

Análise da resistência à flexão de vigas de madeira laminada colada com diferentes espessuras de lâminas

Lucas Marquardt¹
Gabriela Varela Bender²
Augusto Wanderlind³
Márcio Vito⁴

Resumo: O objetivo deste estudo foi analisar a influência de diferentes espessuras de lâminas em vigas de madeira laminada colada de *Pinus Elliottis*. Foram confeccionadas 15 vigas de 5x15x200 cm, sendo três compostas por lâminas de 15 mm, três por lâminas de 25 mm, três por lâminas de 30 mm, três por lâminas de 50 mm e três maciças para referência. Para cada grupo de amostras foi efetuado o ensaio de flexão a quatro pontos, onde foi possível obter as cargas de ruptura, as deformações máximas, as cargas aplicadas no deslocamento vertical admissível e o módulo de elasticidade. O grupo que apresentou maior média de resistência à carga de ruptura foi o grupo de vigas com lâminas de 15 mm, resistindo 20,56 kN, e a menor o grupo de vigas maciças, resistindo 13,06 kN. Analisando pelo deslocamento vertical máximo, o grupo de vigas que apresentou maior média de deformação foi o grupo de vigas maciças, com deslocamento vertical de 52,24 mm, já a que apresentou o menor foi o grupo de vigas com lâminas de 30 mm, com 20,48 mm. Analisando a carga, quando chegamos ao deslocamento admissível, o grupo de vigas que apresentou maior média foi o grupo com lâminas de 50 mm, com carga de 8,55 kN, já o que apresentou menor média foi o grupo de vigas maciças, com carga de 4,54 kN. A análise de variância comprovou que não há evidências estatísticas de que as diferentes médias encontradas entre as vigas de madeira laminada colada sejam significativas. Entretanto, análises estatísticas comprovaram diferenças significativas na comparação entre as vigas de madeira laminada colada e as vigas maciças.

Palavras-chave: *Pinus Elliottis*; MLC; flexão a 4 pontos; deslocamento vertical.

ANALYSIS OF THE FLEXURAL STRENGTH OF LAMINATED BEAMS GLUED WITH DIFFERENT THICKNESSES OF LAMINAE

Abstract: The objective of this study was to analyze the influence of different thicknesses of laminae on beams of cast laminated wood of *Pinus Elliottis*. Fifteen 5x15x200 cm beams were made, three of them composed of 15 mm blades, three 25 mm blades, three 30 mm blades, three 50 mm blades and three solid blades for reference. For each group of samples, the four-point bending test was performed, where it was possible to obtain the bursting loads, the maximum

¹ Engenheiro Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, lucas.marquardt@unesc.net.

² Graduação Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, e-mail.

³ Engenheiro Civil, Me. Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, acw@unesc.net.

⁴ Engenheiro Civil, Me. Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, marciovito@unesc.net.

deformations, the loads applied in the allowable vertical displacement and the modulus of elasticity. The group that presented the highest resistance to the bursting strength was the group of beams with 15 mm slabs, resisting 20.56 kN, and the lowest was the group of solid beams, resisting 13.06 kN. Analyzing the maximum vertical displacement, the group of beams that presented the highest mean of deformation was the group of solid beams, with a vertical displacement of 52.24 mm, and the group with beams with 30 mm 20.48 mm. The group of beams that presented the highest average was the group with 50 mm blades, with a load of 8.55 kN, and the lowest average was the group of solid beams with load of 4.54 kN. The analysis of variance showed that there is no statistical evidence that the different averages found between beams of glued laminated wood are significant. However, statistical analyzes showed significant differences in the comparison between laminated beams and solid beams.

Keywords: *Pinus Elliottis*; MLC; 4-point bending; vertical displacement.

Introdução

O desenvolvimento da tecnologia para o uso da madeira laminada colada (MLC) é vastamente disseminado em diversos países, tais como Estados Unidos, Canadá e países Europeus.

