As espessuras recomendadas para as lamelas variam entre 25 e 50 mm (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997; PFEIL e PFEIL, 2003; CALIL NETO, 2011; SEGUNDINHO et al. 2013).

A espécies de madeira são divididas em coníferas e folhosas. No processo de fabricação de peças de MLC, não devem ser empregadas lamelas de classes botânicas diferentes (ABNT,1997; PORTEUS e KERMANI, 2007; FPL, 2010; SW, 2016). A ABNT (1997) e o seu projeto de revisão (versão 2017), apresentam as diversas classes de resistência das madeiras com suas respectivas propriedades mecânicas, tanto para coníferas quanto para folhosas.

Por ser um material engenheirado, as peças de MLC podem ser produzidas com diferentes formas e dimensões, permitindo também o posicionamento das lamelas de acordo com as solicitações que a peça estará sujeita (CALIL NETO, 2011).

O uso de softwares para a modelagem estrutural tem se mostrado essencial para o avanço tecnológico aplicado aos materiais de construção e, geralmente, baseiam-se no Método dos Elementos Finitos (MEF), como é o caso do Ansys. Pelo MEF, uma estrutura complexa é discretizada em elementos menores, simplificados e com comportamento conhecido, os quais têm

efeitos sobre a vizinhança e, com isso, o comportamento da estrutura como um todo é simulado. Também são essenciais as condições de contorno para a realização da análise estrutural.

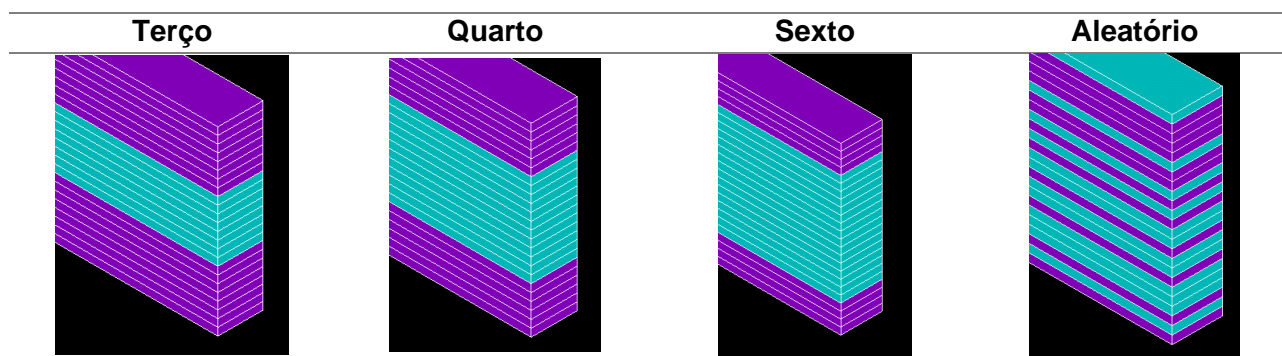
O software Ansys permite analisar os efeitos estruturais por diversos modelos de comportamento e propriedade dos materiais, tais como a isotropia e anisotropia. Para a modelagem dos produtos derivados da madeira é possível dividir um elemento em camadas às quais podem ser atribuídas propriedades distintas. Por todas as suas características, o software destaca-se como um dos mais utilizados nas diversas áreas de engenharia (MOLINA e CALIL JUNIOR, 2009).

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar os efeitos na rigidez de vigas de MLC com seções transversais compostas por lamelas de módulos de elasticidade distintos. Para tal, a simulação computacional foi empregada, tendo como principal estratégia a formação de seções transversais com camadas (lamelas), cujas propriedades mecânicas foram passíveis de modificações.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Para a realização desta pesquisa, foi utilizado o software Ansys como ferramenta de modelagem computacional. Para avaliação dos efeitos na rigidez de vigas de MLC devido a composição com lamelas de diferentes módulos de elasticidade à flexão, foram selecionadas duas classes de resistência de cada grupo botânico, seguindo a proposta de revisão da NBR 7190 (projeto - versão 2017). Ambas as classificações foram consideradas, sendo para coníferas: C20 e C50 e, para folhosas: D18 e D50.

Tanto a versão vigente da ABNT (1997) quanto o projeto de revisão recomendam o posicionamento de lamelas com maiores valores de módulo de elasticidade nos quartos superior e inferior da seção transversal da viga. As vigas foram modeladas com diferentes cenários de composição da seção transversal (Quadro 1). Também considerou-se a distribuição aleatória das lamelas, na qual foram sorteadas aleatoriamente a distribuição de 12 lamelas com a classe de resistência superior e 12 de classe de resistência inferior.

