

**CLEIDE BEATRIZ BOURSCHEID**

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA DE EMENDAS POR ENTALHES MÚLTIPLOS  
REFORÇADAS COM FIBRAS PARA MADEIRA LAMINADA COLADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo  
Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Polliana D'Ângelo Rios

**LAGES, SANTA CATARINA  
2017**

Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com  
auxílio do programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC

Bourscheid, Cleide Beatriz  
AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA DE EMENDAS POR ENTALHES  
MÚLTIPLOS REFORÇADAS COM FIBRAS PARA MADEIRA  
LAMINADA COLADA / Cleide Beatriz Bourscheid. -  
Lages , 2017.  
72 p.

Orientador: Rodrigo Figueiredo Terezo Co-  
orientadora: Polliana D'Ângelo Rios Dissertação  
(Mestrado) - Universidade do Estado  
de Santa Catarina, Centro de Ciências  
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Florestal, Lages, 2017.

1. Engenheirados em madeira. 2. Emendas  
longitudinais. 3. Finger-joints reforçados. I.  
Figueiredo Terezo, Rodrigo. II. D'Ângelo Rios,  
Polliana. , .III. Universidade do Estado de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.  
IV. Título.

**CLEIDE BEATRIZ BOURSCHEID**

**AValiação TECNOLÓGICA DE EMENDAS POR ENTALHES MÚLTIPLOS  
REFORÇADAS COM FIBRAS PARA MADEIRA LAMINADA COLADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

**Banca examinadora:**

Orientador:

---

(Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo)  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Coorientadora:

---

(Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Polliana D´Angelo Rios)  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro interno:

---

(Prof. Dr. Alexsandro Bayestorff da Cunha)  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro externo:

---

(Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo)  
Universidade Estadual de Campinas – Unicamp

**Lages, 28 de Abril de 2017.**



## AGRADECIMENTOS

À Universidade do Estado de Santa Catarina, especialmente ao Centro de Ciências Agroveterinárias e ao Departamento de Engenharia Florestal, por me permitirem construir neste lugar parte fundamental da minha vida.

Aos docentes do Departamento de Engenharia Florestal, por todo o conhecimento compartilhado ao longo dos anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo F. Terezo, pela paciência, dedicação e orientação, à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Polliana Rios pela coorientação e ao Prof. Dr. Alexsandro B. Cunha pelo apoio. Vocês foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto e à minha formação profissional.

Aos membros da banca, que gentilmente aceitaram contribuir com este trabalho e compartilhar suas experiências.

Às empresas IRCAL Madeireira Ltda. e Righez Madeiras Ltda. pela doação da matéria-prima e disponibilidade de estrutura fabril. ÀWL Madeiras e ao Sr. Acácio Furtado que gentilmente auxiliaram no processo de usinagem, bem como a toda equipe de serviços gerais do campus, pelo suporte nas mais variadas atividades desenvolvidas ao longo da execução deste estudo.

Aos amigos e colegas do NEBios e Tecnologia da Madeira, especialmente à Ângela, Talitha, Deyvis e João, pelo auxílio diário, troca de experiências, sobretudo, por tornarem os dias de trabalho mais leves e felizes, mesmo quando nada parecia dar certo.

À FAPESC e à CAPES, pelo suporte financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Dário e Iria, pelo amor e cuidado constantes, incondicional, desde sempre. Vocês são minha maior inspiração.

Aos meus irmãos, Róges e Vianeí, e à Gabriela, pela segurança de sempre ter com quem contar.

Aos meus inestimáveis amigos: Aline, Ariel, Carol, Isabel e Nando, pela amizade de longa data, pelo riso incontido e por nunca me permitirem esquecer o quanto poucas horas com as pessoas certas podem fazer toda a diferença.

À “família 22” e aos amigos que Lages me propiciou. Vocês são parte da minha formação humana e profissional. Obrigada por cada sorriso compartilhado e cada mau momento superado em conjunto.

