



Avaliação experimental da influência das espessuras de lâminas para a viga de madeira laminada colada com adesivo epóxi.

Alax W P D da Silva (1), M.e Marcio Vito(2), M.e Augusto Wanderlind(3)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) alax.william@hotmail.com, (2) marciovito@unesc.net, (3) acw@unesc.net

Resumo: A madeira laminada colada (MLC) é um produto derivado das técnicas de laminação e colagem de madeira, sua criação se fez necessário para dispor das qualidades da madeira, tal como bom desempenho mecânico, térmico e acústico, eliminando as limitações de dimensões que a mesma apresenta em seu estado natural. O MLC apresenta como desvantagem, o alto custo de produção, o qual este diretamente relacionado ao valor do adesivo utilizado em sua composição. Uma das possibilidades de redução do custo do MLC, é a utilização lâminas de madeira com grandes espessuras, dessa forma se reduz a quantidade de linhas de cola necessárias para a fabricação de uma peça de MLC, no entanto a NBR 7190:1997 impõe limites para essas espessuras. Este trabalho surgiu com a intenção de averiguar a necessidade do limite de espessura imposto pela NBR 7190:1997, por meio de análise do desempenho da madeira laminada colada variando as espessuras das lâminas utilizadas para a sua confecção. Neste trabalho também foi possível avaliar a possibilidade de obter uma madeira laminada colada com características mecânicas superiores a madeira maciça, através do uso de adesivos rígidos. O trabalho consistiu em confeccionar 20 vigas com dimensões de 200,00 x 15,00 x 7,50cm, divididas em quatro grupos, os quais variavam de 3 a 6 o número de lâminas utilizadas para obter tal geometria, e então compará-las a um 5º grupo, sendo este composto por vigas maciças de mesma dimensão. Com os resultados de cargas e deslocamentos obtidos nos ensaios de flexão a 4 pontos, ao processar os dados através da análise estatística de variância (ANOVA),concluiu-se não haver diferenças significativas na performance das vigas laminadas em relação às maciças, independente das espessuras de lâminas adotadas. De mesma forma, não se pôde afirmar de maneira estatística, que a inclusão do adesivo contribuiu para elevar a rigidez do elemento quando comparado a peça maciça.

Palavras-chaves: estruturas; Eucalipto; Grandis; madeira; MLC; flexão;

Abstract: Glued laminated wood (MLC) is a product derived from wood lamination and gluing techniques, its creation was necessary to have the qualities of the wood, as well as good mechanical, thermal and acoustic performance, eliminating the limitations of dimensions that it presents in its natural state. The disadvantage of MLC is the high cost of production, which is directly related to the value of the adhesive used in its composition. One of the possibilities for reducing the cost of MLC is the use of thick wood veneers, thus reducing the amount of glue lines required to manufacture a MLC part, however NBR 7190:

1997 imposes limits for these thicknesses. This research was intended to determine the need for thickness limit imposed by NBR 7190: 1997, by analyzing the performance of glued laminated wood by varying the thickness of the blades used for its manufacture. In this work it was also possible to evaluate the possibility of obtaining a laminated wood with superior mechanical resources in solid wood, using the use of rigid adhesives. The research consisted of making 20 beams with dimensions of 200.00 x 15.00 x 7.50 cm, divided into four groups, which varied from 3 to 6 the number of blades used to obtain such geometry, and then comparing them to a 5th group, which is composed of massive beams of the same size. With the load and displacement results obtained in the 4-point bending tests, when processing the data through the statistical analysis of variance (ANOVA), it was concluded that there were no significant differences in the efficiency of the laminated beams in relation to the masses, regardless of the thickness. of adopted blades. Likewise, it could not be statistically stated that the inclusion of the adhesive contributed to increase the stiffness of the element when compared to the solid part.

Keywords: structures; Eucalyptus; Grandis; wood; Glulam; flexion;

Introdução

A madeira é um material bastante versátil, a absorção de ondas mecânicas e isolamento térmico são propriedades que se sobressaem quando a mesma é citada, e, além disso, a madeira é um material renovável e possui características satisfatórias em relação à resistência mecânica, principalmente quando relacionado à sua baixa densidade (CALIL et al., 2003).

A utilização da madeira na construção civil é bastante antiga, desde os primórdios da civilização o material foi empregado de diversas formas e ao longo do tempo houveram evoluções em relação à maneira de fazer o seu uso, desde trabalhar com o material em seu estado bruto, até o beneficiamento para atender determinadas necessidades na construção civil (BOHN, 1995). No entanto chegou-se aos tempos modernos e as necessidades se elevaram. Atualmente existe uma demanda por materiais cujas resistências sejam maiores e, conseqüentemente, madeiras com dimensões superiores as até então utilizadas. Porém há dificuldades quanto ao cultivo de plantas que forneçam tais características. A partir dessas necessidades, surge então a possibilidade da união de pequenas unidades do elemento para a formação de uma grande peça de madeira, e a partir desta carência, surgiu a madeira laminada colada (MLC) (ALBINO 2011, OLIVEIRA 2011).

A madeira laminada colada conhecida também como MLC, é utilizada principalmente na confecção de vigas e pilares para uso estrutural, geralmente utilizada em cenários onde se necessita de peças com grandes dimensões e resistências. Tal técnica se originou após o surgimento dos adesivos de alto desempenho, os quais garantiam uma união bastante estável entre os componentes que constituíam a peça de MLC (GRAEFF 1996).

A principal vantagem do MLC em relação à madeira maciça é a possibilidade da criação de estruturas de grandes dimensões e formatos, enquanto que a madeira maciça se limita ao tamanho da planta a qual foi extraída e o transporte da mesma. Além disso, a madeira laminada colada permite um controle de qualidade superior à madeira maciça, uma vez que seja possível a inspeção de suas lâminas, realizando a observação de possíveis falhas e removendo as quais pudessem prejudicar seu desempenho mecânico (CALIL NETO et al., 2011).