De acordo com Miotto (2009, p. 01) “[...] a MLC ainda não é um material plenamente justificável para o emprego nas construções brasileiras, resultado da pequena tradição no seu uso, elevado custo de adesivos e reduzido número de empresas envolvidas na sua fabricação”. No entanto Bohn (1995, p. 3-4) discorre sobre algumas das vantagens da madeira laminada colada, afirmando que além de compor elementos de grandes dimensões a partir de pequenas peças, reduz-se o número de ligações nas estruturas, e as dimensões dos elementos não mais são limitados pelas dimensões das árvores, mas sim pelas condições de transporte.

Segundo Pfeil (2012, p.13) “A madeira laminada colada é um produto estrutural, formado por associação de lâminas de madeira selecionada, coladas com adesivos e sob pressão. [...] A espessura das lâminas varia em geral de 1,5 a 3 cm, podendo excepcionalmente atingir até 50 mm”.

Conforme o item 7.4.4 da ABNT NBR 7190 (1997, p. 29) “As peças de madeira laminada colada devem ser formadas por lâminas com espessuras não superiores a 30 mm de madeira de primeira categoria [...]”.

O item 6.3 da ANSI A190.1 (2017, p. 05) determina que “Laminações não devem exceder 51 mm de espessura líquida, a menos que seja utilizado um adesivo de preenchimento de folga para ligações de face e borda.”

Já o item 6.2.3 da DIN EN 386 (2001, p. 09) especifica a máxima espessura admitida e máxima seção transversal (Figura 1).

	Service class 1		Service class 2		Service class 3	
	<i>t</i> mm	<i>A</i> mm ²	<i>t</i> mm	<i>A</i> mm ²	<i>t</i> mm	<i>A</i> mm ²
Species type:						
Conifers	45	12 000	45	12 000	35	10 000
Broad leaf	40	7 500	40	7 500	35	6 000

Figura1. Máxima espessura e seção transversal das lâminas (Fonte: EN 386, 2001)

Para este estudo, como todas as vigas foram confeccionadas com lâminas do tipo *Pinus Elliottis* de primeira classe, a espessura máxima *t* é de 45 mm.

Segundo Icimoto (2016, p.01) “A madeira é o elemento principal e o adesivo é responsável por unir peças de madeira para moldar adequadamente os produtos finais. O custo do adesivo, em vários casos, pode ser maior que o da madeira”. Referindo-se que para obter um produto de menor custo, o ideal é utilizar lâminas com uma maior espessura a fim de chegar a um elemento final de mesma seção transversal e com menor quantidade de linhas de cola.

No entanto um dos fatores preponderantes que influência diretamente nestas considerações de custo-benefício é o valor de cargas de ruptura e deslocamentos obtidos através de ensaios de flexão. E foi com este intuito que se realizou esta pesquisa, para verificar a influência da espessura das lâminas integrantes de vigas de madeira laminada colada no seu comportamento quando submetida à ensaios de flexão à quatro pontos.

Materiais e métodos

Foram ensaiadas 15 vigas de madeira com seção transversal de 05x15 cm, sendo três delas maciças para referência, três com lâminas de 15 mm, três com lâminas de 25 mm, três com lâminas de 30 mm e três com lâminas de 50 mm. A madeira utilizada foi do tipo *Pinus Elliottis*. O adesivo estrutural utilizado foi à base de resina epóxi.

Três ensaios foram realizados, sendo o primeiro de umidade, o segundo para determinação do peso específico e o terceiro ensaio de flexão a 4 pontos. Todos os ensaios experimentais foram realizados no LEE (Laboratório experimental de estruturas) e LMCC

(Laboratório de materiais da construção civil), ambos localizados no I-Parque (Parque científico e tecnológico), integrados à UNESC (Universidade do Extremo Sul Catarinense).

Através dos ensaios de flexão a quatro pontos, analisou-se o comportamento das amostras quanto à carga e deslocamento vertical na ruptura, deslocamento vertical admissível por norma ($L/200$), e módulo de elasticidade.

Pode-se verificar na Figura 2 o fluxograma dos procedimentos citados anteriormente.

