

## ANÁLISE NUMÉRICA DA INSTABILIDADE LATERAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA (MLC)

José Carlos Gomes Filho<sup>1</sup>, Elvídio Gavassoni Neto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba/PR, Brasil.

\* e-mail do autor correspondente: [josecarlosgf@ufpr.br](mailto:josecarlosgf@ufpr.br), [josecarlosgf@gmail.com](mailto:josecarlosgf@gmail.com)

**Resumo:** Este trabalho tem como objetivo avaliar numericamente o efeito da instabilidade lateral por flexo-torção em vigas biapoiadas de Madeira Lamelada Colada solicitadas por um momento fletor constante. Foram desenvolvidos três modelos numéricos (maciço isotrópico, maciço ortotrópico e lamelas de madeira ortotrópica ligadas por adesivo coesivo) utilizando o software *Abaqus*. Com esses modelos foi possível a obtenção dos valores de momento crítico em análise linear e não linear. Os resultados numéricos da solução linear foram então comparados com os valores analíticos obtidos pela formulação clássica de instabilidade em vigas esbeltas. O uso da análise não-linear permite a avaliação da sensibilidade a imperfeições geométricas. Os momentos críticos observados para o problema imperfeito tiveram consideráveis variações em relação à formulação linear, indicando que para alguns valores de esbeltez a linearidade pode levar a resultados não satisfatórios.

**Palavras-chave:** flambagem lateral, imperfeições geométricas, análise não-linear

### NUMERICAL ANALYSIS OF A LATERAL-TORSIONAL BUCKLING ON GLULAM BEAMS

**Abstract:** This study proposes a numerical simulation of a lateral-torsional buckling effect in simply supported glulam beams subjected to a constant bending. It was developed three numerical models (isotropic massive, orthotropic massive and timber laminations bonded by cohesive adhesive) using the *Abaqus* software to obtain the critical load values. The numerical results present small differences when compared to those obtained by using the classical formulation of lateral-torsional buckling on the slender beams studied here. These numerical models allow a non-linear analysis to obtain the sensibility for geometric imperfections, who results on a rage until 70% of critical load when compared to the linear results.

**Keywords:** lateral-torsional buckling, geometric imperfections, non-linear analysis

## 1. INTRODUÇÃO

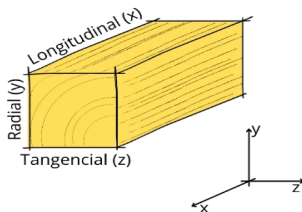
O uso da madeira como elemento estrutural vem ganhando espaço cada vez maior na construção civil, com destaque ao uso da Madeira Lamelada Colada (MLC), elemento que permite a execução de grandes vãos e de geometria esbelta e variada, características que a madeira serrada maciça não alcança [1]. Em vigas esbeltas de madeira, pode-se ocorrer o efeito da flambagem lateral, uma forma de instabilidade envolvendo flexão e torção [2]. O objetivo deste trabalho é avaliar numericamente o efeito da instabilidade lateral por flexo-torção em uma viga de MLC solicitada por um momento fletor constante ao longo do seu comprimento.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo é sobre uma viga biapoiada em MLC, com 400 cm, 20 cm e 4cm de comprimento, altura e largura respectivamente, composta por 5 lamelas de madeira com 4 cm de largura e 4 cm de altura cada e coladas com adesivo, totalizando 20 cm de altura. Os modelos numéricos são desenvolvidos utilizando-se o *software* Abaqus. A madeira é modelada com o uso de elementos do tipo C3D20R [3], e as camadas de adesivo são modeladas utilizando-se elementos coesivos com 8 nós do tipo COH3D8 [3]. A madeira a ser considerada é o Eucalipto (*Eucalyptus Grandis*), com propriedades consultadas em [4]. Para o modelo isotrópico, serão considerados o Módulo de Elasticidade no sentido longitudinal e o Coeficiente de Poisson na direção longitudinal – radial. Já para o material coesivo foram consideradas as propriedades consultadas em [5]. As propriedades mecânicas estão dispostas na Tabela 1. Para o modelo das condições de contorno consistentes com a condição biapoiada da viga considerou-se e . As vigas serão solicitadas por um momento fletor constante em toda sua extensão.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos materiais

