
ESTUDO NUMÉRICO- -EXPERIMENTAL SOBRE A FLAMBAGEM LATERAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC)¹

Alfonso Pappalardo Junior

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Resumo

Este trabalho aborda o estudo numérico-experimental sobre o comportamento de elementos estruturais de madeira laminada colada (MLC) sujeitos à instabilidade lateral. É proposta uma fórmula, adaptada da Teoria da Estabilidade Elástica, para a avaliação expedita das distâncias mínimas de travamento lateral de vigas de MLC para atender a requisitos de segurança estrutural, considerando-se as imperfeições geométricas, a excentricidade do carregamento, o comportamento ortotrópico dos materiais e os efeitos de interface. A identificação do fenômeno da instabilidade lateral é obtida experimentalmente em vigas de seção retangular com razão de aspecto igual a cinco. A partir das evidências experimentais, são desenvolvidos modelos matemáticos pelo método dos elementos finitos para a validação das propriedades elásticas do material compósito laminado.

Palavras-chave: Madeira laminada colada. Flambagem lateral. Método dos elementos finitos.

¹ O autor agradece ao Fundo Mackenzie de Pesquisa (Mackpesquisa), à empresa CG Sistemas Construtivos e aos funcionários do Laboratório de Ensaios de Materiais e do Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM).

1 INTRODUÇÃO

Elementos estruturais de madeira de reflorestamento, considerados recursos renováveis, ganharam uma importância estratégica neste novo milênio. O avanço das áreas de reflorestamento provocado pelo aumento do consumo mundial da madeira como material de construção leva à necessidade de desenvolver produtos alternativos em substituição à madeira serrada. A tecnologia da madeira laminada colada (MLC) parte do princípio da solidarização de pequenas peças de madeira, certificadas e sem valor comercial, por meio de adesivos especiais compondo elementos estruturais com as mais variadas formas e dimensões, cobrindo das vigas convencionais de seção retangular e eixo reto às superfícies com dupla curvatura e inércia variável. A cobertura em MLC de bambu do Terminal T4 do Aeroporto de Barajas em Madri, mostrada na Figura 1, é um exemplo da liberdade de forma que se pode alcançar. A possibilidade de se obter vigas curvas, aliando-se plasticidade e beleza e a eficiência estrutural com esforços de flexão reduzidos devido ao efeito de arco. Pode-se maximizar as relações resistência/peso e rigidez/peso com o emprego racional de lâminas com propriedades mecânicas superiores em regiões de maior sollicitação, como as seções transversais do tipo I com relação altura/largura elevada. Na classificação e na seleção das lâminas de madeira serrada, são aproveitadas apenas as partes que não apresentam defeitos naturais, tais como nós, fendas, gretas, abaulamentos, fibras reversas, furos de larvas, bolor e apodrecimento.



Figura 1 Aeroporto de Barajas (Madri, Espanha)

Fonte: Acervo do autor.

Os avanços tecnológicos na indústria de adesivos de alto desempenho, observados a partir da década de 1960, incrementaram a produção em larga escala de produtos de MLC de grande confiabilidade para o uso estrutural. Os principais tipos de adesivos utilizados em MLC são a resorcina fenol formaldeído (RFF), a melamina ureia formaldeído (MUF) e o poliuretano (PUR).

As coberturas para grandes vãos, entre as aplicações em MLC, são as estruturas mais surpreendentes e notáveis. Destacam-se pela simplicidade, pela adaptabilidade, pela flexibilidade, pela leveza e pela durabilidade. A cobertura do ginásio poliesportivo de Richmond, mostrada na Figura 2, teve destaque nos Jogos Olímpicos de Inverno de 2010, em Vancouver, Canadá, sendo considerada uma das mais belas estruturas de cobertura em MLC do mundo.



Figura 2 Cobertura em MLC (Vancouver, Canadá)

Fonte: Rawlinson (2008).

Para aumentar o comprimento das peças produzidas com MLC, é imprescindível a presença de emendas, dispostas ao longo do comprimento em todas as lâminas, tomando-se o cuidado de não concentrá-las dentro de um trecho longitudinal igual à altura da viga (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997). As emendas dentadas do tipo *finger-joints* são largamente utilizadas na fabricação de MLC e permitem a reconstituição praticamente integral da capacidade resistente do conjunto (PARRA, 2009).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, é apresentada a formulação pioneira de Stephen P. Timoshenko (1936) sobre flambagem lateral-torcional de vigas maciças, homogêneas e de comportamento

isotrópico, representada por um modelo unidimensional idealizado. Neste trabalho, pretende-se adaptar essa teoria clássica às vigas ortotrópicas de MLC com imperfeições, tendo como base os resultados das análises numéricas e experimentais.