A utilização da madeira laminada colada na construção civil já ocorre há muitas décadas em vários países, no entanto no Brasil, embora há belos exemplos de sua utilização, o produto MLC não possui competitividade no mercado quando comparado à outros materiais, pois além do alto custo dos adesivos disponíveis no mercado, existe a limitação da NBR 7190:1997 de espessura máxima sendo 30mm por lâmina que compõe a MLC, elevando o custo de sua produção, uma vez que necessitamos de um número superior de linhas de adesivo (ICIMOTO, 2016). A Norma Brasileira mostra-se conservadora quando comparada às normas internacionais, como a ANSI A190.1 (2017) que impõe o limite de 51 mm e a DIN EN 386 (2001) com limite máximo de 45 mm por lâmina.

No Brasil, existe datada de 2011 a proposta para revisão da Norma 7190:1997 e alteração do item 7.7.4, que sugere adotar espessuras máximas de 50 mm por lâminas que compõe a peça de MLC.

Em trabalhos anteriores, podendo-se citar o de Fontana (2018), no qual foi utilizado um adesivo flexível, verificou-se o aumento na flexibilidade das vigas ao reduzir as espessuras das lâminas. Todavia neste novo trabalho, é proposto utilizar um adesivo cuja rigidez seja superior a da madeira, desta forma o adesivo pode vir a contribuir para o aumento das resistências da peça de MLC, assim como visto no trabalho de Marquardt (2017), entretanto, será necessário avaliar a significância destas variações.

A proposta deste trabalho é analisar a influência que as espessuras das lâminas possuem em relação ao comportamento mecânico do MLC, por meio da confecção grupos de vigas com diferentes espessuras de lâminas e comparação de resultados obtidos em ensaios de flexão. Com os resultados obtidos, será possível determinar se existem diferenças significativas de resistência mecânica ao se confeccionar uma viga de MLC com lâminas delgadas ou espessas dentro do intervalo de 2,50 e 5,00 cm. A partir dos resultados apresentados nesse trabalho, será possível questionar o limite de espessura imposto pela Norma Brasileira 7190:1997 no item 7.7.4. De mesma forma, também será possível investigar se, a utilização do adesivo rígido para a ligação das lâminas, poderá acrescentar rigidez ao elemento, resultando em um MLC com características mecânicas superiores a madeira maciça.

Materiais e métodos

Este trabalho iniciou-se pela fabricação de 20 vigas de MLC de mesmas dimensões, separadas em 4 grupos diferenciados pela quantidade e espessura de lâminas, e também pela quantidade de adesivo utilizado em sua composição. Posteriormente, realizou-se ensaios de flexão junto a um quinto grupo, sendo este composto de vigas maciças, utilizadas a fim de referencia. Ao final, analisou e processou-se os dados gerados e então obteve-se os resultados deste trabalho.

Tal pesquisa relacionada a análise de influência de espessura já fora proposta e realizada por outros autores, entre eles Bohne (1995) e Marquardt (2017), que utilizaram como objeto de estudo, vigas de MLC confeccionadas com *Pinus Taeda* e *Pinus Elliottii*. Seguindo as recomendações que constam em suas pesquisas, este novo trabalho buscou aumentar o grau de confiabilidade deste estudo, adotando maior quantidade de amostras, dimensões maiores a fim de evitar a flambagem das peças e a opção pela espécie *Eucalipto Grandis* para execução dos ensaios.

A escolha pelo *Eucalipto Grandis* se fez por se tratar de uma madeira de boa resistência e alto cultivo na região sul de Santa Catarina, porém com características negativas como alto índice de rachaduras e empenamentos devido seu processo de desidratação.

Características essas que puderam ser atenuada durante o processo de laminação e colagem, sendo assim, tornando a espécie apta para a fabricação de MLC.

A Tabela 1 apresenta as características mecânicas do eucalipto Grandis descritas na NBR 7190:1997, contudo é necessário salientar que tais valores sofrem alterações conforme o estado de umidade do material.

Tabela1. Valores característicos fornecido pela NBR 7190: 1997(NBR 7190: 1997).

| Nome comum | Nome científico | $\rho_{ap}(12\%)$ (kg m^{-3}) | f_{c0} (MPa) | f_{t0} (MPa) | f_{i90} (MPa) | f_v (MPa) | E_{c0} (MPa) | n |
|------------|-------------------|---|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|-------------------|-----|
| E. Grandis | EucalyptusGrandis | 640 | 40,3 | 70,2 | 2,6 | 7,0 | 12.813 | 103 |

Devido à dificuldade em reconhecer e diferenciar visualmente as espécies de Eucalyptus Grandis e Saligna, pois ambos apresentam coloração e aspectos físicos semelhantes, realizou-se ensaios de umidade e densidade básica de amostras extraídas do lote, seguindo os procedimentos do anexo B da NBR 7190:1997, para dessa forma caracterizar e identificar o material.

Os materiais utilizados para o estudo foram vigas de madeira laminadas e vigas maciças. As vigas foram confeccionadas conforme o exemplo esquemático visto na Figura 1, separadas em modelos que se diferem por quantidade de lâminas e assim detalhados na Tabela 2.

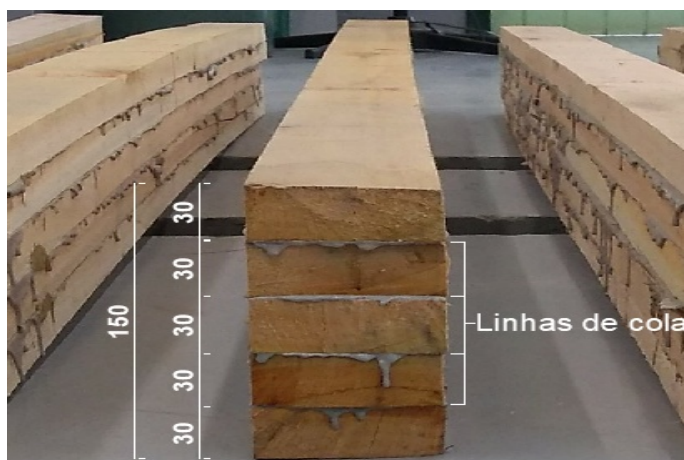


Figura 1. Exemplo esquemático de MLC com lâminas de 30mm.