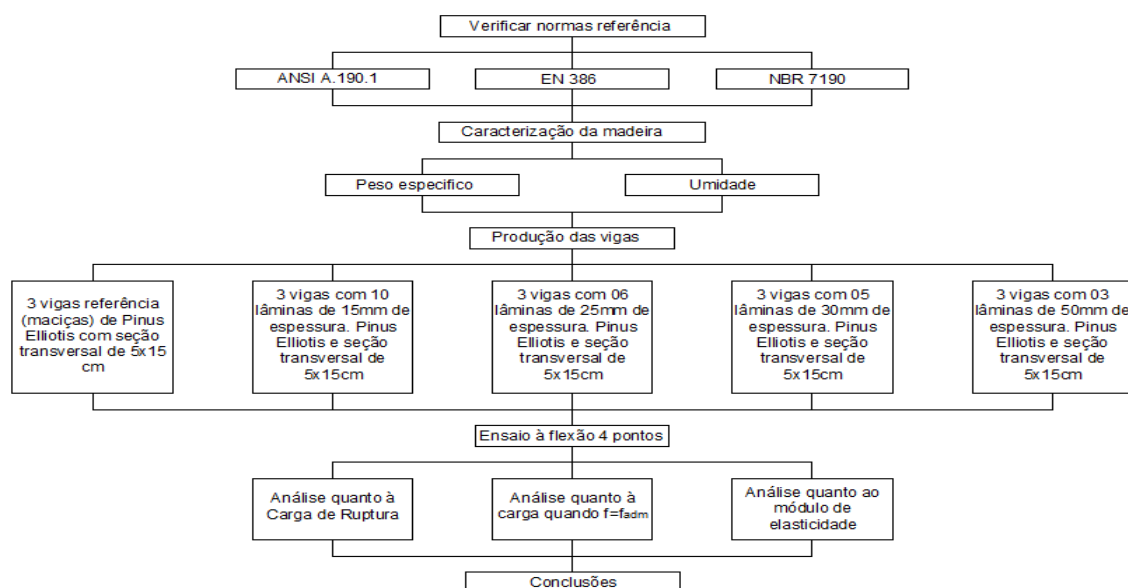


Figura 2. Fluxograma do Procedimento Experimental.

A madeira adotada foi da espécie *Pinus Elliottis*, devido a sua disponibilidade na região sul do Brasil, vasta aplicação na construção civil e suas propriedades físico-mecânicas, apresentadas na Tabela 01, obtidas no item E.3 da ABNT NBR 7190/1997.

Tabela 1. Propriedades do Pinus Elliottis (Fonte: ABNT NBR 7190/1997)

Propriedades de Resistência e Rigidez	Resistência padrão 12% (kN/cm ²)
Resistência à compressão paralela às fibras ($f_c,0$)	4,04
Resistência de tração paralela às fibras ($f_t,0$)	6,6
Resistência à tração normal às fibras ($f_t,90$)	0,25
Resistência ao cisalhamento (F_v)	0,74
Módulo de elasticidade (E)	1.188,90

O adesivo adotado foi o Sikadur 32, um adesivo estrutural à base de resina epóxi, de média viscosidade, da fabricante Sika S.A Brasil. De acordo com o fabricante, possui excelente aderência a superfícies de madeira. Segundo especificação técnica do produto, fornecida pelo fabricante, possui no primeiro dia, com temperatura de 25 °C e umidade relativa do ar de 50%, uma resistência à compressão de 60 MPa. Aos sete dias, nas mesmas condições de temperatura e umidade do ar, pode chegar a uma resistência à compressão de 90 MPa.

Para a determinação do teor de umidade do lote, foi seguido o item B.5 da ABNT NBR 7190:1997, onde tivemos uma relação entre a massa inicial e a massa seca da madeira. A massa seca foi determinada após colocar a amostra inicial em estufa e analisar de seis em seis horas a variação de umidade entre as amostras. Quando a amostra obteve uma variação menor ou igual a 0,5%, considerou-se a massa seca. Para a realização deste ensaio foi utilizada uma balança com precisão de 0,01 g e uma estufa com temperatura máxima em torno de 103 ± 2 °C.