2.1 Teoria da estabilidade elástica de vigas

Consideremos uma viga simplesmente apoiada com travamentos laterais na extremidade, composta por um material elástico-linear de comportamento isotrópico, suportando uma força concentrada P aplicada no meio do vão com uma excentricidade vertical a . A flambagem lateral ocorre quando a carga P atinge o valor da carga crítica dada pela seguinte expressão (TIMOSHENKO, 1936).

$$P^{cr} = \frac{16,93 \sqrt{EI \cdot GL}}{L^2} \left(1 - \frac{3,48a}{L} \sqrt{\frac{EI}{GJ}} \right) \tag{1}$$

em que EI é a rigidez à flexão (igual a $Ehb^3/12$, para flexão lateral, sendo h a altura e b a largura da viga), GJ é a rigidez à torção, L é o comprimento da viga e a é a distância vertical do centroide da seção até o ponto de aplicação da carga, mostrada na Figura 3.

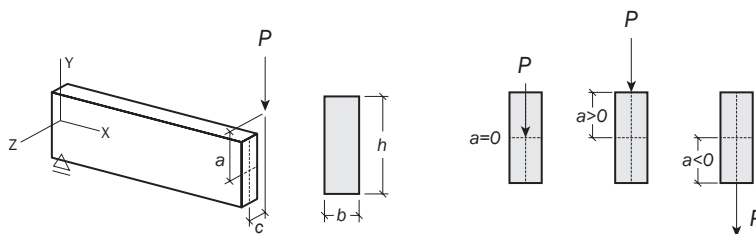


Figura 3 Excentricidades horizontal e vertical do ponto de aplicação da carga

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o cálculo da rigidez à torção da seção retangular, pode-se utilizar o momento de inércia à torção dado pela fórmula aproximada:

$$J = hb^3 \left[\frac{1}{3} - \frac{0,21b}{h} \left(1 - \frac{b^4}{12h^4} \right) \right] \tag{2}$$

No caso de um carregamento uniformemente distribuído q aplicado ao longo do eixo longitudinal da viga, mostrado na Figura 4, a expressão para o cálculo da carga crítica de flambagem lateral é dada pela expressão (TIMOSHENKO, 1936):

$$q^{cr} = \frac{28,3 \sqrt{EI \cdot GL}}{L^3} \left(1 - \frac{3,48a}{L} \sqrt{\frac{EI}{GJ}} \right) \tag{3}$$

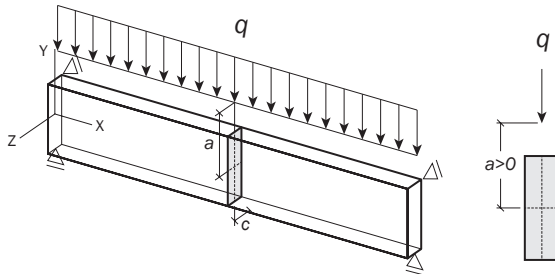


Figura 4 Esquema estático da viga simplesmente apoiada sujeita ao carregamento uniforme q com seção transversal retangular

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2 Materiais ortotrópicos

No caso da MLC, o comportamento elástico-linear pode ser representado por um material ortotrópico. As equações constitutivas para materiais ortotrópicos que permitem relacionar as componentes do tensor das tensões com as componentes do tensor das deformações são dadas pela expressão matricial:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} = \mathbf{S} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & G_{12} & 0 & 0 \\ & & & & G_{23} & 0 \\ & & & & & G_{31} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{bmatrix} \quad (4)$$

em que E_i é o módulo de elasticidade longitudinal, nas três direções principais do material, ν_{ij} e G_{ij} são, respectivamente, o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade transversal, nos três planos principais ortogonais do material.

As relações matemáticas:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad \text{e} \quad G_{ij} = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \nu_{ij})}$$

levam à simetria da matriz elástica constitutiva, apresentada na Equação (4), permitindo que seja representado o material elástico-linear de comportamento ortotrópico por seis parâmetros.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental consiste na obtenção das cargas críticas de flambagem lateral de vigas simplesmente apoiadas de MLC com três metros de comprimento e travadas lateralmente nas extremidades (Figura 5). Foram ensaiadas seis vigas com uma série de pequenos defeitos naturais e emendas decorrentes do próprio processo de fabricação.

3.1 Ensaio de flambagem lateral

As vigas de MLC de seção transversal retangular têm 40 mm de largura por 192 mm de altura, composta por seis lâminas de 32 mm. A madeira utilizada é o *Eucalyptus grandis*, classificada como de reflorestamento (ABRANTES, 2012).



Figura 5 Ensaio de flambagem lateral da viga de MLC de seção transversal retangular de 40 mm x 192 mm

Fonte: Abrantes (2012).