Tabela 2. Características físicas das vigas analisadas

| Modelo | Quantidade de lâminas por viga | Dimensão das lâminas (cm) | Quantidade de linhas de adesivo por viga | Dimensão final (cm) | Número de amostras |
|-----------|--------------------------------|---------------------------|--|-----------------------|--------------------|
| 3L | 3 | 5,00 x 7,50 x 200,00 | 2 | 15,00 x 7,50 x 200,00 | 5 |
| 4L | 4 | 3,75 x 7,50 x 200,00 | 3 | 15,00 x 7,50 x 200,00 | 5 |
| 5L | 5 | 3,00 x 7,50 x 200,00 | 4 | 15,00 x 7,50 x 200,00 | 5 |
| 6L | 6 | 2,50 x 7,50 x 200,00 | 5 | 15,00 x 7,50 x 200,00 | 5 |
| 1L/Maciça | 1 | 15,00 x 7,50 x 200,00 | 0 | 15,00 x 7,50 x 200,00 | 5 |
| Total | | | | | 25 |

Para a união das lâminas foi utilizado um adesivo estrutural a base de epóxi, cujas características estão descritas na Tabela 3. Segundo seu fabricante, o produto apresenta uma resistência final á compressão de 60MPa, mas o mesmo não divulga o módulo de elasticidade de seu produto.

Tabela 3. Características técnicas do adesivo epóxi (Fonte: Fabricante, 2019)

| | |
|---|--|
| Função | Adesivo estrutural |
| Composição e aspecto | Componente a: resina epóxi e cargas minerais, Componente b: poliamida-amina |
| Coloração | Cinza |
| Densidade da mistura | 1,600 a 1,700 g cm ⁻³ |
| Consumo estimado | Para rolagem 1,6 kg / m ² / mm de espessura |
| Cura inicial/cura total (25°C e 50% UR) | Resistência inicial em 4 horas/ 7 dias para cura final |
| Resistência a compressão | 60MPa em 24 horas |

Com o intuito de comprovar a eficiência do adesivo utilizado para a confecção das vigas, foi realizado um ensaio de flexão estática a 4 pontos com uma viga piloto antes do início da produção das demais peças. O ensaio resultou na ruptura da lâmina, comprovando a eficácia do adesivo quanto sua aderência e ductilidade.

A partir da viga piloto, utilizando uma balança digital SF-400, também foi possível determinar o rendimento do produto, dividindo a área de colagem pela massa de produto utilizado na confecção da viga.

Na Figura 3, visualiza-se a madeira utilizada para este experimento, que foi adquirida em uma madeireira local, a partir do desdobramento e serragem de peças maciças, reduzindo-as em lâminas com as dimensões aproximadas das selecionadas para os ensaios. Com o



processo de aplainamento, chegou-se as medidas exatas das solicitadas e com um acabamento de superfície bastante regular, o que facilitou posteriormente a aplicação do adesivo nas peças. Além de fornecer e beneficiar amadeira, a madeireira também buscou selecionar os melhores exemplares que possuía, buscando evitar as peças com excessos de falhas e envergaduras, para dessa forma obter-se resultados mais precisos neste experimento. No entanto após a desdobra, ocorreu o empenamento das lâminas, as quais necessitaram ser regularizadas durante o processo de colagem do MLC.



Figura 3. Lâminas utilizadas para a confecção das vigas.

O adesivo bi-componente foi preparado na proporção de 2 partes de epóxi para 1 parte de catalisador, sendo misturados por aproximadamente 5 minutos até que o produto obtivesse uma consistência homogênea e não sobrassem partículas inteiras e ressecadas em seu interior. Consequente, obteve-se um produto de média viscosidade. Essa característica possibilitou criar-se uma espessa película de adesivo, sem que a mesma escorresse de forma excessiva e viesse a ocorrer um desperdício elevado do produto.

Para a aplicação do produto, aplicou-se uma quantidade do adesivo sobre a superfície da madeira, com uma espátula metálica distribuiu-se uniformemente o produto sobre as lâminas, evitando espaços vazios nas juntas de colagem, conforme apresentado na Figura 4. Esse procedimento é importante durante a confecção das vigas, pois contribui para uma distribuição homogênea de carga por toda a área de colagem, evitando acúmulos de tensões derivadas de espaços que não tenham recebido o adesivo.



Figura 4. Adesivo epóxi aplicado sobre a superfície da lâmina.

Para prensar e alinhar as lâminas empregou-se o uso de aparatos, mostrado na Figura 6, confeccionados in loco, utilizando barras roscadas, arruelas, porcas e pequenas peças de madeira. Com os aparatos distribuídos seguindo o modelo da Figura 5, inseriu-se compressão de forma manual, através do aperto das porcas e uso de chaves específicas. Os valores de carga aplicadas nessa compressão não puderam ser mensurados, tornando o monitoramento de prensagem arbitrado a partir da visualização de comportamento e que se buscou como limitador, o início de esmagamento local das peças de MLC. Além de garantir um melhor contato entre o adesivo e a madeira, este procedimento também serviu para amenizar as envergaduras que as lâminas apresentavam decorrentes da perda de umidade, resultando em peças de MLC mais retilíneas em comparação a madeira em seu estado natural.



Figura 5. Prensagem da viga de MLC.



Figura 6. Aparato utilizado para prensagem do MLC.

Sete dias após a confecção do MLC, tempo de cura total do adesivo segundo o fabricante, as resistências e deformações das vigas foram obtidas através do ensaio de flexão estática a 4 pontos, apresentado na Figura 7. As vigas foram submetidas a cargas crescentes até seu limite de ruptura, monitorando os deslocamentos verticais através de LVDTs. Com os resultados deste ensaio, foi possível obter gráficos para comparação e análise entre os modelos de vigas selecionados para este trabalho.



Figura 7. Ensaio de flexão a 4 pontos.