Quadro 1: Cenários utilizados na composição das seções transversais das vigas MLC.



Na fase de implementação do modelo do material para a modelagem das vigas, com base na pesquisa de Gaspar et al. (2011), a madeira foi simplificada como material isotrópico, assumindo-se para cada classe de resistência o correspondente valor do módulo de elasticidade à flexão na direção paralela às fibras (Tab. 1), o qual é determinante para o estudo dos efeitos de rigidez na viga. O coeficiente de Poisson utilizado para coníferas foi igual a 0,35 e, para folhosas, 0,37, que representam valores médios baseados em dados de FPL (2010).

Tabela 1: Módulo de elasticidade à flexão determinado para cada classe de resistência das lamelas na composição das vigas de MLC.

Classe de Resistência	Módulo de Elasticidade (MPa)
C20	10.450
C50	17.600
D18	10.450
D50	15.400

Definiu-se como dimensões das vigas: 12 m x 0,6 m x 0,15 m (comprimento x altura x largura), sendo compostas por 24 lamelas com 25 mm de espessura, respeitando-se todas as recomendações apresentadas pela ABNT 1997 (projeto de revisão - versão 2017). Para o modelo de simulação foi considerada a estática de uma viga bi apoiada com cargas aplicadas em duas pequenas áreas (0,10 m x 0,15 m), localizadas nos terços do vão da viga (Fig. 1). A modelagem foi feita com elementos do tipo Shell181 e, também, com Solid186. As cargas, então aplicadas como pressão, para todos os cenários foram iguais a 1.226.739,13 N/m<sup>2</sup> (1,23 MPa).

Figura 1 – Vista lateral de uma viga modelada.



**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Na posição central de cada viga foram obtidos os resultados dos deslocamentos verticais máximos, que são sintetizados na Tabela 2, para os correspondentes tipos de elementos finitos e da classificação botânica das lamelas. Nota-se que os resultados são inferiores à 4 cm (L/300), seguindo a recomendação do projeto de revisão da NBR 7190.

Tabela 2: Flecha para cada cenário modelado (cm).

		Aleatório	Terço	Sexto	Quarto
<b>Shell181</b>	Coníferas	2,85	2,37	2,66	2,46
	Folhosas	3,11	2,70	2,95	2,78
<b>Solid186</b>	Coníferas	2,92	2,43	2,72	2,53
	Folhosas	3,19	2,77	3,02	2,85

Para cada simulação também foram obtidas as tensões normais de flexão, cujos valores máximos são apresentados na Tabela 3. Esses valores foram obtidos nos elementos finitos posicionados na região central da viga, sendo no topo da viga os valores de compressão (negativos) e, na base, as tensões de tração (positivos).

O comparativo da eficiência da rigidez em razão do uso das lamelas classificadas para os três cenários (Terço, Sexto e Quarto), em relação ao cenário configurado com lamelas dispostas aleatoriamente, é demonstrado na Tabela 4.

Tabela 3: Máxima tensão normal de flexão para cada cenário modelado (MPa).

		<b>Aleatório</b>	<b>Terço</b>	<b>Sexto</b>	<b>Quarto</b>
<b>Shell181</b>	Coníferas	- 5,72	- 8,30	- 9,30	- 8,62
		10,35	8,30	9,30	8,62
	Folhosas	- 6,30	- 8,28	- 9,04	- 8,52
		9,80	8,28	9,04	8,52
<b>Solid186</b>	Coníferas	- 5,76	- 8,30	- 9,30	- 8,62
		10,32	8,30	9,30	8,62
	Folhosas	- 6,29	- 8,28	- 9,04	- 8,52
		9,80	8,28	9,04	8,52

O maior ganho se deu com as lamelas de maior módulo de elasticidade posicionadas nos terços extremos da seção transversal. No caso do Quarto cenário, que é sugerido no projeto de revisão da ABNT (1997), os ganhos para coníferas e folhosas foram da ordem de 13,6 e 10,6%, respectivamente.

Tabela 4: Comparativo das flechas para cada cenário em relação à distribuição aleatória das lamelas (%).