Uma grande dispersão de resultados foi observada e pode ser justificada pela perceptível diferença de qualidade do produto manufacturado. A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios realizados.

TABELA 1

Resultados experimentais da carga crítica de flambagem e da carga última

GRUPO	$P_{cr,lab}$ (N)	$P_{ult,lab}$ (N)
40 x 192 mm	2000	10000
	4000	22000
	2000	17600
	5000	23000

Fonte: Abrantes (2012).

3.2 Ensaios de cisalhamento na interface das lâminas

A resistência ao cisalhamento na interface lâmina de madeira-adesivo é obtida, experimentalmente, com base nas prescrições da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1997). A máxima tensão de cisalhamento atuante na lâmina de cola de um corpo de prova prismático é dada por:

$$f_{gv} = \frac{F_{v0,m\acute{a}x}}{A_{gv,0}}$$

em que $F_{v0,m\acute{a}x}$ é a força cisalhante máxima aplicada no corpo de prova, e $A_{gv,0}$ é a área de cola em um plano paralelo às fibras do corpo de prova padrão (Figura 6).

O programa experimental consiste no ensaio ao cisalhamento de doze peças, sendo seis com interface colada e as outras seis maciças, esquematizadas na Figura 6. Para a caracterização das propriedades da interface colada, deve-se excluir a deformação da madeira. Para tanto, são utilizados corpos de prova de referência, com as mesmas dimensões e feitos de madeira maciça. Os corpos de prova foram armazenados em ambiente não exposto à radiação solar com umidade controlada de 12% (valor médio).

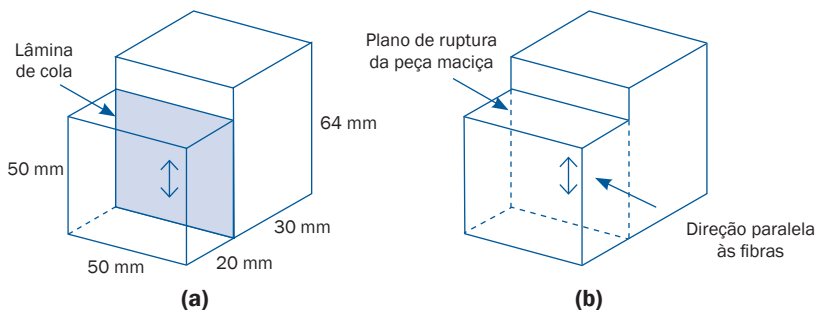


Figura 6 Corpos de prova para ensaio de cisalhamento na direção paralela às fibras (a) interface com lâmina de cola e (b) interface maciça

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados da resistência e da rigidez ao cisalhamento na lâmina de cola, na direção paralela às fibras, foram apresentados em seus valores característicos. A Figura 7 mostra a ruína de um corpo de prova no ensaio de cisalhamento na lâmina de cola.



Figura 7 Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola

Fonte: Pappalardo Junior et al. (2013).

A Figura 8 apresenta os resultados dos ensaios após dois ciclos de carga e descarga, conforme especificado pela ABNT (1997). Os corpos de prova de madeira maciça apresentaram, em média, uma resistência 20% superior com relação à resistência dos corpos de prova de MLC com tempo de cura de 48 horas. Foram utilizados dois sensores LVDT, um em cada porção do corpo de prova, e uma célula de carga de 20 kN. Adotando-se a resistência característica última ao cisalhamento na lâmina de cola igual a 4 MPa (referência), obtida experimentalmente conforme mostra a Figura 8, chega-se ao deslocamento relativo vertical de 1,22 mm, para o corpo de prova de madeira maciça, e 1,36 mm, para o corpo de prova de madeira colada. Excluindo-se a deformação da madeira, o deslocamento relativo vertical entre dois pontos adjacentes na interface colada vale 0,14 mm. Esse deslocamento será utilizado no modelo de elementos finitos para a descrição da relação aderência-eskorregamento interlaminar.

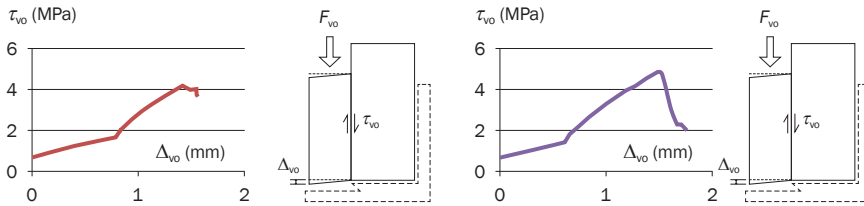


Figura 8 Relação entre a tensão de cisalhamento característica e o deslocamento vertical relativo para os corpos de prova com interface colada e madeira maciça

Fonte: Elaborada pelo autor.