Os ensaios foram realizados nos laboratórios do parque científico e tecnológico (Iparque), pertencente à Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Os ensaios de flexão foram executados através do pórtico de cargas com capacidade de 500kN e LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) de 100mm. As leituras foram realizadas pelo QuantumX modelo MX840, o qual forneceu de maneira eletrônica e simultânea, os resultados de deslocamentos e cargas atuantes em uma frequência de 2Hz. Todos os cálculos realizados posteriormente após a obtenção dos dados, foram executados utilizando planilhas eletrônicas, programadas através dos modelos de equações presente na NBR 7190:1997, assim como a plotagem dos gráficos, tabelas e análise de variância (ANOVA).

A análise estatística de variância (ANOVA) testa hipóteses entre dois ou mais grupos e avalia a importância de um ou mais fatores, dessa forma analisa suas respostas e através das médias de variáveis, obtém-se o resultado de semelhança, a qual é apresentada através do valor-P. Para obter 95% de confiança que os grupos analisados não apresentem diferenças significativas, é preciso que o valor-P resulte em um número acima de 0,05 e consequentemente o F crítico seja superior ao F obtido.

A partir do ensaio de flexão estática a 4 pontos, pôde-se obter a carga máxima resistida pela viga, além da carga no limite de proporcionalidade, ductilidade da madeira e obtenção do módulo de elasticidade através da equação presente no anexo B.9.2 NBR 7190:1997.

O ensaio de umidade ocorreu seguindo o anexo B.5.1 da NBR 7190:1997, a partir de 6 corpos de prova com dimensões aproximadas de 50 x 30 x 20 mm, a massa inicial dos corpos foram obtidas e posteriormente os corpos foram desumidificados em estufas e sua massa novamente obtida para analisar o teor de umidade.

Utilizando os corpos do ensaio de umidade e seus dados gerados, foi possível obter a densidade básica do material utilizando a equação presente no anexo B.6.2 da NBR 7190:1997.

Resultados e discussão

O adesivo apresentou um rendimento de aproximadamente $0,76 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, dessa forma, cada embalagem de 1 kg foi suficiente para a confecção de 5 linhas de adesivo, com as dimensões de 200,00 x 7,50 cm.

O Volume de adesivo utilizado ao confeccionar as vigas de MLC com lâminas de 50 mm, correspondeu a 40% do volume utilizado nas vigas com lâminas de 25 mm e 60% nas vigas com lâminas de 30 mm. Levando em consideração o custo da madeira e do adesivo para a produção das vigas, o modelo com lâminas de 50 mm apresentou uma economia monetária de 28% em relação ao modelo com lâminas de 30 mm, estes valores confirmam as falas de Icimoto (2016), onde o mesmo cita que em alguns casos o adesivo pode apresentar um valor superior ao da madeira para a produção do MLC.

O ensaio de densidade básica, conforme apresentado na Tabela 4, apresentou uma média de $423,23 \text{ kg m}^{-3}$, valor este condizente com valores tabelados encontrados em estudos antecessores, entre eles o de Ribeiro (1993), que buscou caracterizar o *Eucalyptus Grandis*, dessa forma garantindo a procedência do material o qual se trabalhou neste estudo.

A Tabela 4 apresenta os resultados da caracterização da madeira, nela observa-se que o teor de umidade da madeira, assim como esperado de uma madeira recém-desdobrada, se mostrou alto, com média de 65,89%. Tal atributo influenciou diretamente nos resultados de ensaio mecânico, diminuindo consideravelmente a resistência do material, no entanto, por se tratar de corpos derivados de um mesmo lote, torna-se possível a comparação entre tais, uma vez que todas estejam com suas resistências reduzidas devido ao mesmo teor de umidade.

Tabela 4. Resultados de umidade e densidade básica da madeira.

| Amostra | Umidade (%) | Densidade básica (kg m^{-3}) |
|---------|-------------|---|
| 1 | 55,26% | 420,6713 |
| 2 | 58,14% | 396,4246 |
| 3 | 59,83% | 406,4670 |
| 4 | 63,35% | 414,9491 |
| 5 | 86,98% | 452,6613 |
| 6 | 71,76% | 448,1884 |
| Média | 65,89% | 423,2269 |

Durante o ensaio de flexão, observou-se que a técnica de prensagem adotada não se mostrou eficiente para os grupos das lâminas de 37,5 e 30 mm, devido ao alto empenamento dessas peças e a alta resistência gerada pela mesma durante o processo de regularização, algumas lâminas não obtiveram o contato necessário com o adesivo para fornecer uma perfeita união entre as peças, desta forma as vigas obtiveram pontos de acúmulo de tensões, os quais posteriormente vieram a romper precocemente.

A forma como ocorreram as rupturas foram classificadas em 2 grupos, sendo eles cisalhamento e tração, conforme disposto na Tabela 5.

Tabela 5. Modos de ruptura observados.

| <u>Modo de ruptura</u> | <u>Quantidade</u> |
|------------------------|-------------------|
| Tração | 8 |
| Cisalhamento | 15 |

A Tabela leva em consideração apenas a primeira forma de ruptura observada, sendo que em alguns casos, as vigas laminadas apresentaram rupturas secundárias e outras necessitaram de uma melhor análise para determinar o seu real modo de ruptura. Como exemplo a viga 4L-5 da Figura 8, onde se observou um cisalhamento inicial, o qual em primeiro instante assemelhou-se a uma delaminação, no entanto ao se observar cuidadosamente, foi constatado que, diferente de uma delaminação onde ocorre a ruptura da cola, nesta ocorreu desprendimento de uma parcela delgada da madeira por conta do cisalhamento da peça, sendo assim classificou-se como ruptura por cisalhamento.



Figura 8. Viga 4L-5 rompida por cisalhamento.



A Figura 9 demonstra o comportamento da peça 4L-2, assim como ocorrido na amostra 4L-5, essa também apresentou ruptura por cisalhamento próximo à linha de cola e tal como visto no gráfico, veio a ocorrer com a carga de 17,80 kN. Porém após essa primeira falha, o ensaio foi mantido para observar o seu completo colapso, com isso os valores voltaram a se elevar, até que pouco acima do primeiro resultado, com 18,50 kN, veio à ruptura total da peça por tração da 2ª lâmina. Pôde-se então concluir que após a primeira ruptura, a viga laminada se dividiu em duas peças sobrepostas com duas lâminas cada e com isso vieram a trabalhar de forma independente até atingir seu total colapso, sendo assim, seu modo de ruptura veio a ser o cisalhamento.