Aos amigos de infância, que mesmo longe, continuam me proporcionando bons momentos, pelos dias vividos.

A todos aqueles que um dia olharam por mim, que passaram por minha vida, deixando um pouco de si e levando algo de mim.

Por fim, à Natureza, em sua soberania incontestável, por sua constante e infinita evolução, pelo prazer de sempre haver o desconhecido.

Muito, muito obrigada.

“A natureza é o único livro que oferece  
um conteúdo valioso em todas as suas  
folhas.”

*Johann Wolfgang von Goethe*





## RESUMO

A aplicação de reforço com fibras em elementos estruturais de Madeira Laminada Colada (MLC), na linha de colagem de maior esforço, se apresenta de maneira vantajosa por aumentar sua resistência mecânica e sua rigidez. Todavia, poucos estudos avaliam o desempenho do reforço sobre as emendas longitudinais, que, mesmo em condições excelentes de manufatura, têm resistência menor que a da madeira maciça, tornando as emendas um dos principais pontos de fragilidade da MLC. Nesse contexto, a presente dissertação tem por objetivo avaliar o desempenho do reforço com fibras em emendas por entalhes múltiplos (*finger-joints*) para utilização em MLC. A análise de desempenho foi desenvolvida sob dois aspectos: (i) desempenho à tração paralela às fibras de duas geometrias, “A” e “B”, para emendas, com três composições de reforço, “Vidro”, “Vidro2” e “Carbono”, em duas espécies de madeira, o *Pinus taeda* e o *Eucalyptus* spp. e (ii) o desempenho de vigas em MLC de *Eucalyptus* spp. com três composições de reforço, “Vidro”, “Vidro2” e “Carbono” quanto à resistência à tração paralela às fibras, tração perpendicular às fibras, cisalhamento e flexão estática. Todos os ensaios foram executados de acordo com as diretrizes da NBR 7190/1997, sendo empregados os testes de Scott-Knott e Tukey para as análises estatísticas com 95% de confiabilidade. Os resultados mostram que as emendas por entalhes múltiplos, mesmo dentro dos referenciais normativos, diminuem significativamente (em até 43%) a resistência à tração paralela às fibras, independentemente da geometria ou da espécie utilizada. Para as amostras de *Eucalyptus* spp., os tratamentos “B-Vidro2”, “B-Carbono” e “A-Vidro2” apresentaram resistência mecânica média equivalente à madeira maciça. Para as amostras de *P. taeda*, os tratamentos com desempenho mecânico similar à madeira maciça foram “A-Vidro2”, “A-Carbono”, “B-Vidro2”, “B-Carbono” e “B-Vidro”. Pode-se concluir que a aplicação em duas camadas de reforço de fibras de vidro ou uma camada de carbono, ambos concentrados na região das emendas por entalhes múltiplos com a geometria B, aumenta significativamente (em até 71% para o *P. taeda* e 25% para o *Eucalyptus* spp. nos tratamentos com melhor desempenho) a resistência à tração paralela às fibras em ambas espécies avaliadas. Conclui-se ainda que a densidade aparente (*P. taeda*  $\rho_{ap,m} = 0,49$  e *Eucalyptus* spp.  $\rho_{ap,m} = 0,60$ ) apresenta fraca correlação com a resistência à tração paralela às fibras. O desempenho mecânico das vigas MLC de *Eucalyptus* spp. não apresentou diferenças significativas para a avaliação das linhas de colagem. Entretanto, na resistência à flexão estática, os tratamentos “Vidro 2” e “Carbono” foram significativamente superiores às vigas MLC sem reforço, chegando a incrementos de 37,8% e 40,5%, respectivamente, à flexão estática. Os módulos de elasticidade não diferiram significativamente entre si. Foi constatada ruptura por tração na região das emendas em todas as vigas avaliadas à flexão estática, entretanto as resistências à flexão foram superiores às resistências à tração paralela às fibras, indicando influência da espessura das lâminas e da espessura dos reforços no desempenho mecânico das emendas reforçadas. Desta forma, é possível concluir que a aplicação de reforço concentrado na região das emendas por entalhes múltiplos melhora, significativamente, o desempenho de vigas MLC de *Eucalyptus* spp. à flexão, bem como a resistência à tração paralela às fibras para o *P. taeda*.