Para a realização do ensaio de densidade básica seguiu-se conforme o item B.6 da ABNT NBR 7190/1997, em que foi dividida a massa da amostra seca pelo volume saturado. Para a realização deste ensaio foi utilizada uma balança com precisão de 0,01 g e uma estufa com temperatura máxima em torno de 103 ± 2 °C.

A seção transversal final das vigas foi de 5x15 cm e comprimento de 200 cm, compostas por lâminas de 15, 25, 30 e 50 mm de espessura, sendo estes, valores contemplados nas normas ABNT NBR 7190/1997, DIN EN 386 e ANSI A190.1 (Figura 3).



Figura 3. Seções transversais das vigas

vertical negativo “P” foi aplicado pelo macaco hidráulico, transmitindo a carga nos terços médios do vão teórico da viga (Figura 6).

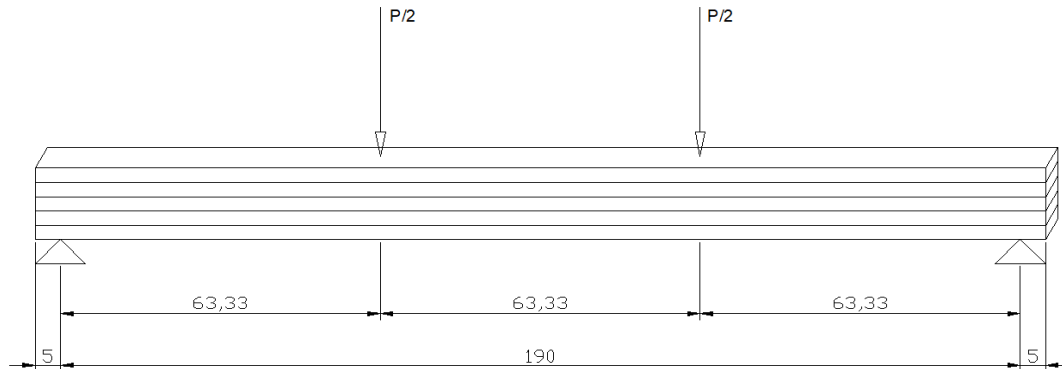


Figura 6. Carregamento das amostras em centímetros

A leitura dos dados foi realizada com QuantumX modelo MX840B. Os deslocamentos verticais foram coletados com o uso de medidores LVTD (Linear Variable Differential Transformer – Transformador Diferencial Variável Linear) e os dados obtidos foram armazenados eletronicamente.



Figura 7. Ensaio de flexão: (a) Ensaio de Flexão Estática à Quatro Pontos; (b) viga rompida após ensaio de flexão estática a Quatro Pontos

Resultados e discussões

O teor de umidade da madeira foi obtido através da relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca, dado pela Equação 1:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

em que:

m_i = massa inicial da madeira (g)

m_s = massa seca da madeira (g)

A densidade básica é uma massa específica convencional e foi obtida através da razão entre a massa seca e o volume saturado, conforme Equação 2:

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (2)$$

em que:

m_s = massa seca da madeira (kg)

V_{sat} = volume da madeira saturada (m^3)

Tabela 2. Teor de umidade (%) e densidade básica média ($kg.m^{-3}$).

Umidade (%)	Densidade básica ρ_{bas} ($kg.m^{-3}$)
$14,95 \pm 0,70$	$385,09 \pm 5,36$

Obtidos os resultados do ensaio de flexão a quatro pontos, analisaram-se os resultados pela Carga de Ruptura, Carga Atuante com Deslocamento vertical Máximo e Módulo de Elasticidade.

Os valores de ruptura obtidos no ensaio de flexão à quatro pontos estão descritos na Tabela 3, onde tem-se a Carga de Ruptura (kN) e deslocamento vertical máximo (mm). No ensaio foram utilizados dois medidores LVDT para determinação do deslocamento vertical, considerando o resultado a média entre os mesmos.

