

Viabilidade do uso de madeira clonal de *Eucalyptus urophylla* de rápido crescimento para produção de madeira lamelada colada (MLC) com adesivo poliuretano à base de mamona

Feasibility of using clonal timber of fast growing *Eucalyptus urophylla* for the production of glulam with castor bean based polyurethane adhesive

Melissa Lago de Jesus Silveira Silva¹ , Marcus Vinícius Fraga Lobo¹, Rita Dione Araújo Cunha¹, Sandro Fábio César¹

¹Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Laboratório de Madeiras. Salvador, BA, Brasil.

e-mail: melissalago27@gmail.com, lobo-marcus@outlook.com, ritadi@uol.com.br, sfcesarpaz@uol.com.br

RESUMO

A Madeira Lamelada Colada (MLC) é uma alternativa viável para o aproveitamento racional da madeira, possibilitando o uso de madeiras jovens. Ainda, ao engenheirar a madeira, pode-se viabilizar o uso de troncos de menor qualidade e menor diâmetro. Entretanto, o desempenho do produto depende da espécie utilizada, das espessuras e posições das lamelas, do tipo de adesivo, do desempenho da colagem. Este trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade do uso de uma madeira de rápido crescimento para a produção de MLC. A espécie de madeira selecionada foi *Eucalyptus urophylla*, clonal COP 1404, que se caracteriza por ter rápido crescimento e por ter uma lacuna em estudos que visam sua aplicação na construção civil. Empregou-se o adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo mamona. O programa experimental teve como foco a caracterização da madeira in natura e o desempenho mecânico da MLC comparada à madeira maciça, empregando métodos estatísticos para a análise de resistência dos protótipos. Os resultados indicaram que o adesivo foi eficiente na colagem da madeira, de modo que o cisalhamento ocorreu na madeira, além da verificação à flexão ter mostrado comportamento de um corpo único, não tendo pontos de descontinuidade por conta da linha de cola.

Palavras-chave: clone COP 1404; madeira engenheirada; cisalhamento; flexão.

ABSTRACT

Glulam is a viable alternative for the rational use of wood, allowing the use of young timber. Also, when engineering the timber, it is possible to use lower quality trunks with a smaller diameter. However, the performance of the product depends on the species used, the thickness and position of the lamellae, the type of adhesive, the bonding performance. This work aimed to study the feasibility of using a fast growing timber for the production of glulam. The selected timber species was *Eucalyptus urophylla*, clonal COP 1404, which is characterized by its fast growth and lack of studies regarding its application in civil construction. A two-component polyurethane adhesive based on castor oil was used. The experimental program focused on the characterization of fresh timber and the mechanical performance of glulam compared to solid wood, using statistical methods to analyze the resistance of the prototypes. The results indicated that the adhesive was efficient in gluing the timber, so that shearing occurred in the timber, in addition to the flexural verification showing behavior of a single body, with no points of discontinuity due to the glue line.

Keywords: clone COP 1404; engineered timber; shear; flexion.

1. INTRODUÇÃO

A Madeira Lamelada Colada (MLC) se constitui como alternativa viável para o aproveitamento racional da madeira, já que possibilita o uso de madeiras jovens (de 5 a 20 anos) de florestas plantadas e espécies de rápido crescimento que são consideradas madeiras de qualidade inferior àquelas com idade mais avançada ou nativas.

Segundo a ABNT NBR 7190 [1], esse produto engenheirado para fins estruturais consiste em peças de madeira obtidas através de processo de fabricação industrializado, por meio da colagem de lamelas dispostas paralelamente ao eixo longitudinal da peça final.

O desenvolvimento de novas tecnologias e processos de produção viabilizam o uso de madeiras de rápido crescimento, aumentando o valor comercial de troncos de menor qualidade e menor diâmetro, além de aproveitamento de resíduos de madeira anteriormente subutilizados [2].

O desempenho da madeira lamelada colada depende da colagem dos elementos em diversas configurações. Os sistemas adesivos mais utilizados para colar este produto engenheirado são à base de melamina ureia formaldeído (MUF), melamina-formaldeído (MF), fenol resorcinol formaldeído (FRF), poliuretanos e isocianato de polímero de emulsão (EPI), resinas [3]. BALMORI *et al.* [4] afirmam que a força das ligações adesivas é limitada pela força da própria madeira, sendo a falha na madeira considerada a resposta de ligação ideal.

Estudos internacionais apresentam uso de madeiras de rápido crescimento para produção da madeira lamelada colada cuja faixa de densidade está entre 300 kg/m³ e 500 kg/m³ [4–9]. Tais estudos atestam o desempenho dessas espécies para uso em MLC, de modo que o processo de laminação uniformiza os defeitos decorrentes da madeira de rápido crescimento.

Os elementos de madeira lamelada colada que são produzidos no Brasil são oriundos de madeira de reflorestamento, dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, visto que apresentam matéria-prima com boas características e possuem rápido crescimento, comparados com espécies nativas do Brasil [10]. A NBR 7190 [1] estabelece que as lamelas empregadas na composição da MLC devem ter densidade aparente ($U = 12\%$) entre 400 kg/m³ e 750 kg/m³. Além disso, a norma orienta que deve ser evitada a composição de um mesmo elemento de MLC com espécies distintas, ou que apresentem diferentes coeficientes de retração.