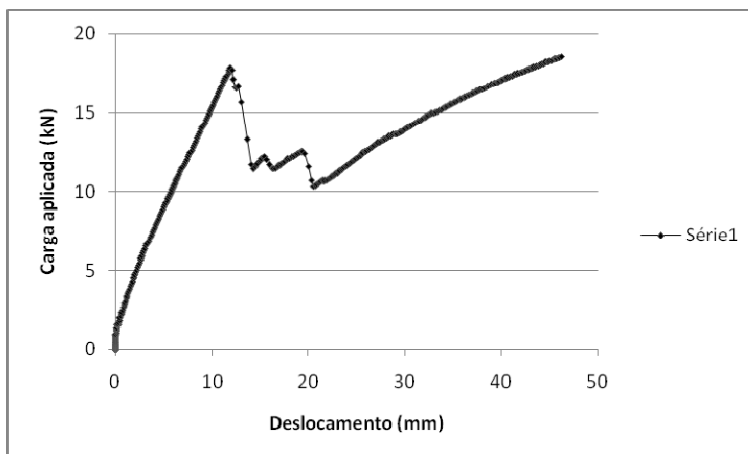


Figura 9. Gráfico de tensão (kN) /deformação (mm) para viga 4L-2.

O modelo de gráfico da Figura 9 não se mostrou exclusivo da viga 4L-2, outras amostras demonstraram comportamentos similares. É visto que após atingirem uma determinada carga de ruptura, prosseguia-se com o ensaio e novamente próximo a carga da primeira ruptura, a viga atingia o total colapso, como é mostrado também no gráfico da Figura 10.

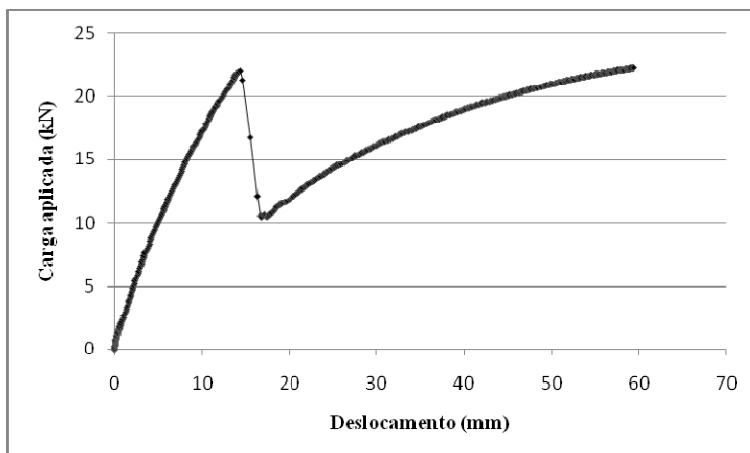


Figura 10. Gráfico de tensão (kN) / deformação (mm) para viga 4L-1.

Além dos 2 grupos principais de modo de ruptura, houveram vigas que apresentaram comportamentos singulares e estas não se enquadraram diretamente aos demais casos, assim como também, em especial, o caso da viga 1-L1, apresentada na Figura 11, que durante o ensaio não se conseguiu obter a ruptura da peça devido ao excesso de deformação, que chegou ao limite de deslocamento do pórtico de reação, indicado pela seta na Figura 11.



Figura 11. Ensaio de flexão a 4 pontos com a viga 1-L1.

O cisalhamento foi a falha de maior ocorrência durante os ensaios, e nesses em nenhum caso observou-se a ruptura longitudinal no ponto do adesivo, na maioria das vezes, uma pequena lasca da madeira veio a ser arrancada da peça principal que se encontrava em contato com o adesivo, tal como mostra a Figura 12.



Figura 12. Arrancamento da lasca de madeira paralela à linha de adesivo.

Em alguns casos essas lascas evoluíam para um cisalhamento da lâmina e posteriormente a total ruptura da viga, como mostrado anteriormente na Figura 8. Além da questão das falhas de confecção, outro fator que influenciou no auto índice de cisalhamento, foi o excesso de umidade presente na madeira, pois em trabalhos anteriores, podendo ser citado o de Calil Neto et al.(2014), o Eucalipto apresentou variações significativas de até 48% de redução da sua resistência ao cisalhamento, entre a madeira saturada e com 12% de umidade relativa.

Na maioria das peças, durante os ensaios, inicialmente pôde-se observar a deformação por compressão das fibras da parte superior da viga, mais precisamente, nos pontos de aplicação das cargas, esse comportamento é justificável, uma vez que diferente do concreto, a madeira possui uma resistência de compressão inferior a de tração, dessa forma, é compreensível que o primeiro sinal de ruptura ocorra pela compressão da peça.

Os dados obtidos pelo ensaio de flexão a 4 pontos foram computados na Tabela 6, onde demonstra a carga máxima, deslocamento máximo e módulo de elasticidade, além da média e desvio padrão de cada modelo de viga.

Tabela 6. Resultados de tensão de ruptura, deslocamento e módulo de elasticidade.

| Nome | Modelo | Carga máxima (kN) | Deslocamento máximo (médio) (mm) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|--------|-------------|-------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Maciça | 1 x 150,0mm | 35,13 | 81,20 | 8980,20 |
| Maciça | 1 x 150,0mm | 32,18 | 15,48 | 17027,59 |
| Maciça | 1 x 150,0mm | 36,30 | 34,60 | 10224,57 |