Verifica-se através das médias aritméticas, que o grupo com maior carga de ruptura é o grupo A (com maior quantidade de linhas de cola), com um valor de 20,56 kN e um deslocamento vertical de 29,70 mm. O grupo que apresenta menor carga de ruptura é o grupo E (vigas maciças), apresentando um valor de 13,06 kN e um deslocamento vertical de 52,24 mm.

A amplitude de resultados nas médias da Carga de Ruptura foi de 7,50 kN, e nas médias de deformação vertical de 22,54 mm.

Tabela 3. Carga de Ruptura (kgf) e Deslocamento Vertical na Carga de Ruptura (mm).

Grupo	Viga	Carga de Ruptura (kN)	Deslocamento Vertical máximo (mm)
A	Vigas com 10 lâminas de 15 mm	V1	16,94
		V2	24,99
		V3	19,74
	Média		20,56
B	Vigas com 6 lâminas de 25 mm	V4	17,92
		V5	15,68
		V6	17,09
	Média		16,90
C	Vigas com 5 lâminas de 30 mm	V7	17,45
		V8	16,02
		V9	17,26
	Média		16,91
D	Vigas com 3 lâminas de 50 mm	V10	18,39
		V11	14,70
		V12	20,03
	Média		17,70
E	Vigas Maciças	V13	12,01
		V14	13,26
		V15	13,92
Média		13,06	52,24

Os valores dos coeficientes de variação das médias foram, para Carga de Ruptura e Deslocamento Vertical, respectivamente, de 49,39 e 75,93% para o grupo A, de 16,62 e 17,51% para o grupo B, de 11,41 e 8,11% para o grupo C, de 38,31 e 40,72% para o grupo D e 18,46 e 98,58% para o grupo E.

Analisando estatisticamente estes dados, verifica-se na Figura 8a o gráfico boxplot para a carga de ruptura e na figura 8b o gráfico boxplot para os dados de deslocamento vertical na carga de ruptura. Os valores “p” obtidos na análise de variância (ANOVA) para a carga de ruptura e o deslocamento vertical na carga de ruptura foram de 0,035 e 0,019 respectivamente, confirmando, com 95% de probabilidade, a existência de pelo menos uma diferença estatisticamente significativa entre as médias, chegando, através do método estatístico de Tukey.