Dentre as etapas do processo de fabricação, a colagem se destaca como parte do processo fundamental para garantir a qualidade superior desses produtos de madeira que pode variar devido à alta variabilidade da madeira como substrato, como também a inúmeros fatores relacionados ao próprio processo de colagem [3]. Conforme os autores, a escolha do adesivo é fundamentada no custo, na espécie de madeira e na classe de serviço prevista para o produto, atendendo aos parâmetros do Eurocódigo 5.

A ligação adesiva é diretamente influenciada pelas propriedades da madeira, fato que explica as folhosas apresentarem mais dificuldade de colagem em relação às coníferas, visto que as principais propriedades que interferem no processo de construção e desempenho da ligação adesiva são as propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas [11]. RAFTERY e RODD [6] utilizaram a espécie *Abeto sitka* (*Sitka spruce*) para produzir peças de MLC, WANG *et al.* [12] empregaram o Álamo de rápido crescimento para a produção de MLC, BALMORI *et al.* [4] utilizaram o Álamo do clone (*Populus × euroamericana I-214*), todas as espécies com baixa densidade. BIANCHE *et al.* [11] empregaram o *Eucalyptus sp* para avaliar a resistência ao cisalhamento na linha de cola, utilizando o poliuretano bicomponente à base de mamona, obtendo 77,64 kgf/cm² para a gramatura de 200 g/m².

A norma brasileira NBR 7190 [1] orienta que a quantidade de adesivo e os demais parâmetros de colagem devem seguir especificações dos fabricantes do adesivo. CALIL NETO [13] recomenda para o adesivo poliuretano, por exemplo, uma quantidade de adesivo por linha de cola de aproximadamente 200 g/m², obtendo-se uma colagem de alta qualidade condicionada a uma pressão exercida e bem definida. JESUS [14] já apontava uma pressão de colagem de 0,7 MPa para madeiras de densidade menor ou igual a 500 kg/m³ e 1,2 MPa para densidades maiores. Atualmente, a NBR 7190-1 [1], no item 6.7.4.8.4 indica os mesmos parâmetros relativos à pressão de colagem.

Com esse panorama, avaliou-se a viabilidade do uso de uma madeira proveniente de floresta plantada brasileira de rápido crescimento, clone COP 1404, levando-se em consideração os parâmetros de produção da madeira lamelada colada estabelecidos na NBR 7190 [1], avaliando também a eficiência da colagem feita com o adesivo poliuretano à base de mamona na superfície da madeira.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A madeira empregada nesta pesquisa foi da espécie clonal de *Eucalyptus urophylla* COP 1404, originada do plantio em Araçás, na Bahia, da empresa CM Venturoli, sendo utilizadas 26 toras de um lote de 32 toras de 3,5 m de comprimento, cujo diâmetro médio de topo foi de 12 cm e base de 15 cm, com idade entre 7 e 10 anos.

2.1. Caracterização da madeira in natura

Da madeira em tora, foram retirados corpos de prova (CP's) com dimensões de 2,0 cm × 3,0 cm × 5,0 cm, para os ensaios de caracterização física, conforme orienta o documento 3 da norma brasileira NBR 7190-3 [15]. Para a caracterização física da madeira foram feitos os ensaios de umidade, densidade e estabilidade dimensional.

2.2. Produção e secagem de lamelas

Após o desdobro do clone *Eucalyptus urophylla* COP 1404, as lamelas foram submetidas a secagem ao ar em ambiente protegido dos raios solares diretos e do vento natural. Ao atingir umidade abaixo de 30%, as lamelas foram submetidas à secagem forçada, para alcançar a umidade ideal para a colagem das lamelas. Para acompanhar a secagem das lamelas, utilizou-se o medidor de umidade por contato modelo DUC 2050 Digisystem.

Em seguida, a classificação da madeira foi feita por meio dos procedimentos descritos na NBR 7190-2 [16], classificando-se visualmente cada peça, avaliando o tamanho de nós, fissuras e distorções dimensionais. A classificação pelo módulo de elasticidade de 40 lamelas com espessuras de 2 cm e 3 cm, se deu através de ensaio não destrutivo de flexão, no regime elástico-linear do diagrama força × deslocamento, no intervalo de 10% a 40% da força máxima.

2.3. Fabricação das peças de MLC

Para a montagem das peças de madeira lamelada colada (MLC) foi utilizado o adesivo poliuretano bicomponente isocianato polimérico tipo MDI (IC 200 – componente A) e Polioli Bio para aglomerante de poliuretano (KDG 1909 – componente B) fabricado pela Kehl Indústria e Comércio Ltda.

A relação de mistura do adesivo seguiu as recomendações do fabricante, sendo Polioli Bio para aglomerante de poliuretano (componente B) e isocianato polimérico tipo MDI (componente A) na proporção igual a 2:1. O adesivo foi aplicado em duas faces das lamelas. A Figura 1 apresenta o processo de colagem de lamelas.



Figura 1: Processo de colagem.