**Palavras-chave:** Engenheirados em madeira; Emendas longitudinais; *Finger-joints* reforçados.



## ABSTRACT

The use of the fiber reinforcement in structural elements of Glued Laminated Timber (Glulam) is advantageous because of increase its strength and stiffness. However, few studies have evaluated the performance of reinforcement on finger joints, which, even under excellent manufacturing conditions, shows less strength than solid wood, making this kind of joint one of the main weaknesses of Glulam. In this context, the present dissertation aims to evaluate the performance of reinforcement with fibers in finger-joints for use in Glulam. The performance analysis was developed under two aspects: (i) the tensile strength parallel to grain performance in two geometries, "A" and "B", on joints, with three reinforcement compositions, "Glass", "Glass2" and "Carbon", in two species of wood, *Pinus taeda* and *Eucalyptus* spp. and (ii) the performance of Glulam beams of *Eucalyptus* spp. with three reinforcement compositions, "Glass", "Glass2" and "Carbon", in tensile strength parallel to grain, normal tensile, strength to shear and three points bending test. All tests were performed according to the guidelines of NBR 7190/1997, using the Scott-Knott and Tukey tests for statistical analysis with 95% of confidence interval. The results show that the finger-joints, even within normative requirements, significantly reduces (up to 43%) the tensile strength parallel to grain, regardless of geometry or species. For the samples of *Eucalyptus* spp., the treatments "B-Glass2", "B-Carbon" and "A-Glass2" presented average strength equivalent to solid wood. For specimens of *P. taeda*, the treatments with the same performance as solid wood were "A-Glass2", "A-Carbon", "B-Glass2", "B-Carbon" and "B-Glass". It can be concluded that the application of two layers of reinforcement of glass fibers or one layer of carbon, concentrated in the region of the finger-joints with the geometry B, increases significantly (in up to 71% for *P. taeda* and 25% for *Eucalyptus* spp. in the treatments with better performance) the tensile strength parallel to grain in both species evaluated. It was also concluded that the apparent densities (*Pinus taeda*  $\rho_{ap,m} = 0.49$  and *Eucalyptus* spp.  $\rho_{ap,m} = 0.60$ ) show poor correlation with the tensile strength parallel to the fibers. The performance of the glulam beams of *Eucalyptus* spp. did not present significant differences for the evaluation of the bonding lines. However, in the flexural strength, the treatments "Glass 2" and "Carbon" were significantly superior to the glulam beams without reinforcement, reaching at increments of 37.8% and 40.5%, respectively, in the bending strength. The modulus of elasticity did not differ significantly among. It was observed that the mode of rupture was by tensile in the finger-joints region in all the beams evaluated in bending test, however, the bending strengths were higher than tensile strengths parallel to grain, indicating influence of the thickness of the blades and thickness of the reinforcements in the performance of the reinforced finger-joints. In this way, it is possible to conclude that the application of concentrated reinforcement in finger-joints significantly improves the performance of glulam beams of *Eucalyptus* spp. to bending, as well as the tensile strength parallel to grain for *P. taeda*.