Madeira <i>Eucalyptus Grandis</i>		
x = l (longitudinal); y = r (radial); z = t (tangencial)		
Módulo de Elasticidade	Coeficiente de Poisson	Módulo de Elasticidade Transversal
Adesivo		
Tensão normal resistente	Tensões de cisalhamento	Rigidez na direção normal e tangencial ao adesivo
Deslocamento lim. p/ falha	Coeficiente de viscosidade	



O Modelo 1 consiste em uma viga maciça de madeira com material isotrópico. Já o Modelo 2 consiste em uma viga maciça de madeira com material ortotrópico, e o Modelo 3 consiste em lamelas de madeira maciça com características ortotrópicas ligadas entre si através de uma camada de adesivo com características coesivas com 0,1 mm de espessura, conforme Figura 1. O valor do momento crítico,  $M_{cr}$ , é determinado utilizando-se de uma análise linear para obtenção dos autovalores e autovetores referentes ao problema de instabilidade (respectivamente as cargas críticas e os modos de flambagem). Os resultados são comparados com aqueles obtidos pela aplicação da formulação de Timoshenko. (1953) [6], que determina  $M_{cr}$  pela expressão:

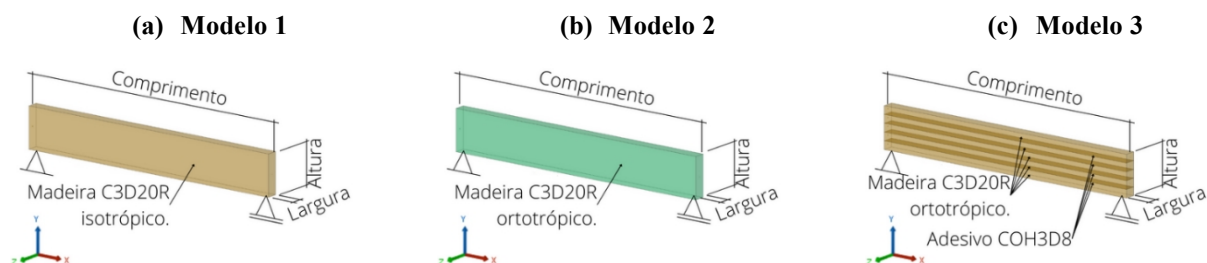
$$(1)$$

Em que:

- = momento fletor crítico
- = rigidez à flexão referente ao eixo vertical da seção transversal
- = rigidez torcional
- = comprimento da viga

Já o efeito das imperfeições será avaliado através de uma análise não-linear no Modelo 3, considerando como o desvio lateral (imperfeições geométricas) imposto os valores de 0,2%, 0,4% e 0,6% do comprimento da viga.

Figura 1 – Modelos de análise: a) Modelo 1- maciço isotrópico; b) Modelo 2 – maciço ortotrópico; e c) Modelo 3 -lamelas maciças ortotrópicas ligadas por adesivo



Fonte: O Autor (2022)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores do primeiro momento  $M_{cr}$  e os valores referentes a análise não linear são apresentados na Tabela 2. A variação entre resultados e a formulação clássica não é significativa, apresentando

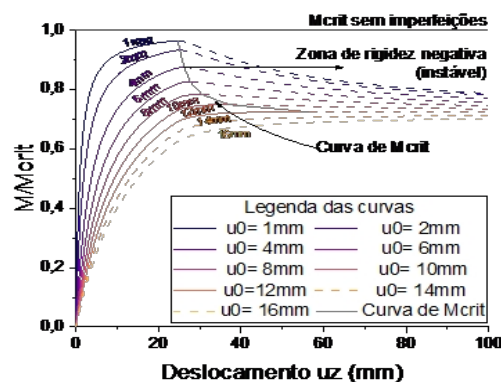
valores de 2,40%, 2,00% e 1,02% respectivamente aos Modelos 1, 2 e 3.