4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Nesta seção, é apresentado o modelo de elementos finitos da viga para as análises de flambagem e geometricamente não linear. A análise de flambagem permite a obtenção das cargas críticas de flambagem e seus modos associados (problema de autovalores e autovetores), enquanto a análise não linear geométrica torna possível a obtenção das trajetórias de equilíbrio (estável e instável) e do ponto de bifurcação do equilíbrio. Esta segunda é uma abordagem mais precisa, que fornece as informações necessárias para projetos de estruturas de MLC (por exemplo: tensões e deslocamentos).

4.1 Descrição do modelo de elementos finitos

Dois tipos de elementos finitos são utilizados: o sólido hexaédrico (3-D) e o de interface (1-D). Na Figura 9, são apresentadas as propriedades elásticas ortotrópicas do material das lâminas de madeira e, na Figura 10, as propriedades elásticas do material da interface.

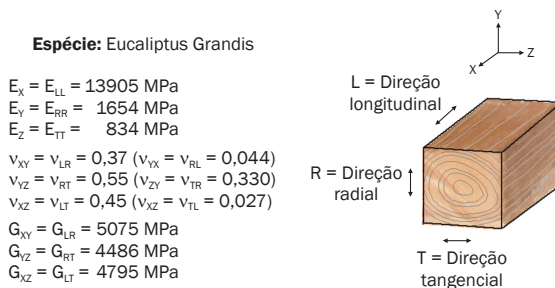


Figura 9 Propriedades elásticas ortotrópicas da madeira

Fonte: Abrantes (2005).

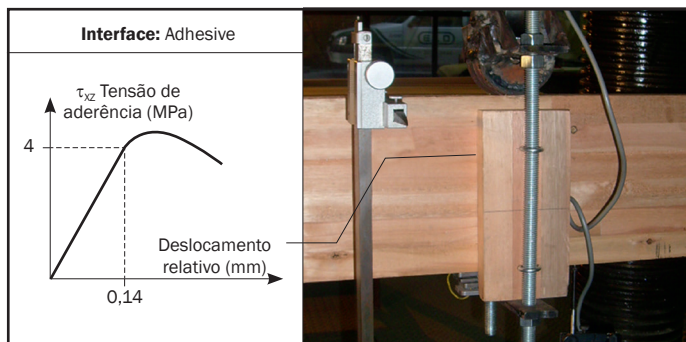


Figura 10 Relação aderência-escorregamento do elemento de interface com dois nós e de comportamento elástico-linear

Fonte: Pappalardo Junior et al. (2012).

As condições de contorno e de carregamento da viga estão apresentadas na Figura 11. A aplicação da carga é feita indiretamente com deslocamento vertical dos pontos de apoio.

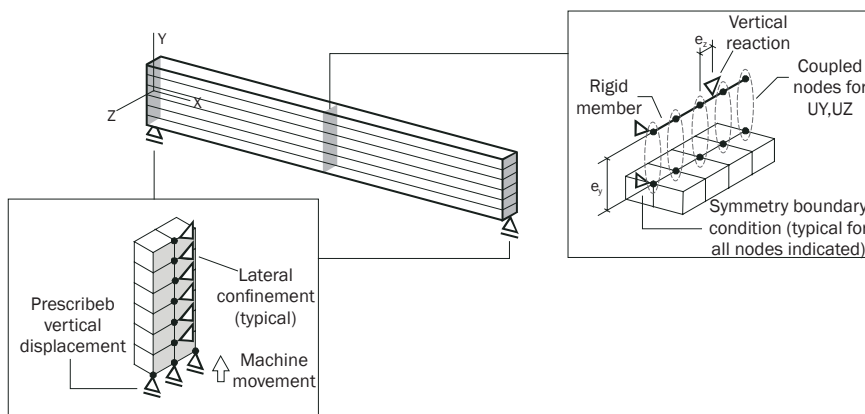


Figura 11 Condições de contorno e deslocamento imposto nos apoios

Fonte: Pappalardo Junior et al. (2012).

4.2 Análise de flambagem elástica

A análise de flambagem de uma estrutura com múltiplos graus de liberdade corresponde ao problema de autovalores e autovetores dado pela equação matricial:

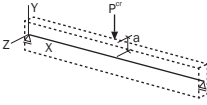
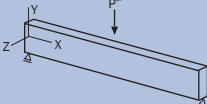
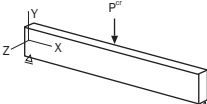
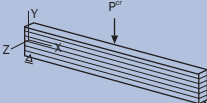
$$(K + \lambda \cdot S) \cdot U = 0 \quad (5)$$

em que K é a matriz de rigidez da estrutura, S é a matriz de rigidez geométrica, λ é o fator de carga (autovalor) e U é o vetor deslocamento associado ao modo de flambagem (autovetor).