		<b>Terço</b>	<b>Sexto</b>	<b>Quarto</b>
<b>Shell181</b>	Coníferas	16,77	6,79	13,60
	Folhosas	13,17	5,16	10,58
<b>Solid186</b>	Coníferas	16,78	6,81	13,62
	Folhosas	13,19	5,19	10,61

Para os valores das máximas tensões normais, pode-se observar que houve uma pequena variação dos resultados da modelagem com os elementos do tipo Shell181 e Solid186, tendo a máxima variação alcançado 0,57%.

Notou-se que as distribuições das lamelas de forma simétrica (distribuição não aleatória) na MLC, diferentemente da distribuição aleatória, ocasionam a distribuição com valores idênticos das tensões normais na seção da viga (Tab. 3). A aleatoriedade pode levar a muitos outros resultados diferentes dos apresentados, podendo ser tanto a favor quanto contra a segurança da estrutura.

As menores tensões normais foram observadas no cenário denominado Terço, coincidindo com os menores valores de flecha. Os maiores valores foram obtidos no Sexto cenário, também coincidindo com os maiores valores de flechas. Com isso, nota-se que há uma diferença favorável ao posicionamento das lamelas de classes superiores nos terços externos da seção da viga quando comparado ao posicionamento nos quartos, conforme recomendado pela ABNT (1997). Pois, os menores valores de deslocamento vertical máximo e de solicitações apontam que uma maior capacidade de carga pode ser atribuída à estrutura.

Mediante os resultados obtidos da modelagem (Tab. 3), foram gerados os comparativos de alívios de tensões normais para os três cenários que contemplam o uso das lamelas de forma não aleatória (Tab. 5). Em relação ao caso das lamelas mais resistentes posicionadas nos sextos da seção transversal, essas lamelas se posicionadas nos terços implicam nos maiores alívios, tanto para coníferas (10,7%), quanto para folhosas (8,4%). Já, para o posicionamento das lamelas resistentes para o cenário Terço, em relação ao cenário Quarto, resultam os alívios de 3,6% e 2,9% para coníferas e folhosas, respectivamente.

Tabela 5: Comparação da tensão normal máxima entre cenários com posicionamento não aleatório das lamelas (%).

	Terço/Sexto	Quarto/Sexto	Terço/Quarto
<b>Coníferas</b>	10,69	7,33	3,63
<b>Folhosas</b>	8,44	5,74	2,86

**CONCLUSÕES:** A análise dos resultados permitiu concluir que, do ponto de vista da rigidez, o cenário com a distribuição de lamelas com maiores propriedades mecânicas alocadas nos terços de topo e de base da viga mostrou-se o mais eficiente. Este cenário, em relação ao caso de distribuição aleatória estudado, resultou numa redução das flechas da ordem de 16,8% e 13,2%, para coníferas e para folhosas, respectivamente. A distribuição das lamelas segundo o cenário Terço, para um carregamento comum a todos os cenários, resultou nas menores solicitações das tensões normais de flexão, sendo, portanto, o cenário mais favorável na verificação do correspondente Estado Limite Último. Os tipos de elementos Shell181 e Solid186 não apresentaram grandes diferenças para os resultados das flechas e das tensões normais.

**AGRADECIMENTOS:** Ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (proc. 2017/18076-4), pela aquisição da licença do software Ansys Academic Research Mechanical.

#### REFERÊNCIAS:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190:** Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

CALIL NETO, C. **Madeira Laminada Colada (MLC):** Controle de qualidade em Combinações Espécie – Adesivo – Tratamento Químico. 125p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo; São Carlos, 2011.

FOREST PRODUCTS LABORATORY – FPL. **Wood Handbook:** Wood As An Engineering Material. Madison, Wisconsin. 2010.

GASPAR, F.; CRUZ, H.; GOMES, A. Predicting delamination influence on the mechanical performance of straight glued laminated timber beams. **International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures**, Lisbon, Portugal, 2011.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Estratégia para modelagem numérica de sistemas mistos considerando diferentes modelos de ruptura para materiais. **Revista Chilena de Ingeniería**. v.17, n.2, p. 256-266, 2009.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PORTEOUS, J.; KERMANI, A. **Structural Timber Design to Eurocode 5**. Napier University, Edinburgh. 2007.

SEGUNDINHO, P. G. A.; *et al.* Avaliação do módulo de elasticidade de peças de madeira laminada colada (MLC) obtido por meio do ensaio de vibração transversal. **Ambiente Construído**, v.13, n.2, p.7-14, 2013.

SWEDISH FOREST INDUSTRIES FEDERATION – SWEDISH WOOD – SW. **Design Of Timber Structures:** Structural aspects of timber construction. v.1. ed.2. 2016.