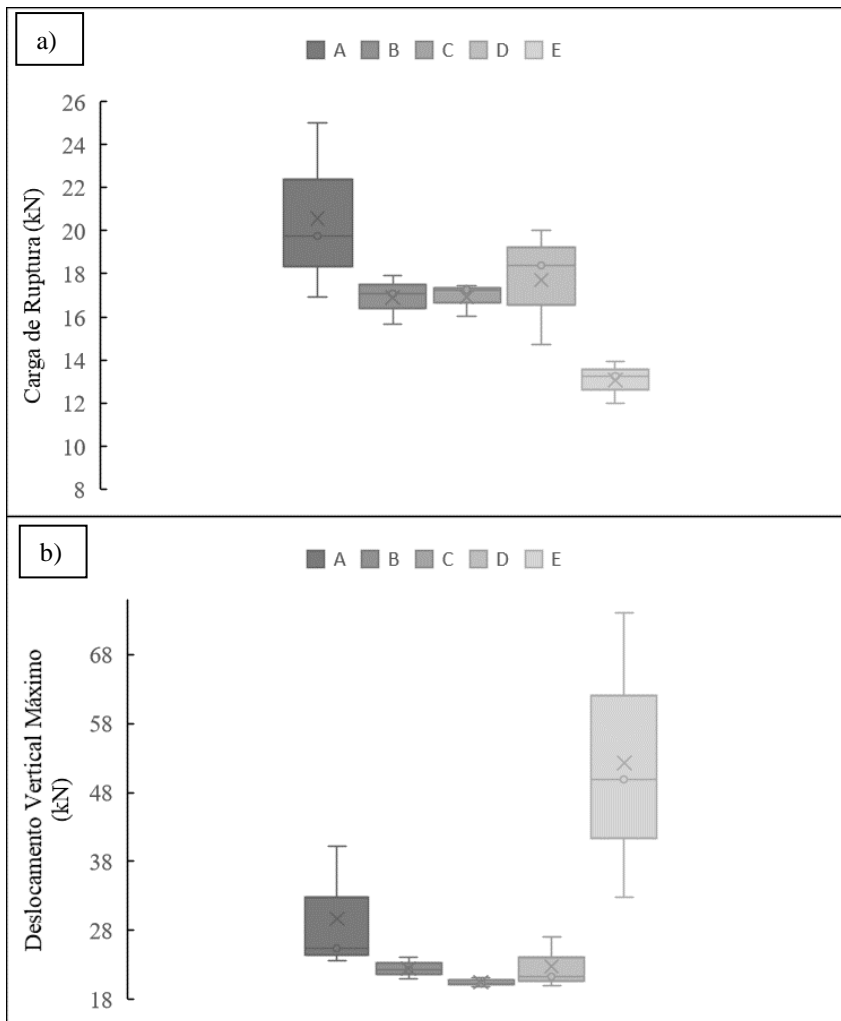


Figura 8. Gráficos Boxplot: (a) carga de Ruptura, (b) deslocamento vertical na carga de ruptura

Como o vão teórico das amostras é de 190 cm, obtém-se um f_{adm} de 9,5 mm. Na Tabela 4 se apresentam os valores de carga aplicada nas amostras no momento em que o deslocamento vertical é igual ao deslocamento admissível.

Verifica-se através das médias aritméticas, que o grupo com maior carga quando $f = f_{adm}$ é o grupo D (3 lâminas), com um valor de 8,55 kN. O grupo que apresenta menor carga é o grupo E (vigas maciças), apresentando um valor de 4,54429652 kN. A amplitude de resultados foi de 4,01 kN.

Os valores dos coeficientes de variação das médias foram de 27,37% para o grupo A, 26,65% para o grupo B, 13,24% para o grupo C, 65,70% para o grupo D e 30,69% para o grupo E, mostrando grande heterogeneidade nas amostras.

Tabela 4. Valores de Carga (kN) quando $f=f_{adm}$.

	Grupo	Viga	Carga (kN)	Deslocamento Vertical (mm)
A	Vigas com 10 lâminas de 15 mm	V1	7,19	9,5
		V2	8,96	9,5
		V3	8,39	9,5
		Média	8,18	9,5
B	Vigas com 6 lâminas de 25 mm	V4	8,60	9,5
		V5	7,57	9,5
		V6	7,10	9,5
		Média	7,76	9,5
C	Vigas com 5 lâminas de 30 mm	V7	8,83	9,5
		V8	7,93	9,5
		V9	8,41	9,5
		Média	8,39	9,5
D	Vigas com 3 lâminas de 50 mm	V10	8,94	9,5
		V11	6,12	9,5
		V12	10,60	9,5
		Média	8,55	9,5
E	Vigas Maciças	V13	4,21	9,5
		V14	5,19	9,5
		V15	4,23	9,5
		Média	4,54	9,5

Analisando estatisticamente estes dados, apresenta-se na Figura 09 o gráfico do boxplot para a carga quando se configura o deslocamento vertical admissível ($L/200$). O valor “p” da análise de variância (ANOVA) para a carga aplicada no momento do deslocamento vertical máximo foi de 0,010, confirmando, com 95% de probabilidade, a existência de pelo menos uma diferença estatisticamente significativa entre as médias.