| | | | | |
|--------|-------------|---------------|---------------|--------------------|
| Maciça | 1 x 150,0mm | 23,94 | 18,02 | 10245,08 |
| Maciça | 1 x 150,0mm | 34,91 | 37,63 | 11346,48 |
| Média | | 32,49 ± 5,01 | 37,38 ± 26,37 | 11564,79 ± 3166,54 |
| 3L-1 | 3 x 50,0mm | 15,62 | 29,42 | 7964,25 |
| 3L-2 | 3 x 50,0mm | 21,50 | 20,62 | 9626,92 |
| 3L-3 | 3 x 50,0mm | 8,63 | 15,07 | 10681,90 |
| 3L-4 | 3 x 50,0mm | 23,38 | 21,74 | 9222,29 |
| 3L-5 | 3 x 50,0mm | 36,17 | 50,41 | 9470,48 |
| Média | | 21,06 ± 10,22 | 27,45 ± 13,81 | 9393,17 ± 973,71 |
| 4L-1 | 4 x 37,5mm | 22,29 | 59,38 | 13689,69 |
| 4L-2 | 4 x 37,5mm | 18,50 | 46,22 | 11476,54 |
| 4L-3 | 4 x 37,5mm | 28,34 | 15,11 | 14677,21 |
| 4L-4 | 4 x 37,5mm | 36,42 | 22,82 | 13201,94 |
| 4L-5 | 4 x 37,5mm | 27,30 | 15,45 | 15052,24 |
| Média | | 26,57 ± 6,78 | 31,79 ± 19,97 | 13619,53 ± 1409,17 |
| 5L-1 | 5 x 30,0mm | 28,17 | 20,01 | 13211,10 |
| 5L-2 | 5 x 30,0mm | 41,82 | 44,08 | 10661,56 |
| 5L-3 | 5 x 30,0mm | 32,53 | 22,92 | 12100,67 |
| 5L-4 | 5 x 30,0mm | 41,00 | 32,91 | 12441,56 |
| 5L-5 | 5 x 30,0mm | 40,41 | 23,89 | 16093,63 |
| Média | | 36,79 ± 6,09 | 28,76 ± 9,83 | 12901,70 ± 2009,71 |
| 6L-1 | 6 x 25,0mm | 32,11 | 22,79 | 11462,52 |
| 6L-2 | 6 x 25,0mm | 48,02 | 31,42 | 16076,94 |
| 6L-3 | 6 x 25,0mm | 47,50 | 39,97 | 14286,93 |
| 6L-4 | 6 x 25,0mm | 33,62 | 24,04 | 13185,15 |
| 6L-5 | 6 x 25,0mm | 40,03 | 28,12 | 14534,24 |
| Média | | 40,26 ± 7,47 | 29,27 ± 6,89 | 13909,16 ± 1713,40 |

A partir dos dados tabelados, observou-se que os grupos 3L e 4L apresentaram médias relativamente baixas quanto as suas resistências, no entanto isso se deve, em grande parte, a problemas ocorridos durante a confecção destes grupos, pois devido às dimensões de suas lâminas e os excessos de sinuosidades que as mesmas apresentaram, o método de prensagem adotado não se mostrou eficiente para esses grupo. Dessa maneira ocorreram pontos em que o adesivo não manteve o devido contato com a face da lâmina, e por consequência a má colagem gerou áreas de acumulo de tensões, que resultaram em rupturas precoces nas peças.

Mesmo apresentando problemas de confecção, os grupos 3L e 4L obtiveram amostras com valores satisfatórios de resistência, dessa forma permitindo junto aos demais modelos,



compará-los ao grupo de vigas maciças através da análise de variância (ANOVA) e dessa forma averiguar com 95% de confiança, se as médias de grupos observadas apresentam diferenças estatisticamente significativas para a pesquisa.

As tabelas de 7 á 10 mostram os resultados gerados da ANOVA, comparando as cargas máximas de cada grupo de MLC com o grupo de vigas maciças.

Tabela 7. ANOVA de carga de ruptura para os grupos 1L e 3L

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 3394414 | 1 | 3394414 | 5,038219 | 0,055029 | 5,317655 |
| Dentro dos grupos | 5389864 | 8 | 673733 | | | |
| Total | 8784278 | 9 | | | | |

Tabela 8. ANOVA de carga de ruptura para os grupos 1L e 4L

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 910832,4 | 1 | 910832,4 | 2,463565 | 0,155154 | 5,317655 |
| Dentro dos grupos | 2957771 | 8 | 369721,4 | | | |
| Total | 3868603 | 9 | | | | |

Tabela 9. ANOVA de carga de ruptura para os grupos 1L e 5L

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 479347,2 | 1 | 479347,2 | 1,482066 | 0,25814 | 5,317655 |
| Dentro dos grupos | 2587454 | 8 | 323431,7 | | | |
| Total | 3066801 | 9 | | | | |

Tabela 10. ANOVA de carga de ruptura para os grupos 1L e 6L

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 1566972 | 1 | 1566972 | 3,726014 | 0,089681 | 5,317655 |
| Dentro dos grupos | 3364393 | 8 | 420549,2 | | | |
| Total | 4931366 | 9 | | | | |

Através da análise de variância, foi possível atestar que não houve diferenças estatísticas significativas entre os modelos de vigas de MLC em relação às vigas maciças. Também é possível observar através das tabelas, que o modelo 3L, ainda que satisfatório, mostrou o menor grau de semelhança entre os conjuntos comparados ao modelo 1L. Tal resultado se atribui, em grande parte, pelas falhas de confecção, as quais vieram a reduzir suas resistências. Pode-se então supor que em outro cenário, os dados relativos a este modelos,



quando executados com técnicas mais aprimoradas, poderiam se mostrar superiores aos até então apresentados e dessa forma o grau de semelhança entre os modelos consequentemente se elevaria.

A Figura 13 apresenta o gráfico de Boxplot para as cargas de rupturas das vigas na unidade de medida de kN, através dele é possível analisar a evolução das resistências que ocorreram conforme se elevou a quantidade de lâminas e, consequentemente, a de linhas de cola, mostrando então uma tendência de crescimento dos valores de resistência, diretamente relacionado ao número de linhas de cola que venha a constituir a peça de MLC. É possível observar também nesse gráfico, que embora tenha apresentados maiores valores em relação à resistência, o modelo 6L também veio a apresentar a maior dispersão de resultados entre os modelos apresentados neste trabalho.