**Keywords:** Glued laminated timber; Longitudinal joints; Reinforced finger-joints.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variáveis geométricas das emendas por entalhes múltiplos. ....	22
Figura 2. Exemplos de obras executadas com MLC de Pinus e Eucalipto. ....	24
Figura 3. Sistemas de prensagem para colagem das emendas por entalhes múltiplos. ....	34
Figura 4. Aplicação do reforço com tecidos de fibras em corpo de prova de tração paralela às fibras. ....	35
Figura 5. Esquema para extração dos corpos de prova de densidade. ....	36
Figura 6. Gráfico desempenho das espécies dentro de cada tratamento. ....	38
Figura 7. Correlação entre a resistência à tração paralela às fibras e densidade aparente para <i>P. taeda</i> e <i>Eucalyptus</i> spp. ....	42
Figura 8. Etapas de produção das vigas de MLC reforçadas com tecidos de fibras. ....	49
Figura 9. Modos de ruptura no ensaio de tração paralela às fibras de acordo com a ASTM D 4688 (1999). ....	54
Figura 10. Correlação entre a tensão máxima à tração paralela às fibras e densidade aparente por tratamento. ....	55
Figura 11. Gráfico Tensão vs. Deformação no regime elástico. ....	56
Figura 12. Principais modos de ruptura à flexão por tratamento. ....	57



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Geometrias indicadas por normas técnicas.....	22
Tabela 2. Pressão de colagem das ligações de continuidade das lâminas. ....	23
Tabela 3. Propriedades físico-mecânicas do <i>P. taeda</i> segundo a NBR 7190/1997.....	25
Tabela 4. Propriedades físico-mecânicas do <i>E. grandis</i> segundo a NBR 7190/1997. ....	25
Tabela 5. Esquema de apresentação dos tratamentos. ....	32
Tabela 6. Geometrias dos entalhes para cada tratamento.....	33
Tabela 7. Desempenho das geometrias sem reforço.....	37
Tabela 8. Desempenho das espécies de acordo com os tratamentos. ....	38
Tabela 9. Desempenho dos tratamentos de acordo com as espécies. ....	39
Tabela 10. Modos de ruptura de acordo com a ASTM D 4688 (1999).....	41
Tabela 11. Número de corpos de prova por tratamento. ....	51
Tabela 12. Teste de Tukey ( $p>0,05$ ) para o ensaio de cisalhamento na linha de cola. ....	52
Tabela 13. Teste de Tukey ( $p>0,05$ ) para o ensaio de tração normal às fibras na linha de cola. ....	53
Tabela 14. Teste de Tukey ( $p>0,05$ ) para o ensaio de tração paralela às fibras.....	54
Tabela 15. Teste de Tukey ( $p>0,05$ ) para resistência à flexão. ....	58





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	MADEIRA LAMINADA COLADA.....	19
1.2	EMENDAS POR ENTALHES MÚLTIPLOS .....	20
1.3	ESPÉCIES DE MADEIRA.....	23
1.3.1	<i>Pinus taeda</i> .....	24
1.3.2	<i>Eucalyptus spp.</i> .....	25
1.4	REFORÇO COM TECIDOS DE FIBRAS DE VIDRO E DE CARBONO.....	26
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>27</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	27
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DE EMENDAS POR ENTALHES MÚLTIPLOS REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO OU DE CARBONO EM <i>EUCALYPTUS SPP.</i> E <i>PINUS TAEDA</i> .....</b>	<b>29</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	30
3.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	31
3.2.1	<i>Seleção e preparo das amostras</i> .....	32
3.2.2	<i>Produção dos corpos de prova</i> .....	33
3.2.3	<i>Aplicação dos reforços nos corpos de prova</i> .....	34
3.2.4	<i>Ensaio de avaliação tecnológica</i> .....	35
3.2.5	<i>Tratamento estatístico</i> .....	36
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	37
3.3.1	<i>Tração paralela às fibras</i> .....	37
3.3.2	<i>Propriedades físicas e análise de correlação</i> .....	42
3.4	CONCLUSÕES .....	43
3.5	RECOMENDAÇÕES .....	44
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO II - CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA LAMINADA COLADA DE <i>EUCALYPTUS SPP.</i> COM E SEM REFORÇO DE FIBRAS DE VIDRO OU CARBONO .....</b>	<b>45</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	46
4.2	MATERIAS E MÉTODOS .....	47
4.2.1	<i>Produção dos corpos de prova</i> .....	48
4.2.2	<i>Ensaio de avaliação tecnológica</i> .....	50