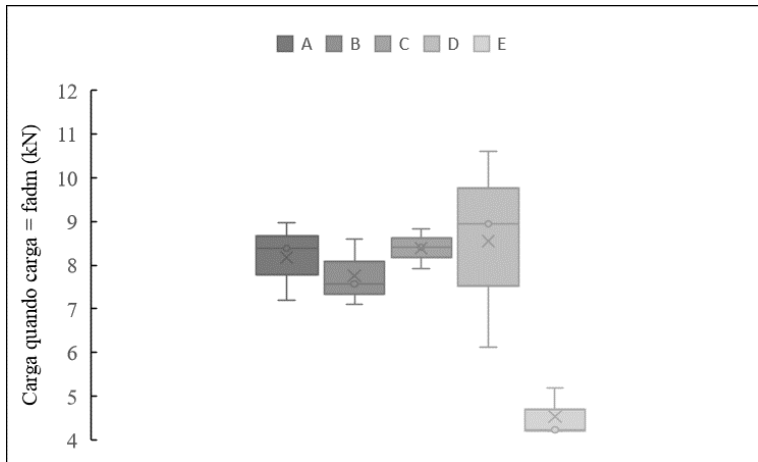


Figura 09 – Gráfico do Boxplot para a Carga quando $f=fadm$.

De acordo com o item B.14.2 da ABNT NBR 7190 (1997, p. 62), “A rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado no trecho linear do diagrama carga x deslocamento”. Os módulos de elasticidade E_M obtidos no ensaio de flexão à quatro pontos foram calculados através da equação 3:

$$E_M = \frac{(F_{m50\%} - F_{m10\%})L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%})4bh^3} \quad (3)$$

em que:

$F_{m,10\%}$ e $F_{m,50\%}$ = Cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada, aplicada ao corpo-de-prova (N);

$V_{10\%}$ e $V_{50\%}$ = Deformações no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga estimada (m);

b = Largura da seção transversal (m);

h = Altura da seção transversal (m);

L = Vão teórico da viga (m).

Também segundo a ABNT NBR 7190 (1997, p.16), permite-se avaliar o módulo de elasticidade E_{c0} por meio de ensaio de flexão, admitindo a relação descrita na Equação 4:

$$E_M = 0,85E_{c0} \quad (4)$$

em que:

E_c0 = Módulo de Elasticidade na compressão paralela às fibras.

Tabela 7. Módulos de elasticidade E_M e E_{c0} .

Grupo	Viga	Módulo de elasticidade E_M (MPa)	Módulo de elasticidade E_{c0} (MPa)
A	Vigas com 10 lâminas de 15 mm	V1	3543
		V2	4486
		V3	4044
	Média	4024	4735
B	Vigas com 6 lâminas de 25 mm	V4	4206
		V5	3693
		V6	3548
	Média	3816	4489
C	Vigas com 5 lâminas de 30 mm	V7	4287
		V8	3862
		V9	4106
	Média	4085	4806
D	Vigas com 3 lâminas de 50 mm	V10	4382
		V11	2928
		V12	5213
	Média	4174	4911
E	Vigas Maciças	V13	2058
		V14	2266
		V15	1985
Média	2103	2474	

Segundo os dados apresentados na tabela 07, o grupo com a maior média aritmética para módulo de elasticidade, com valor de $E_M = 4174$ MPa é o grupo D, portanto apresenta um coeficiente de variação bastante elevado. O menor módulo de elasticidade foi o das amostras do grupo E (Vigas maciças), com $E_M=2103,68$ MPa.

A amplitude das médias do módulo de elasticidade é de 2071,27 MPa. Os valores dos coeficientes de variação das médias do E_M são de 29,11% para o grupo A, de 22,50% para o grupo B, de 12,96% para o grupo C, de 68,80% para o grupo D e de 17,19% para o grupo E. Analisando estatisticamente estes dados, apresenta-se na Figura 10 o gráfico do boxplot para os valores de E_M . Os valores “p” da análise de variância (ANOVA) para E_M e E_{c0} foram de 0,008, confirmando, com 95% de probabilidade, a existência de pelo menos uma diferença estatisticamente significativa entre as médias.