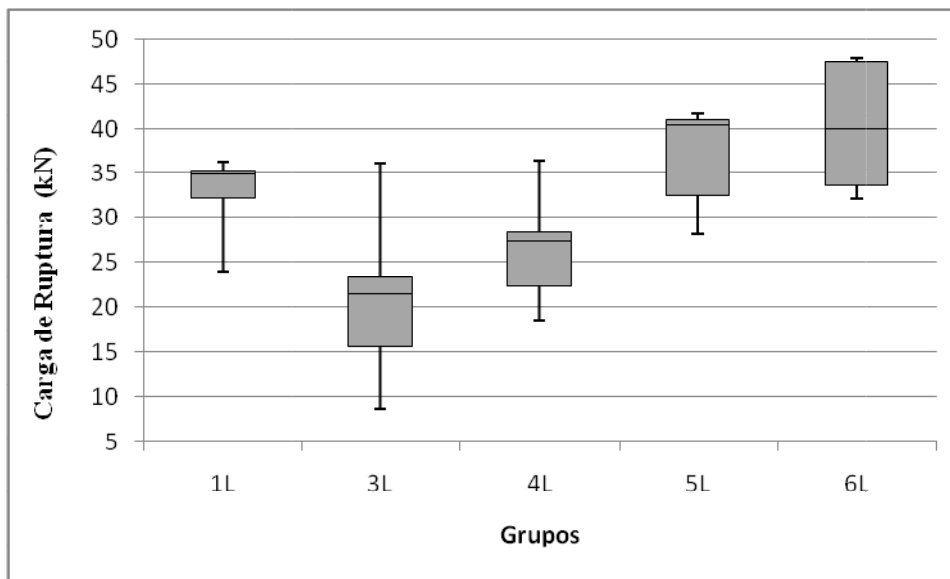


Figura 13. Gráfico Boxplot para cargas de ruptura em kN.

Após a análise de carga de ruptura das vigas, executaram-se os mesmos procedimentos de ANOVA para comparar os modelos de MLC com o modelo de viga maciça, através dos módulos de elasticidade que as mesmas apresentaram nos ensaios. As Tabelas de 11 a 14 mostram os resultados obtidos nesse processo.



Tabela 11. ANOVA de módulo de elasticidade entre modelos de viga 1L e 3L.

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 11789799 | 1 | 11789799 | 2,148471 | 0,180881 | 5,317655 |
| Dentro dos grupos | 43900242 | 8 | 5487530 | | | |
| Total | 55690041 | 9 | | | | |

Tabela 12. ANOVA de módulo de elasticidade entre modelos de viga 1L e 4L.

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 10554886 | 1 | 10554886 | 1,7572868 | 0,2215657 | 5,3176551 |
| Dentro dos grupos | 48050827 | 8 | 6006353,3 | | | |
| Total | 58605712 | 9 | | | | |

Tabela 13. ANOVA de módulo de elasticidade entre modelos de viga 1L e 5L.

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 4468367 | 1 | 4468367 | 0,635349 | 0,448408 | 5,317655 |
| Dentro dos grupos | 56263497 | 8 | 7032937 | | | |
| Total | 60731864 | 9 | | | | |

Tabela 14. ANOVA de módulo de elasticidade entre modelos de viga 1L e 6L.

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 13740205 | 1 | 13740205 | 2,119963 | 0,183484 | 5,317655 |
| Dentro dos grupos | 51850738 | 8 | 6481342 | | | |
| Total | 65590943 | 9 | | | | |

A análise de variância entre as vigas de MLC com as maciças, através de seus módulos de elasticidade, também demonstraram não haver diferenças estáticas consideráveis. Os valores dessa nova análise mostraram que os resultados convergiram em maior grau em relação à análise de cargas de ruptura.

Observando o gráfico da Figura 14, visualizou-se uma baixa diferença de dispersão entre os modelos. Diferente da análise de cargas, os módulos de elasticidade não apresentaram tendências em relação às quantidades de lâminas e linhas de cola, no entanto o grupo 3L novamente apresentou os menores valores e dessa vez, foi o único grupo a mostrar médias inferiores às vigas maciças, ao mesmo tempo em que fora a que apresentou a menor dispersão de resultados. Os motivos que levaram a obter estes resultados pouco lineares não foram minuciosamente investigados, no entanto é possível afirmar que o excesso de umidade contribuiu para as instabilidades de comportamento mecânico do material analisado.

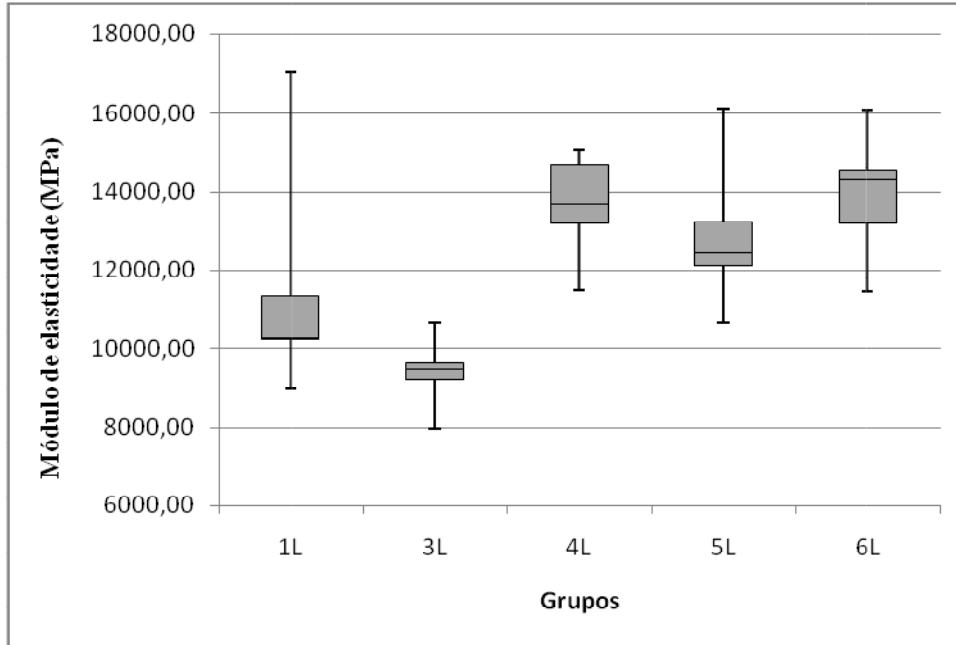


Figura 14. Gráfico Boxplot para módulo de elasticidade em MPa.