Tabela 2 – Valores de

Análise linear		
Modelo		Diferença
Analítico	12.124.704,29 Nmm	--
Modelo 1	12.416.160,00 Nmm	2,40%
Modelo 2	12.366.970,00 Nmm	2,00%
Modelo 3	12.248.060,00 Nmm	1,02%
Análise não-linear		
Imperfeição/ % de	Imperfeição/ % de	Imperfeição/ % de
1mm / 96,24%	6mm/ 82,36%	12mm/ 72,33%
2mm/ 93,08%	8mm/ 78,15%	14mm/ --
4mm/ 87,34%	10mm/ 74,76%	16mm/ --

O efeito causado pela imperfeição geométrica é mostrado graficamente na Figura 2. Nota-se que para imperfeições de até 12mm a viga apresenta um ganho de rigidez (região estável), em que deixa de ser um ponto de bifurcação para um ponto de derivada nula, com valores apresentado na Tabela 2. Após o modelo apresenta instabilidade, a partir da região de rigidez negativa. Já para as imperfeições de 14mm e 16mm a viga apresenta situação instável. Nota-se o amolecimento do modelo, com o a viga apresentando deformações laterais significativas a partir de 40% do valor de .

Figura 2 - Caminho crítico de instabilidade



Fonte: Do Autor (2022)

#### 4. CONCLUSÕES

A simplificação do modelo numérico de uma viga em MLC para uma seção maciça e com características isotrópicas é válida no caso da análise linear de vigas, já que tanto a característica ortotrópica do material quanto o adesivo entre lamelas não interferem significativamente nos valores de carga crítica. A diferença entre os resultados obtidos nos Modelos 1, 2 e 3 são próximos

aos obtidos através da formulação clássica de Timoshenko. A existência de imperfeições geométricas no meio do vão reduz significativamente a carga crítica, com aumento no deslocamento lateral da viga a partir de 40% do valor da carga crítica e a ocorrência de instabilidade após atingido tal valor. A análise elástica realizada desconsiderou os eventuais limites de ruptura do material, portanto é possível que a situação imperfeita leve ao colapso da viga antes de atingido o valor de .

## 5. REFERÊNCIAS

- [1] Leite, Thaisa M.; Santos, Pedro A F M.; Valle, Ivan M.R. do. O uso da Madeira Laminada Colada no Brasil: panorama e desafios. In: Congresso Latinoamericano de Estruturas de Madeira, 2., 2017, Junin. Anais [...] . Junin: Clem, 2017. v. 1, p. 1-12.
- [2] Pfeil, Walter. Pfeil, Michèle. Estruturas de madeira: dimensionamento segundo a Norma Brasileira NBR 7190/97 e critérios das Normas Norte-americana NDS e Européia Eurocode 5. 6ª edição. Rio de Janeiro. Ed. LTC, 2003
- [3] Dassault Systèmes Simulia Corp. Abaqus 6.11 Theory Manual. 2011. Providence, EUA. 2011.
- [4] Abrantes, Celso A. Determinação da carga crítica de instabilidade lateral no regime linear elástico, em vigas de madeira laminada colada (MLC). 2012. 220 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- [5] Azinovic, Boris; Danielsson, Henrik; Serrano, Erik; Kramar, Miha. Glued-in rods in cross laminated timber – Numerical simulations and parametric studies. Construction and Building Materials, vol 212. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.331>. 2019.
- [6] Timoshenko, Stephen P.; Gere, James M. Theory of elastic stability. 2ª edição. Nova York. Ed. McGraw-Hill, 1963.