Considera-se, na análise de flambagem, que o material seja elástico e ortotrópico, cujas fibras da madeira estejam orientadas na direção do eixo da viga. O algoritmo de solução adotado para a solução da Equação (5) é o método dos subespaços. Os resultados teóricos da Teoria da Estabilidade Elástica (TIMOSHENKO, 1936) e os numéricos do modelo de elementos finitos são sumarizados no Quadro 1.

QUADRO 1

Resultados numéricos (modelo 3-D) e teóricos (modelo 1-D)
para a carga concentrada aplicada no meio do vão

Modelo esquemático	Hipóteses teóricas	Dimensões	Carga crítica
	1-D/Isotrópico/monolítico Teoria da estabilidade elástica de Timoshenko considerando o ponto de aplicação da carga acima do centroide equação (1)	40 mm x 192 mm	25047 N
	3-D/Isotrópico/monolítico Análise de flambagem elástica com a formulação do método dos elementos finitos com modelos da mecânica do contínuo	40 mm x 192 mm	27002 N
	3-D/Ortotrópico/monolítico Análise de flambagem elástica com a formulação do método dos elementos finitos com modelos da mecânica do contínuo	40 mm x 192 mm	26322 N
	3-D/Ortotrópico/laminado Análise de flambagem elástica com a formulação do método dos elementos de interface (compósito)	40 mm x 192 mm	22737 N

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considera-se para a formulação analítica, correspondente à Equação (1), os seguintes parâmetros: módulo de elasticidade longitudinal $E = 12813$ MPa, módulo de elasticidade transversal $G = 4676$, MPa e excentricidade vertical $a = 192/2 = 96$ mm. No entanto, para a obtenção dos resultados numéricos foram assumidas as propriedades apresentadas nas Figuras 9 e 10. A Figura 12 mostra o primeiro modo de flambagem lateral do modelo de elementos finitos da viga de MLC, considerando-se a relação linear entre as tensões de cisalhamento e deslocamento relativo nas interfaces das lâminas.

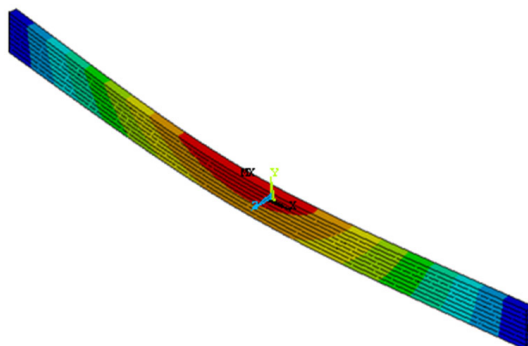


Figura 12 Flambagem lateral do modelo de elementos finitos

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Análise não linear geométrica

A análise não linear geométrica de uma estrutura com múltiplos graus de liberdade é obtida por meio da solução da equação matricial:

$$K_T(U)\Delta U = \Delta F \quad (6)$$

em que K_T é a matriz de rigidez tangente (dependente do campo dos deslocamentos), ΔU é o vetor deslocamento incremental e ΔF é o vetor força desbalanceada.

Para a obtenção dos resultados da análise não linear geométrica, apresentados no Gráfico 1, utiliza-se a formulação lagrangeana, com atualização da geometria em cada interação de Newton-Raphson.

Observa-se que os resultados experimentais exibidos na Tabela 1 são significativamente inferiores aos resultados analíticos e numéricos apresentados no Quadro 1. Para a calibração do modelo de elementos finitos, considera-se uma excentricidade lateral fictícia do ponto de aplicação da carga de modo a representar as imperfeições físicas (defeitos naturais) e geométricas (empenamento) da viga de MLC.

A linha tracejada horizontal apresentada na Figura 13 corresponde ao resultado da análise numérica de flambagem linear (Modelo 4 – Quadro 1). Pode-se observar que esse valor corresponde ao limite superior da teoria não linear geométrica. Na mesma figura, são mostradas as trajetórias de equilíbrio em função da excentricidade horizontal do ponto de aplicação da carga. Observa-se que quanto maior a excentricidade lateral menor é a sua capacidade portante. As curvas tracejadas indicam que o limite de resistência à compressão foi atingido após a instabilidade da peça, sendo comum, para as vigas analisadas, que a instabilidade lateral preceda a ruína por esmagamento das fibras.