Para a fabricação da madeira lamelada colada foram levados em consideração aspectos preparatórios da madeira e parâmetros de colagem e prensagem. Tais parâmetros empregados nesta pesquisa são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros para a produção da MLC.

1	Teor de umidade	15%
2	Tipo de adesivo	Poliuretano
3	Quantidade de adesivo	225 g/m ²
4	Proporção de mistura	2:1
5	Pressão de colagem	0,7 MPa
6	Tempo de prensagem	18 h
7	Tempo de cura	Mín. 8 dias

Considerou-se duas espessuras de lamelas, de 2 cm e de 3 cm e foram produzidos dois tipos de peças, um com a colagem de lamelas com espessuras diferentes, com o objetivo de retirar corpos de prova com configurações do ensaio de cisalhamento proposto pelo documento 3 da NBR 7190 [15] e o outro com duas lamelas de 2 cm para o ensaio de flexão de 4 pontos descrito pelo documento 4 da NBR 7190 [17].

Depois da colagem, as peças foram prensadas por meio de uma prensa manual (Figura 2), com quatro pontos de aplicação de pressão, utilizando-se um torquímetro, cujo torque foi de 88,2 N.m. Após o tempo da prensagem, as peças foram ajustadas na serra circular. Em seguida, fez-se os cortes dos corpos de prova referentes a cada ensaio.

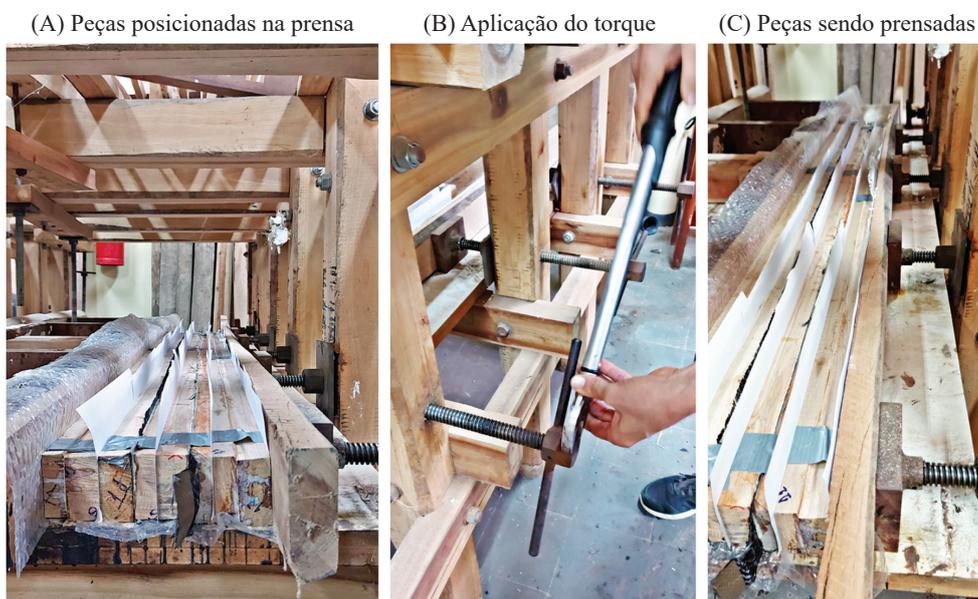


Figura 2: Processo de prensagem.

A avaliação da colagem da espécie utilizada foi feita através da comparação do desempenho mecânico da madeira maciça com a madeira lamelada colada.

2.4. Caracterização mecânica da MLC

A partir das peças de MLC, foram retirados corpos de prova para o ensaio de cisalhamento na linha de cola, cisalhamento paralelo às fibras e flexão de 4 pontos e módulo de elasticidade. O comprimento das peças em que os corpos de prova foram retirados variou, conforme o melhor aproveitamento das lamelas, tendo comprimentos de 1,70 m, 1,60 m e 1,50 m. Sendo assim, foram extraídos 84 corpos de prova, sendo 24 para o ensaio de cisalhamento do maciço e 24 na lâmina de cola, 24 para o cisalhamento paralelo às fibras e 12 para flexão de 4 pontos da MLC.

O ensaio de cisalhamento para madeira maciça e na linha de cola da madeira lamelada colada (MLC) baseou-se no documento 3 da NBR 7190 [15], com corpos de prova de mesmas dimensões indicadas nessa norma.

Os ensaios de cisalhamento paralelo às fibras e de flexão foram realizados com base na norma NBR 7190-4 [17]. Os corpos de prova de flexão foram de seção de 4 cm × 4 cm, com vão de 72 cm, com carregamento em dois pontos. Já os corpos de prova de cisalhamento foram de seção 4 cm × 4 cm, com comprimento de 32 cm, com carga concentrada no meio do vão.

Os dados obtidos foram avaliados estatisticamente com o objetivo de comparar as médias das resistências obtidas através dos ensaios do maciço e da MLC, observando se apresentavam diferenças significativas a um nível de significância de 5%. Inicialmente partiu-se da hipótese nula (H_0), cuja população possui distribuição normal, sendo tal hipótese aferida pelo teste de *Shapiro-Wilk*.