4.2.3 Tratamento estatístico .....	51
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.3.1 Propriedades físicas .....	52
4.3.2 Resistência da linha de cola .....	52
4.3.3 Flexão estática.....	56
4.4 CONCLUSÕES .....	59
4.5 RECOMENDAÇÕES.....	59
<b>5 CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>61</b>
<b>6 RECOMENDAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNCIDES.....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos mais importantes materiais utilizados para a construção civil desde o início das civilizações. Devido principalmente à sua ampla disponibilidade e ocorrência natural. Contudo, nos últimos séculos, a necessidade por materiais mais estáveis que correspondessem às exigências para grandes estruturas, e consequentemente, para que suportassem elevados carregamentos, fez com que a utilização de materiais como o concreto e o aço dominassem o mercado da construção civil.

Desenvolvidos para utilização em situações estruturais específicas, o aço e o concreto foram criados pelo homem a fim de diminuir ao máximo a presença de defeitos e possuem um comportamento isotrópico, diferentemente da madeira, que possui comportamento ortotrópico, além da presença de defeitos inerentes à sua constituição anatômica, que influenciam diretamente nas propriedades de resistência mecânica. Todavia, nos últimos anos, o crescente interesse e preocupação com o desenvolvimento sustentável e os altos níveis de tecnologia de industrialização disponíveis no mercado, têm trazido de volta à madeira e seus derivados a devida importância na construção civil.

A utilização da madeira aliada à alta tecnologia favoreceu o desenvolvimento de produtos versáteis, leves e mais resistentes, dando origem a uma linha completamente nova de produtos para a utilização em estruturas ao longo das últimas décadas. Dentre estes produtos, destaca-se a Madeira Laminada Colada (MLC).

### 1.1 MADEIRA LAMINADA COLADA

A MLC pode ser definida como um produto engenheirado composto basicamente por madeira serrada, dispostas paralelamente ao eixo da peça e unidas por adesivos resistentes à umidade (BAYATKASHKOLI *et al.*, 2012; IWAKIRI *et al.*, 2013), sendo que a formação das lâminas ocorre pela união de madeiras de pequeno comprimento, por meio de emendas longitudinais, até atingirem a extensão desejada. Esse sistema reduz a influência dos defeitos inerentes à madeira maciça, como nós, rachaduras e os lenhos de tração/compressão, dispersando-os ao longo do elemento estrutural, ou eliminando-os, quando suas proporções ultrapassam os requisitos estabelecidos pela norma, assegurando um produto final com propriedades mecânicas mais uniformes e com dimensões teoricamente ilimitadas (GLIŠOVIĆ *et al.*, 2015).

Para Anshari *et al.* (2012), a MLC tem seu uso frequente na construção de casas, armazéns, pontes, passarelas, embarcações, torres de transmissão, entre outros, sendo que isso se deve à significativa variedade de formas e design às quais a tecnologia se adapta.

De acordo com Molina *et al.* (2016), a MLC requer alta precisão em todos os estágios de fabricação. O que implica na criação de programas de controle de qualidade e de normas que regulamentem e certifiquem o seu processo produtivo.

No Brasil, os atuais critérios de produção, como ensaios para caracterização da MLC e dimensionamento de estruturas, são apresentados pela norma NBR 7190 (1997): Projeto de estruturas de madeira. Porém, de acordo com o projeto de revisão dessa norma PNBR 7190 (2011), alguns novos parâmetros são incluídos. Nesta, recomenda-se a utilização de peças com densidade aparente entre 0,40 g/cm<sup>3</sup> e 0,75 g/cm<sup>3</sup>, dimensão da lâmina com comprimento superior a 100 cm, espessura máxima de 5 cm e teor de umidade da madeira não superior a 18% no momento da colagem. Quanto à qualidade da madeira, considera necessária a classificação das peças estruturais por método visual e mecânico.