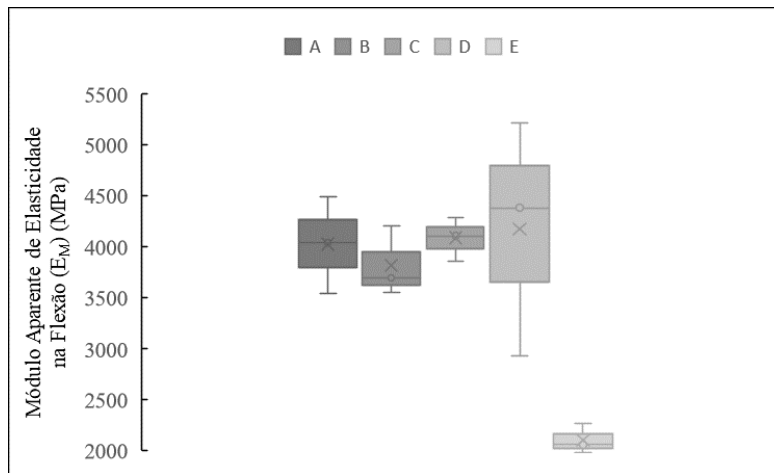


Figura 10. Gráfico Boxplot para os valores de E_M .

Conclusões

Através destas análises verifica-se que estatisticamente, apesar da diferença de médias descritas, as vigas de madeira laminada colada apresentam o mesmo comportamento, independentemente da espessura das lâminas de madeira da espécie *Pinus Elliottis*.

Porém, quando comparadas com as vigas de madeira maciça, analisando-se a carga de ruptura, apenas as vigas com lâminas de 15 mm apresentaram valores que diferem estatisticamente. Já no deslocamento vertical na carga de ruptura, as vigas de madeira laminada colada que diferem das vigas maciças são as do grupo B, C e D (25, 30 e 50 mm). Tanto para a carga no deslocamento admissível quanto para o módulo de elasticidade, todos os grupos de vigas de madeira laminada colada apresentaram valores que diferem estatisticamente das vigas maciças.

Portanto, de maneira geral, conclui-se que não temos diferença estatisticamente significativa entre as diferentes espessuras de lâminas para as variáveis estudadas neste trabalho, nos mostrando que a ABNT NBR 7190 está atrasada e gerando um maior custo na fabricação das vigas, quando comparada com a DIN EN 386 e a ANSI A.190, já que exige um maior número de linhas de cola. Também é fato que as vigas de madeira laminada colada apresentaram comportamentos superiores e diferenças estatisticamente significativas quando comparadas com as vigas maciças.

Referências bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira**: NBR 7190. Rio de Janeiro, 1997.
- AMERICAN NATIONAL STANDART. **Standart for wood Products – Structural Glued Laminated Timber**: ANSI A190.1. Nova Iorque, 2017.
- BOHN, A. R. **Influência da espessura das lâminas e da cola na madeira laminada colada**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Glued laminated timber – Performance requirements and minimum production requirements**: DIN EN 386, 2001.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements**: EN 14080, 2013.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design**: EN 1995-1-2, 2004.
- FRANÇA, L. C. A. **Madeira laminada colada (MLC) de Acácia Mangium Willd produzida com adesivos estruturais**. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Espírito Santo. Espirito Santo, 2012.
- GRANATO, F. G. **Aspectos tecnológicos da fabricação de elementos estruturais de madeira laminada colada**. TCC (Graduação) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2011.
- ICIMOTO, F. H. **Influence of lamellar thickness on strength and stiffness of glued laminated timber beans of Pinus oocarpa**. International Journal of Materials Engineering. p. 51-55, 2016.
- MIOTTO, J. L. **Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de Eucalipto**. Revista tecnológica, Edição especial ENTECA. p. 35-45, 2009.
- NETO, C.C. **Madeira laminada colada (MLC): Controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.
- ORTIZ, I. H. M. **Análise da influência da umidade na resistência mecânica de vigas de madeira Cambará (Qualea spp)**. TCC (Graduação) – Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 2017.
- PELLIS, B. P. **Desempenho mecânico de vigas de madeira laminada colada armada confeccionadas com adesivo poliuretânico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2015.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira: dimensionamento segundo a norma brasileira NBR 7190/97 e critérios das normas norte-americanas NDS e europeia EUROCODE 5**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- TEREZO, R. F. **Análise de desempenho de vigas em madeira laminada colada de parica (Schizolobium Amazonicum Huber ex. Ducke)**. Revista Scientia Forestalis v.38. p.471-480, 2010.