Em seguida, os dados obtidos foram tratados estatisticamente por meio da análise de variância ANOVA (fator único) que verificou se existiu diferença significativa de uma medida entre três ou mais grupos. Quando houve diferença de pelo menos um dos grupos, testes de comparações múltiplas precisaram ser feitos, e, neste caso, foi aplicado o teste de *Tukey*. Os resultados obtidos da madeira maciça foram comparados aos da madeira lamelada colada.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização física

Os coeficientes de retração médios, longitudinal, radial e tangencial foram 0,26%, 4,63% e 5,57%, respectivamente. Os coeficientes de inchamento foram: 0,23% (longitudinal), 6,57% (radial) e 7,8% (tangencial). A densidade básica foi de 465,16 kg/m³.

3.2. Classificação da madeira

A densidade média (ρ_m) das peças (2 cm) a 12% de umidade foi de 552,09 kg/m³ e a densidade característica (ρ_k) igual a 487,10 kg/m³. O módulo de elasticidade médio (E_m) foi de 12.053 MPa, o módulo a 12% de umidade ($E_{12\%}$) foi de 13.009 MPa e o módulo característico (E_k) foi de 7.376 MPa.

Segundo critérios de classes de resistência apresentados no documento 1 da NBR 7190 [1] para folhosas, as peças estruturais de 2 cm de espessura, de acordo com a densidade característica ($\rho_k = 487,10 \text{ kg/m}^3$), podem ser classificadas como D24 ($\rho_k = 485 \text{ kg/m}^3$). Com base no módulo de elasticidade médio, a classificação é D40 e pelo módulo de elasticidade característico, D18.

A densidade média (ρ_m) das peças de 3 cm a 12% de umidade foi de 553,4 kg/m³ e a densidade característica (ρ_k) 488,1 kg/m³. O módulo de elasticidade médio (E_m) foi de 13.676 MPa, o módulo a 12% de umidade ($E_{12\%}$) foi de 14.842 MPa e o módulo característico (E_k) foi de 11.192 MPa.

De acordo com os critérios de classes de resistência apresentados na Tabela 3 da NBR 7190-1 [1] para folhosas, as peças estruturais de 3 cm de espessura, de acordo com a densidade característica ($\rho_k = 488,05 \text{ kg/m}^3$), são classificadas como D24 ($\rho_k = 485 \text{ kg/m}^3$). A classificação pelo módulo de elasticidade médio é D50 e pelo módulo de elasticidade característico, D40.

3.3. Cisalhamento da linha de cola

A Tabela 2 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento (f_v) da madeira maciça e da linha de cola da MLC. A média das resistências na condição-padrão de umidade ($U = 12\%$) foi de 9,3 MPa, sendo a resistência característica de 8,3 MPa para o maciço. Para a MLC, a resistência média ($f_{12\%}$) foi de 8,6 MPa e a resistência característica (f_{wk}) de 6,7 MPa. Neste ensaio objetivou-se apenas a carga de ruptura.

Tabela 2: Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova maciço e da linha de cola da MLC.

CORPO DE PROVA	f_v , maciço (MPa)	f_v , MLC (MPa)
1	6,3	6,6
2	7,9	6,8
3	7,8	6,8
4	8,1	6,9
5	8,4	7,0
6	8,4	7,3
7	8,5	7,4
8	8,8	7,4
9	9,0	7,8
10	9,2	7,9
11	9,1	7,9
12	9,1	8,0
13	9,3	8,5
14	9,3	8,8
15	9,6	9,0
16	10,0	9,3
17	10,0	9,5
18	10,2	9,6
19	10,5	9,7
20	10,3	9,6
21	10,7	9,9
22	10,8	10,1
23	11,1	10,1
24	11,1	10,4
Média	9,3	8,4
Desvio padrão	1,2	1,2
Coef. de variação (%)	12,7	14,8
Resis. Característica	8,3	6,7

Segundo a Tabela 2 – Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos, do documento 1 da NBR 7190 [1], para a classe D40 de resistência de espécies de florestas nativas, a resistência característica ao cisalhamento é igual a 6 MPa. Todavia, a resistência característica do clone COP 1404 foi de 8,3 MPa, tendo um aumento percentual de 38,3% em relação ao valor de referência da norma para classe D40. As rupturas do maciço se caracterizaram por deslizamento das fibras na direção da aplicação da força.

Comparando-se a MLC com o maciço, notou-se uma redução percentual da resistência média ($f_{12\%} = 8,6$ MPa) de 32,3% em relação à média da resistência ao cisalhamento do maciço ($f_{12\%} = 12,7$ MPa). E uma redução de 19,3% da resistência característica ($f_{wk} = 6,7$) da MLC em relação ao maciço ($f_{wk} = 8,3$).

A análise de variância ANOVA indicou que os resultados de cisalhamento da MLC não apresentaram diferenças estatisticamente significativas em relação aos resultados de cisalhamento do maciço, cujo valor de F (3,74) dado pela análise estatística ANOVA, foi menor do que o valor de F crítico (4,04), resultando na inexistência de diferença estatística.

O ensaio de cisalhamento comprovou a eficiência da cola, uma vez que o CP se comportou como um CP maciço, tendo a ruptura ocorrido na madeira (Figura 3). Além disso, a classificação visual das lamelas permite uma seleção das peças e uma melhor uniformização dos defeitos.