O desenvolvimento de materiais altamente engenheirados como a MLC significa incrementar a longevidade da madeira nos mais diversos usos, diminuir a pressão sobre os recursos naturais não renováveis, bem como a diminuição pela procura por madeira maciça de grandes dimensões provenientes de florestas nativas (BAYATKASHKOLI *et al.*, 2012; HABIFI *et al.*, 2016). Sua capacidade de cobrir grandes vãos e de suportar elevadas cargas significa uma melhoria significativa sobre a madeira serrada, embora a sua resistência à flexão, muitas vezes, continua limitada pela presença das emendas por entalhes múltiplos (*finger-joints*) nas zonas de concentração de tensões (GLIŠOVIĆ *et al.*, 2015), e é por esse motivo que estas ligações desempenham papel fundamental no desempenho da MLC.

## 1.2 EMENDAS POR ENTALHES MÚLTIPLOS

Na maioria dos casos de estruturas em madeira, as emendas longitudinais ou de topo, mais precisamente suas respectivas eficiências, são as que definem a seção transversal dos elementos estruturais, tendo em vista que na MLC de grandes seções transversais, as emendas coladas podem proporcionar eficiências de até 80% com relação à madeira maciça (AICHER *et al.*, 2012).

Os modelos de emendas longitudinais coladas mais utilizados são basicamente três: a emenda de topo reta, a biselada e a por entalhes múltiplos. As emendas de topo retas são as mais antigas e fáceis de executar, porém apresentam baixo desempenho quando solicitadas à

tração. As emendas biseladas surgiram como uma evolução às emendas de topo, todavia seu emprego perdeu espaço para as emendas por entalhes múltiplos em função do desempenho mecânico inferior.

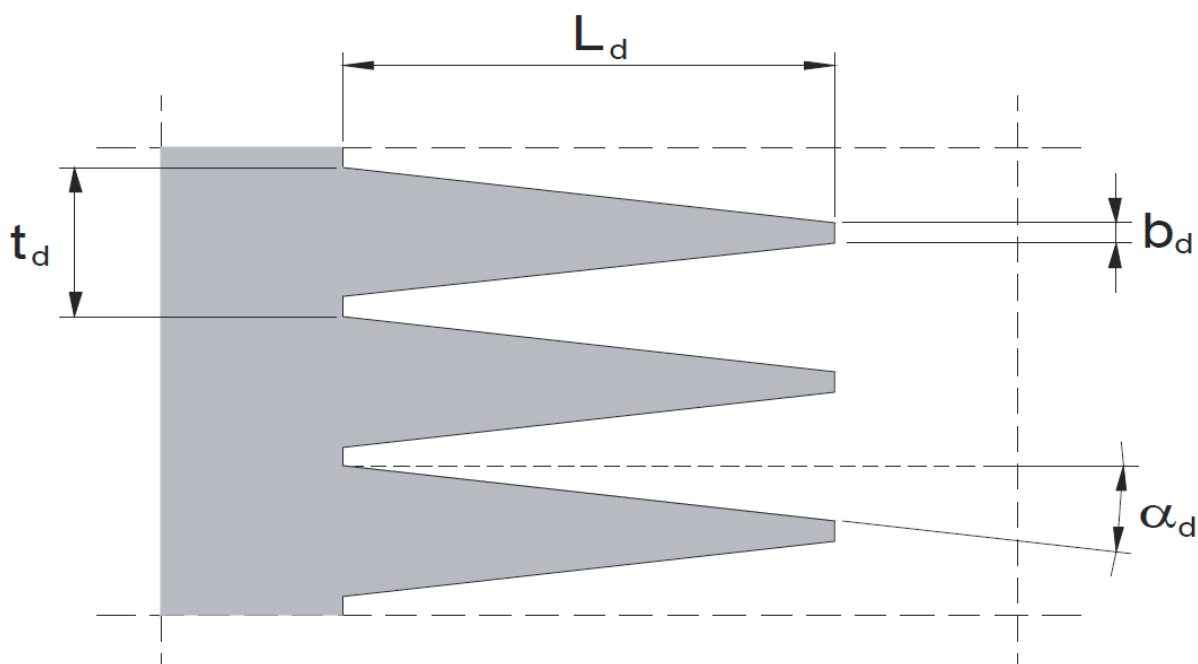
Atualmente, a emenda colada por entalhes múltiplos na madeira é o modelo de ligação longitudinal mais utilizada. Sua aplicação é comum em produtos como MLC, vigas T ou duplo T (I) e treliças. Isso se deve às suas boas propriedades como ligação, tais como: linearidade, estabilidade dimensional, intercambialidade com a madeira serrada e durabilidade ilimitada (HABIPI *et al.*, 2016).