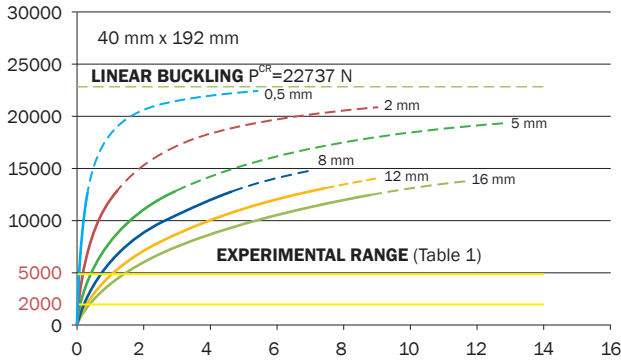


Gráfico 1 Carga vertical versus deslocamento lateral para vigas de MLC variando-se a excentricidade horizontal

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Influência do número de lâminas

Para verificar a influência do número de lâminas ao longo da altura da seção transversal da viga de MLC na carga crítica de flambagem lateral, utiliza-se um modelo de elementos finitos calibrado de uma viga em balanço de um metro de vão com seção transversal retangular de 40 mm por 200 mm com distintas configurações de lâminas ao longo da altura. Para este estudo, foram realizadas as duas análises descritas nas seções 4.2 e 4.3, sendo a primeira mais conservadora, que corresponde ao limite superior da Teoria da Estabilidade Elástica.

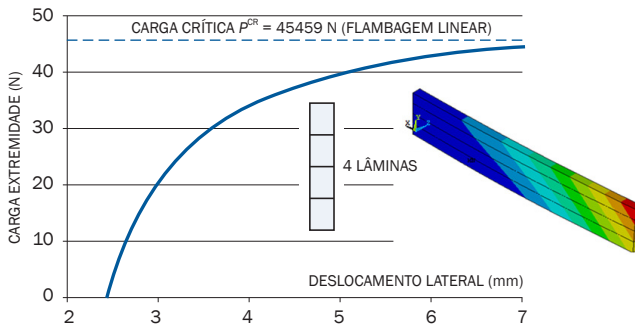


Gráfico 2 Deslocamento lateral do ponto da fibra superior da seção transversal da extremidade livre em função da carga vertical para a viga de quatro lâminas de 50 mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

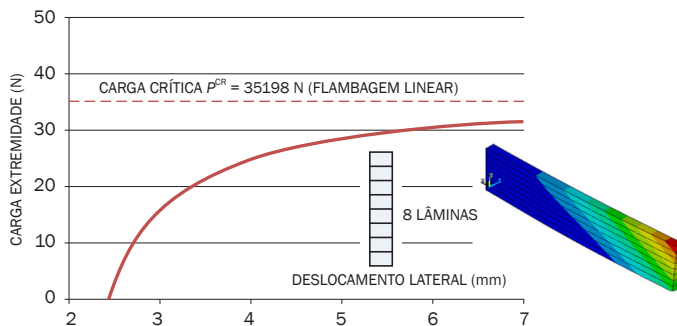


Gráfico 3 Deslocamento lateral do ponto da fibra superior da seção transversal da extremidade livre em função da carga vertical para a viga de oito lâminas de 25 mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

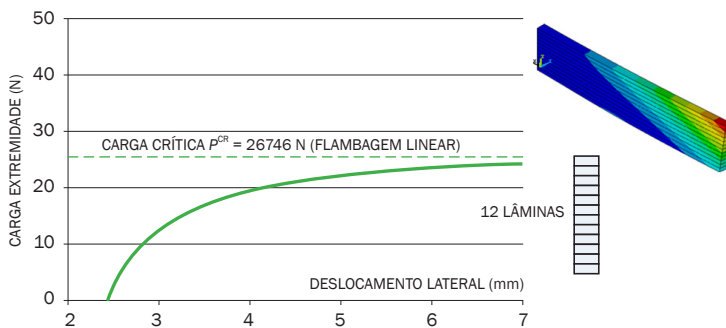


Gráfico 4 Deslocamento lateral do ponto da fibra superior da seção transversal da extremidade livre em função da carga vertical para a viga de 12 lâminas de 16,7 mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

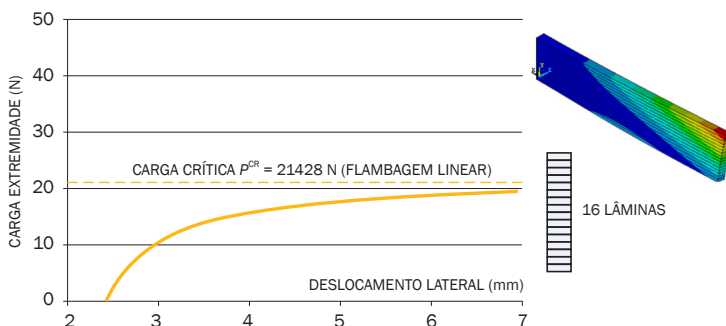


Gráfico 5 Deslocamento lateral do ponto da fibra superior da seção transversal da extremidade livre em função da carga vertical para a viga de 16 lâminas de 12,5 mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