Embora visto que as vigas de MLC não tenham apresentado diferenças em relação às maciças, as Tabelas 15 e 16 apresentam os resultados da ANOVA entre grupos de melhor e pior desempenho, respectivamente o 6L e 3L, analisando se há entre as vigas laminadas, variações significativas quanto às cargas máximas de ruptura e módulo de elasticidade.

Tabela 15. ANOVA da carga de ruptura entre modelos de viga 3L e 6L

| Fonte da variação | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 9573957 | 1 | 9573957 | 11,49276 | 0,009499 | 5,317655 |
| Dentro dos grupos | 6664342 | 8 | 833042,7 | | | |
| Total | 16238299 | 9 | | | | |

Tabela 16. ANOVA de módulo de elasticidade entre modelos de viga 3L e 6L

| Fonte da variação | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 30774521 | 1 | 30774521 | 12,34179 | 0,0079257 | 5,3176551 |
| Dentro dos grupos | 19948174 | 8 | 2493521,7 | | | |
| Total | 50722695 | 9 | | | | |



Observa-se que, tanto as cargas máximas de ruptura quanto os módulos de elasticidade não convergiram entre si, podendo-se entender que são vigas com diferenças estatisticamente significantes em relação a suas resistências mecânicas.

Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados aos de Marquardt (2017), que utilizou o mesmo adesivo rígido desta pesquisa, e de Fontana(2019), que fez o uso de adesivo flexível, ambos utilizaram a madeira de *Pinus Elliottii*. Através das cargas de ruptura, observou-se que as vigas de MLC, confeccionadas com o adesivo rígido e maior quantidade de lâminas, apresentaram médias superiores as maciças. Opostamente veio a ocorrer quando fora utilizado adesivo flexível para a união das peças, neste caso, as vigas com maiores quantidades de lâminas apresentaram resistências inferiores as vigas maciças. Em todos estes trabalhos, não se comprovou estatisticamente as diferenças entre os grupos de vigas laminadas e as maciças.

Conclusão

Com os resultados obtidos e analisados neste trabalho, pôde-se concluir que a variação na espessura de lâmina entre 25 e 50 mm, para a confecção de vigas de MLC, não apresentaram diferenças estatísticas significativas para a carga máxima e módulo de elasticidade, quando comparadas a uma viga maciça de mesmas dimensões. Porém observou-se que o aumento da quantidade de lâminas e linhas de cola, auferiu relação direta com o aumento da resistência de carga das vigas de MLC, demonstrando diferenças entre as peças laminadas quando comparadas entre si. O aumento da rigidez relacionado a quantidade de adesivo rígido não se comprovou, dado que o grupo 4L apresentou médias de rigidez superiores ao grupo 5L, e entre essas, a segunda apresentava uma volume superior do produto em sua composição.

Considerando o acréscimo de resistência, a economia gerada e a dificuldade da prensagem através do sistema adotado neste trabalho, o grupo de viga 5L se mostrou o mais indicado para tal função, no entanto, em nível industrial onde se obtém um controle maior de qualidade de produção, visando economia, agilidade e segurança, é possível optar pelo grupo 3L para a fabricação de vigas com madeira laminada colada.



Referências

- AMERICAN NATIONAL STANDART. Standart for wood Products – Structural Glued Laminated Timber: **ANSI A190.1**. Nova Iorque, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7190** Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/arthurhgz/abnt-nbr-7190-projetos-de-estrutura-de-madeira>>. Acesso em: 08 nov. 2019.
- BOHN, Adolar Ricardo. **Influência da espessura das lâminas e da cola na madeira laminada colada**. 1995. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/76212>>. Acesso em: 25 out. 2019.
- CALIL, C. Jr.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Editora Manole Ltda, Barueri – SP, 2003. 152 P.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Gluedlaminated timber – Performance requirements and minimum production requirements: **DIN EN 386**, 2001.
- FONTANA, Rafael Duminelli. **Análise da resistência à flexão das vigas de madeira laminada colada (MLC) com variação das espessuras das lâminas**. 2019. 14 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/7138/1/RafaelDuminelliFontana.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2019
- GRAEFF, A. Estudo comparativo da influência dos entalhes múltiplos em vigas de madeira laminada-colada. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA,5.,1995, Belo Horizonte. **Anais. v. 3, p.587-611**. Minas Gerais: V EBRAMEM, 1995.
- ICIMOTO, Felipe Hideyoshi; NETO, Carlito Calil; FERRO, Fabiane Salles; et al. Influence of lamellar thickness on strength and stiffness of glued laminated timber beams of Pinus oocarpa. **International Journal of Materials Engineering**, Rosemead, CA, USA, p. 51-55, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5923/j.ijme.20160602.05>> DOI: 10.5923/j.ijme.20160602.05. Acesso em: 08 nov. 2019
- MARQUARDT, Lucas. **Análise da resistência à flexão de vigas de madeira laminada colada com diferentes espessuras de lâminas**. 2017. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/5917/1/LucasMarquardt.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2019.
- NETO, Carlito Calil, et al. **Avaliação da resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada**. *Ciênc. Florest.* [online]. 2014, vol.24, n.4, pp.989-996. ISSN 0103-9954. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1980-509820142404018>>. Acesso em 08 nov. 2019.

NETO, Carlito Calil. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento-preservativo**. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

OLIVEIRA, Adailton Rogério de; ALBINO, Karin Maciel. Análise estrutural de vigas de madeira laminada colada. **Revista da Madeira**, São Paulo, p.1-1, nov. 2011. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1562&subject=L%E2minas&title=An%E1lise%20estrutural%20de%20vigas%20de%20madeira%20laminada%20colada>. Acesso em: 08 nov. 2019.

RIBEIRO, F. A.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de *Eucalyptus* spp. **Revista IPEF**, n. 46, p. 76-85, 1993.