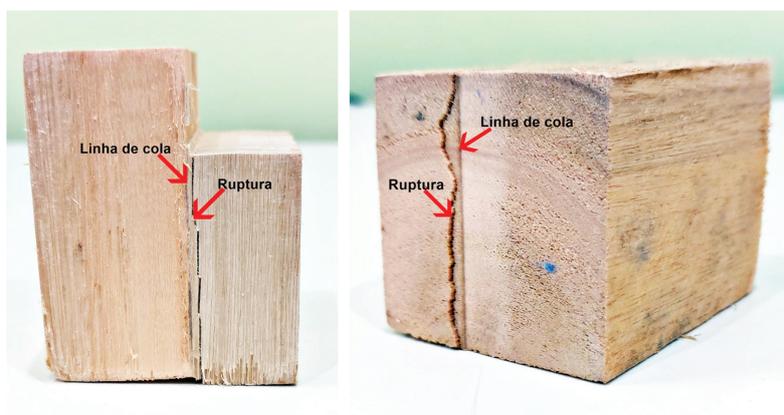


Figura 3: Corpo de prova de MLC rompido ao cisalhamento paralelo às fibras.

3.4. Cisalhamento paralelo às fibras

Os resultados de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_v) do maciço e da MLC, realizado conforme documento 4 da NBR 7190 [17] são apresentados na Tabela 3. O valor médio da resistência na condição-padrão de umidade ($U = 12\%$) foi de 6,6 MPa para o maciço e 6,9 MPa para a MLC. Neste ensaio objetivou-se apenas a carga de ruptura.

Tabela 3: Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras do maciço e da MLC.

CORPO DE PROVA	f_v , maciço (MPa)	f_v , MLC (MPa)
1	5,7	7,6
2	5,7	6,9
3	6,1	6,6
4	6,4	5,9
5	6,4	5,8
6	6,7	6,9
7	6,7	8,5
8	6,8	6,1
9	6,8	6,0
10	7,0	7,2
11	7,1	7,6
12	7,4	7,9
Média	6,6	6,9
Desvio padrão	0,5	0,9
Coef. de variação (%)	8,1	12,6

Comparando-se o valor médio de 6,6 MPa do CP maciço (sem linha de cola) obtido pelo documento 4 da NBR 7190 [15] com o resultado obtido por meio do ensaio de cisalhamento, conforme documento 3 da NBR 7190 [15], cuja média foi 9,3 MPa, percebe-se uma redução percentual de 30%.

Comparando com a média da resistência ao cisalhamento obtida pelo documento 3 da NBR 7190 [15] para a MLC de 8,4 MPa, houve uma redução percentual de 17%. A ruptura tanto do maciço quanto da MLC se caracterizou por tração nas fibras inferiores, localizada na parte central do corpo de prova.

3.5. Flexão de 4 pontos

A Tabela 4 apresenta os resultados de resistência à flexão (f_m) da MLC e resultados de resistência e módulo de elasticidade. O tempo médio até a ruptura dos corpos de prova foi de 3 minutos e 5 segundos. A resistência média à flexão (E_0) foi de 71,9 MPa e média do módulo de elasticidade de 6 corpos de prova foi 12.862 MPa.

Tabela 4: Resistência à flexão dos corpos de prova de MLC.

CORPO DE PROVA	f_m (MPa)	E_0 (MPa)
1	54,3	–
2	55,7	–
3	58,4	–
4	64,1	10330
5	64,1	11410
6	65,7	–
7	66,0	–
8	70,9	11652
9	81,0	16567
10	84,4	13104
11	94,5	14107
12	104,1	–
Média	71,9	12862
Desvio padrão (%)	15,8	2250
Coef. de variação (%)	21,9	18

A Figura 4 apresenta os resultados das cargas (N) e dos deslocamentos verticais (mm) no meio do vão até 70% da carga de ruptura, considerando a fase elástica no intervalo de 10% e 40%. Pela configuração do corpo de prova foi possível medir a deformação pela tensão.

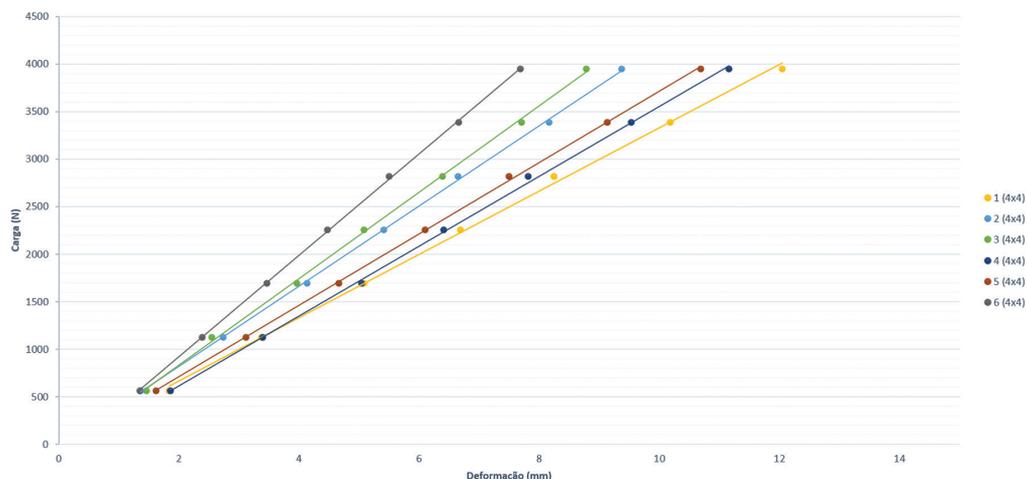


Figura 4: Gráfico deformação \times força dos corpos de prova de MLC.