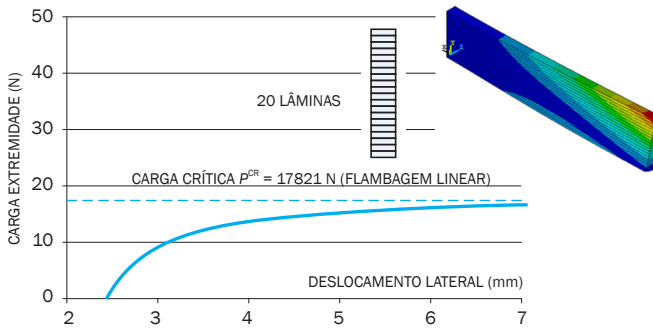


Gráfico 6 Deslocamento lateral do ponto da fibra superior da seção transversal da extremidade livre em função da carga vertical para a viga de 20 lâminas de 10 mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

O estudo da influência no número de lâminas da viga de MLC no ponto limite de instabilidade, cujos resultados são mostrados nos gráficos de 2 a 6, permite afirmar que o aumento do número de interfaces diminui a rigidez torcional da viga de MLC, levando à diminuição da capacidade de sustentação de cargas verticais. Deve-se observar que esse comportamento depende da rigidez da interface colada e não da resistência, uma vez que a instabilidade antecede o esgotamento da capacidade resistente.

5 APLICAÇÕES PRÁTICAS

5.1 Calibração do modelo teórico

Uma vez que os resultados experimentais (Tabela 1) apresentam valores significativamente inferiores aos resultados teóricos e numéricos, deve-se proceder com um ajuste da Fórmula de Timoshenko, de modo a refletir o comportamento experimental observado. Utilizando-se o Método dos Mínimos Quadrados com ajuste de uma curva potencial, sendo esta a que apresentou o maior coeficiente de correlação com os valores experimentais, propõe-se a inclusão do fator de correção $0.30/c^{0.45}$ na Equação (1):

$$P^{cr,corr} = \frac{0,30}{c^{0,45}} \cdot \frac{16,93 \sqrt{EI \cdot GL}}{L^2} \cdot \left(1 - \frac{3,48a}{L} \sqrt{\frac{EI}{GJ}} \right) \quad (7)$$

em que c (em milímetros) corresponde à excentricidade lateral fictícia que incorpora todas as imperfeições geométricas e defeitos naturais e de fabricação da viga de MLC.

Inspecionando-se os resultados fornecidos pela Equação (7), que representa a adaptação da Fórmula de Timoshenko para o caso de vigas de MLC com razão de aspecto igual a cinco, e confrontando-os com os resultados experimentais, sugere-se a adoção da excentricidade lateral fictícia c a ser utilizada nas análises geometricamente não lineares por elementos finitos.

TABELA 2

Fator de correção para vigas de MLC com seção transversal retangular de 40mm x 192 mm

c (mm)	$(0.30/c^{0.45})$	$P^{cr,corr}$ (7)	P^{cr} (4)
0.5	0.41	10265 N	
2.0	0.22	5500 N	
5.0	0.15	3642 N	25047 N
8.0	0.12	2948 N	
12.0	0.10	2507 N	
16.0	0.09	2158 N	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Recomenda-se o uso da excentricidade fictícia $c = 2$ mm para vigas de MLC com um excelente controle de qualidade de produção e livre de defeitos naturais e $c = 16$ mm para vigas de MLC com baixo controle de qualidade de fabricação. Deve-se observar que a influência do número de lâminas na instabilidade lateral de vigas de MLC é significativa, exigindo-se a inclusão de mais um fator de correção para levar em conta esse efeito. Acredita-se que a fórmula adaptada de Timoshenko possa servir como uma maneira prática e expedita para a incorporação das imperfeições das vigas de MLC no sentido de atender aos critérios de segurança impostos pelas prescrições normativas nacionais e internacionais.

5.2 Aplicações práticas do modelo teórico adaptado

Reescrevendo-se a Equação (2) para carregamento uniformemente distribuído e incluindo o fator de correção proposto neste trabalho, chega-se a:

$$q_{cr,corr} = \frac{0,30}{c^{0,45}} \cdot \frac{28,3 \sqrt{EI \cdot GL}}{L^3} \cdot \left(1 - \frac{3,48a}{L} \sqrt{\frac{EI}{GJ}} \right) \quad (8)$$

Tal equação pode ser utilizada para a previsão da distância entre travamentos laterais ao longo do eixo das vigas de MLC. Considerando-se uma cobertura plana formada por vigas de MLC com seção retangular de 338 mm x 1692 mm compostas por seis lâminas com espessura de 282 mm, espaçadas a cada dois metros, com carregamento

uniformemente distribuído levando em conta o carregamento de cobertura, em relação a área de influência de dois metros e majorada com o coeficiente de segurança igual a dois. Introduzindo-se as propriedades físicas e geométricas na Equação (8) e os carregamentos de 24 kN/m e 60 kN/m obtém-se, respectivamente, os comprimentos de intertravamento lateral (distância entre terças) de 20 metros e de 15 metros, conforme ilustrados na Figura 13.

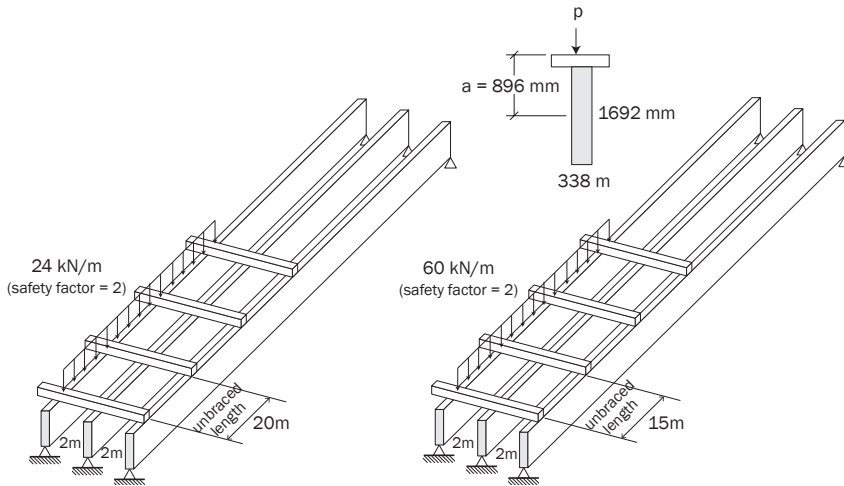


Figura 13 Exemplos de aplicação da metodologia proposta para vigas de MLC de grandes vãos

Fonte: Elaborada pelo autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez afastado o fenômeno da instabilidade lateral, o próximo passo corresponde às verificações no Estado Limite Último e de Serviço para vigas de MLC de grandes vãos.

Neste estudo, não foram investigadas as mudanças das propriedades da MLC que o adesivo provoca nas adjacências do plano de colagem, a influência no valor da resistência ao cisalhamento na lâmina de cola em relação ao tempo de cura e a porosidade da madeira em relação à profundidade de penetração do adesivo.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF INTERFACE EFFECTS ON GLUED LAMINATED BEAMS SUBJECTED TO LATERAL-TORSIONAL BUCKLING

Abstract

This paper addresses the numerical and experimental study about the behavior of structural elements in Glued Laminated Timber (GLULAM) subjected to lateral instability. It is proposed a formula, adapted from the Theory of Elastic Stability, for the expeditious evaluation of minimum distances of locking side GLULAM beams to satisfy the requirement for structural safety considering the geometric imperfections, the eccentricity of loading, the behavior of orthotropic materials and the interface effects. The identification of the phenomenon of lateral instability is seen experimentally in beams of rectangular section with aspect ratio equal to five. From the experimental evidence, mathematical models are developed by Finite Element Method for the validation of the elastic properties of the composite laminate.

Keywords: Glued laminated timber. Lateral buckling. Finite element method.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, C. A. *Dimensionamento de uma seção composta por quatro seções quadradas, solidarizadas descontinuamente, sujeitas a compressão paralela às fibras*. 2005. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Madeira)–Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ABRANTES, C. A. *Determinação do momento fletor último no regime linear elástico em vigas de Madeira Laminada Colada (MLC)*. Tese (Doutorado em Estruturas de Madeira)–Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190:1997. Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- PAPPALARDO JUNIOR, A. et al. Numerical and experimental study of the lateral-torsional buckling of glued-laminated wood beams. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, 2012, Seul. *Proceedings...* 2012.
- PAPPALARDO JUNIOR, A. et al. Study of the interface effects on glued laminated beams subjected to lateral-torsional buckling. In: ESSS CONFERENCE & ANSYS USERS MEETING, 2013, São Paulo. *Proceedings...* 2013.

PARRA, L. J. *Resistência à tração da madeira, resistência ao cisalhamento na linha de cola, seus impactos na geometria do dente e nas propriedades mecânicas de emendas dentadas*. 106 p. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Madeira)—Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

RAWLINSON, D. Photographs and articles by Duncan Rawlinson. 2008. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:RichmondOlympic_Oval_intern_View.jpg>. Acesso em: fev. 2012.

TIMOSHENKO, S. P. *Theory of Elastic Stability*. Engineering societies monographs. New York: McGraw-Hill, 1936.

Contato

Alfonso Pappalardo Junior
alfonso@mackenzie.br