Observa-se um comportamento linear de deflexão de carga, cuja falha típica foi de tração na parte inferior.

4. DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da madeira in natura

Os valores médios da densidade básica ficaram entre os valores mínimo e máximo encontrados por SILVA [18] de 423 kg/m³ e 552 kg/m³, respectivamente, e ficou próximo da densidade encontrada para o clone COP 1404 do estudo de PAULINO e LIMA [19], de 470 kg/m³.

Além disso, a densidade básica (465,16 kg/m³) está próxima de densidades de espécies utilizadas para produção da madeira lamelada colada (MLC), como o Abeto da Noruega (*Picea abies*) com densidade 476 kg/m³ [7], o Abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) 480 kg/m³ [20], o *Pinus sylvestris* com densidade 475 kg/m³, e o Álamo de rápido crescimento 325 kg/m³ [12].

Com relação ao coeficiente de anisotropia, a madeira estudada apresentou valor inferior a 1,5, que, segundo os autores SERPA e VITAL [21], indica ser uma madeira estável.

4.2. Classificação da madeira

O módulo de elasticidade médio encontrado pela classificação mecânica ficou próximo ao de outras espécies empregadas na produção da MLC, como os valores de 9.800 MPa para o *Pinus sylvestris* [8], 9.760 MPa para o Álamo de rápido crescimento [22], e 10.434 MPa para o *Pinus elliottii* [23].

O documento 1 da NBR 7190 [1] orienta que a madeira de lamelas para formar peças de madeira colada deve ter densidade aparente ($U = 12\%$) entre 400 kg/m³ e 750 kg/m³. Sendo assim, pode-se afirmar que as densidades a 12% de umidade das peças estão dentro do intervalo descrito pela norma, podendo ser aplicada para a produção de peças de madeira lamelada colada.

4.3. Cisalhamento na linha de cola

Comparando-se os resultados, observa-se que a resistência média ($f_{12\%} = 8,6$ MPa) do lamelado colado da espécie clonal COP 1404 com adesivo poliuretano foi praticamente a mesma encontrada no estudo de NADIR e NAGARAJAN [24] (8,59 MPa) para o lamelado colado feito com a madeira de borracha com 20 anos de idade. Já para o maciço, as resistências médias ficaram próximas ($f_{12\%} = 12,7$ MPa), sendo a do COP 1404 5,6% menor em relação à madeira de borracha.

Tais autores avaliaram a ligação adesivo/madeira através da força de cisalhamento, a resistência ao cisalhamento para a madeira de borracha (*Hevea brasiliensis*, densidade 605 kg/m³) com o adesivo PVA foi de 8,59 MPa, com porcentagem de falha na madeira de 99,7%, já o maciço (amostra de controle) teve resistência de 13,45 MPa.

Os valores encontrados também foram compatíveis com BIANCHI [25] que encontrou para o mesmo adesivo poliuretano bicomponente, usado nessa pesquisa, uma resistência variando de 6 a 8 MPa. Ainda, BIANCHI *et al.* [11] obtiveram para o mesmo adesivo 7,6 MPa de resistência ao cisalhamento na linha de cola para a gramatura de 200 g/m² e 8,1 MPa para a gramatura de 250 g/m².

Em relação a classe de resistência, o COP 1404 se enquadra na classe D40, cuja resistência característica foi de 8,3 MPa. As rupturas características do maciço foram caracterizadas pelo deslizamento das fibras na direção da aplicação da força.

4.4. Cisalhamento paralelo às fibras

A ruptura predominante obtida mediante ensaio de cisalhamento foi caracterizada por tração nas fibras inferiores, no meio do corpo de prova. Conforme MATOS e MOLINA [26], neste tipo de ruptura a madeira não esgota sua capacidade resistente ao cisalhamento. Ainda, os autores mencionaram que essa forma de ruptura foi predominante para a madeira de Eucalipto.

Tais autores [26] compararam resultados de resistência ao cisalhamento obtidos pela NBR 7190-3 [15] e pela norma europeia, cujo procedimento é o mesmo do documento 4 da ABNT NBR 7190 [17]. Para o *Eucalyptus saligna* com 12% de umidade, os autores encontraram uma diferença de 35%, sendo os valores obtidos pela norma brasileira maiores em relação aos valores encontrados por meio da norma europeia. Já para o *Pinus elliottii* a diferença foi maior (65%).

4.5. Flexão de 4 pontos

Observou-se um comportamento linear de deflexão de carga no ensaio de flexão, cuja falha típica foi de tração na parte inferior. O mesmo comportamento de ruptura foi relatado por BRUNETTI *et al.* [5] e por BASTERRA *et al.* [9] que também não observaram falhas de adesão encontradas na linha de cola.

Todavia, BASTERRA *et al.* [9] afirmaram que todas as vigas de MLC apresentaram comportamento essencialmente elástico linear até a ruptura, com a falha iniciando em defeitos ou irregularidades da madeira. Esse comportamento foi observado para os resultados apresentados.

Em relação ao módulo de elasticidade médio ($E_0 = 12.862$ MPa) obtido através do ensaio de flexão de 4 pontos foi próximo de valores encontrados para outras espécies empregadas na produção de MLC, como 9.800 MPa para o *Pinus sylvestris* [8], 9.760 MPa para o Álamo de rápido crescimento [22], 10.434 MPa para o *Pinus elliottii* [23].

A Figura 5 apresenta as rupturas típicas, cuja presença de defeitos (nós) em algumas peças de MLC influenciou na ruptura, de modo que ela se iniciou no defeito. As lamelas para compor a MLC foram escolhidas com base na classificação visual das peças, visto que tal classificação promove a seleção das peças. Todavia, por se tratar de madeira jovem com diâmetro da tora pequeno, não foi possível eliminar os defeitos e nem descartar as lamelas com a presença de nós em locais desfavoráveis, pois o descarte seria maior que o aproveitamento, prejudicando o cunho sustentável que a madeira favorece.



Figura 5: Rupturas dos corpos de prova à flexão de 4 pontos.

Sendo assim, existiam nós embaixo do carregamento à flexão, no bordo tracionado, o que influenciou na ruptura, uma vez que um nó presente no bordo inferior é a pior situação para uma viga bi apoiada com carregamento no bordo superior.

Mesmo assim, observou-se que com a laminação, os defeitos foram mais distribuídos, criando uma peça mais uniformizada, que é obtida por meio da classificação visual e mecânica da peça, de modo que é feita a seleção e melhor posicionamento de lamelas na seção transversal em função da sua classificação.

Esse aspecto promove a melhoria do produto engenheirado, conforme afirmam os autores NADIR e NAGARAJAN [24], cuja técnica de colagem é eficaz para reduzir ou eliminar as propriedades negativas das madeiras de florestas plantadas.

Além disso, é possível eliminar os defeitos através das emendas dentadas (*finger joint*), já que os nós interferem na resistência mecânica. Todavia, a remoção dos defeitos gera mais resíduos, fazendo com que seja menos sustentável, logo se pode pensar em destinar as peças com defeitos para elementos estruturais menos solicitados, como caibros, terças e vigas de piso próximas umas das outras (distância máxima de 50 cm), por exemplo.

As rupturas foram caracterizadas por falha típica de tração na parte inferior, e na presença de defeitos, a falha foi iniciada a partir de nós. Pode-se observar que a ruptura não se deu na linha de cola, assim como o comportamento de ruptura foi semelhante ao corpo de prova maciço.

5. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos foi possível concluir que a madeira da espécie clonal de *Eucalyptus urophylla* COP 1404 mostrou-se viável à produção da madeira lamelada colada.

A densidade encontrada tanto por meio do documento 3 da NBR 7190 [15] quanto pelo documento 2 da NBR 7190 [16] está dentro da faixa de densidade recomendada para a produção de MLC. Além disso, a madeira apresentou boa estabilidade dimensional, indicando uso na construção civil.

O adesivo poliuretano à base de mamona foi eficiente na colagem do clone COP 1404, de modo que o cisalhamento ocorreu na madeira. O ensaio de cisalhamento paralelo às fibras realizado conforme o documento 4 da NBR 7190 [17] para o corpo de prova de MLC indicou o comportamento de um corpo único, semelhante ao maciço, com ruptura por tração nas fibras inferiores.

O ensaio de flexão de 4 pontos indicou comportamento de um corpo único, com falha típica de tração na parte inferior. O desempenho mecânico da MLC produzida através da madeira COP 1404 foi satisfatório, de modo que a madeira se mostrou adequada à colagem. Apesar dos defeitos presentes na madeira, é possível utilizá-la de duas maneiras: na madeira engenheirada, pode-se eliminar os nós e reconstituir os segmentos, através das emendas denteadas (*finger joint*); na madeira sem a retirada dos nós, pode-se destinar as peças para elementos estruturais menos solicitados ou em posições ao longo da peça menos solicitadas.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Madeiras (LABMAD) da Escola Politécnica da UFBA. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFBA. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos em nível de mestrado.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7190-1 Projeto de Estruturas de Madeira – Parte 1: Critérios de Dimensionamento*, Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- [2] NADIR, Y., NAGARAJAN, P., AMEEN, M., *et al.*, “Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets”, *Construction & Building Materials*, v. 112, pp. 547–555, Jun. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>
- [3] HÄNSEL, A., SANDAK, J., SANDAK, A., *et al.*, “Selected previous findings on the factors influencing the gluing quality of solid wood products in timber construction and possible developments: a review”, *Wood Material Science & Engineering*, v. 17, n. 3, pp. 230–241, Maio. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2021.1925963>
- [4] BALMORI, J.A., BRANCO, J.M., BASTERRA, L.A., “Behaviour of the adhesive bond between low-grade wood and GFRP reinforcements using epoxy resin”, *Construction & Building Materials*, v. 271, pp. 121516, Fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121516>
- [5] BRUNETTI, M., CHRISTOVASILIS, I.P., MICHELONI, M., *et al.*, “Production feasibility and performance of carbon fibre reinforced glulam beams manufactured with polyurethane adhesive”, *Composites. Part B, Engineering*, v. 156, pp. 212–219, Jan. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.075>

- [6] RAFTERY, G.M., RODD, P.D., “FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive”, *Construction & Building Materials*, v. 91, pp. 116–125, Ago. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.026>
- [7] ANDOR, K., LENGYEL, A., POLGÁR, R., *et al.*, “Experimental and statistical analysis of spruce timber beams reinforced with CFRP fabric”, *Construction & Building Materials*, v. 99, pp. 200–207, Nov. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.026>
- [8] LING, Z., LIU, W., SHAO, J., “Experimental and theoretical investigation on shear behaviour of small-scale timber beams strengthened with Fiber-Reinforced Polymer composites”, *Composite Structures*, v. 240, pp. 111989, Maio. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111989>
- [9] BASTERRA, L.A., BALMORI, J.A., MORILLAS, L., *et al.*, “Internal reinforcement of laminated duo beams of low-grade timber with GFRP sheets”, *Construction & Building Materials*, v. 154, pp. 914–920, Nov. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.007>
- [10] SEGUNDINHO, P.G.A., GONÇALVES, F.G., GAVA, G.C., *et al.*, “Eficiência da colagem de madeira tratada de Eucalyptus cloeziana F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC)”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 22, n. 2, pp. 1–13, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170002.0140>
- [11] BIANCHE, J.J., TEIXEIRA, A.P.M., LADEIRA, J.P.S., *et al.*, “Cisalhamento na linha de cola de eucalyptus sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas”, *Floresta e Ambiente*, v. 24, pp. 00077114, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.077114>
- [12] WANG, Y., HOU, Q., XU, T., *et al.*, “The bending-shear behaviors of steel reinforced fast-growing poplar glulam beams with different shear-span ratios”, *Construction & Building Materials*, v. 300, pp. 124008, Set. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124008>
- [13] CALIL NETO, C., *Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo*, Dissertação de M. Sc., Curso de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2011.
- [14] JESUS, J.M.H., *Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em Madeira Laminada Colada (MLC)*, Tese de D.Sc., Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, 2000.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7190-3 Projeto de Estruturas de Madeira – Parte 3: Métodos de Ensaio para Corpos de Prova Isentos de Defeitos para Madeiras de Florestas Nativas*, Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7190-2 Projeto de Estruturas de Madeira – Parte 2: Métodos de Ensaio para Classificação Visual e Mecânica de Peças Estruturais de Madeira*, Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7190-4, Projeto de Estruturas de Madeira – Parte 4: Métodos de Ensaio para Caracterização Peças Estruturais*, Rio de Janeiro, ABNT, 2022.
- [18] SILVA, J.C., *Parâmetros construtivos para painéis verticais adaptados do sistema wood frame em madeira de eucalipto jovem*, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal da Bahia, BA, Brasil, 2018.
- [19] PAULINO, P.S., LIMA, I.L., “Densidade básica e dimensões celulares da madeira em clones de Eucalyptus urophylla, aos oito anos de idade”, *Ciência da Madeira*, v. 9, n. 1, pp. 9–18, Mar. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n1p9-18>.
- [20] LING, Z., YANG, H., LIU, W., *et al.*, “Local bond stress-slip relationships between glue laminated timber and epoxy bonded-in GFRP rod”, *Construction & Building Materials*, v. 170, pp. 1–12, Maio. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.052>
- [21] SERPA, P.N., VITAL, B.R., “Propriedades da madeira de Pinus elliottii”, *Revista da Madeira*, v. 89, pp. 1–5, 2005.
- [22] LU, W., LING, Z., GENG, Q., *et al.*, “Study on flexural behaviour of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates”, *Construction & Building Materials*, v. 91, pp. 23–31, Ago. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.050>
- [23] DONADON, B.F., MASCIA, N.T., VILELA, R., *et al.*, “Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement”, *Engineering Structures*, v. 202, pp. 109818–109829, Jan. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109818>
- [24] NADIR, Y., NAGARAJAN, P., “The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber wood”, *Construction & Building Materials*, v. 55, pp. 398–405, Mar. 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.032>

- [25] BIANCHI, N.A., “Avaliação da delaminação e da resistência da linha de cola de elementos de MLC com base no projeto de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013 considerando madeiras de reflorestamento tratadas com CCA e sem tratamento preservativo”, Dissertação de M.Sc., Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil, 2020.
- [26] MATOS, G.S., MOLINA, J.C., “Resistência da madeira ao cisalhamento paralelo às fibras segundo as normas ABNT NBR 7190: 1997 e ISO 13910”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 21, n. 4, pp. 1069–1079, Dez. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160004.0098>.