A resistência da emenda depende de alguns parâmetros que sempre devem ser levados em consideração, como a geometria, a pressão de colagem, o tempo de cura do adesivo, o tipo do adesivo, a densidade da madeira e o teor de umidade (AJDINAJ & HABIPI, 2013; FRANKE *et al.*, 2014; HABIPI *et al.*, 2016; KHELIFA *et al.*, 2016).

Uma vez usinados os entalhes múltiplos, é necessário proceder à colagem dessa emenda longitudinal quase que imediatamente, para evitar variações na geometria dos entalhes devido à retratibilidade da madeira (SZÜCS *et al.*, 2015).

Apontada como um dos parâmetros mais importantes da eficiência da ligação, a geometria da emenda pode ser destinada ao uso estrutural ou não; e a determinação dos padrões de qualidade a serem seguidos é regida por normas, como a norma europeia EN 385 (2001), que é amplamente difundida. No Brasil, o projeto de revisão da norma PNBR 7190 (2011) apresenta em seu escopo dois perfis geométricos indicados para utilização estrutural em MLC. Na Figura 1, pode-se observar quais são as variáveis nesse modelo de emenda.

Figura 1. Variáveis geométricas das emendas por entalhes múltiplos.



Legenda:  $L_d$ = comprimento do entalhe;  $t_d$ = largura do entalhe ou passo;  $b_d$ = largura da ponta do entalhe;  $\alpha_d$ = ângulo de inclinação. Fonte: Projeto de revisão da PNBR 7190 (2011).

Além dos modelos propostos, o projeto de revisão da PNBR 7190 (2011) traz como limitante um grau de enfraquecimento “ $v_d$ ” ( $b_d/t_d$ ) de 20% em relação à resistência da madeira sem emendas e isenta de defeitos. Na Tabela 1, estão apresentadas as geometrias recomendadas por normas.

Tabela 1. Geometrias indicadas por normas técnicas.

Geometria	Comprimento $L_d$ (mm)	Largura da base $t_d$ (mm)	Largura da ponta $b_d$ (mm)	Grau de Enfraquecimento $v_d$ (%)
EN 385	20	6,2	1	16%
PNBR 7190	21	7	1	14%
PNBR 7190	28	7	1	12%

Fonte: Autora, 2017.

A pressão de colagem das emendas longitudinais determinada pelo projeto de revisão da norma é variável de acordo com o comprimento do entalhe e com a densidade da madeira, como pode ser observado na Tabela 2. Assim, quanto maior o comprimento, menor a pressão de colagem necessária. Isto acontece porque à medida que o comprimento aumenta, há maior contato e maior pressão lateral (entre entalhes).

Tabela 2. Pressão de colagem das ligações de continuidade das lâminas.

$L_d$ (mm)	Pressão de colagem (MPa)	
	$densidade \leq 0,50 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$densidade > 0,50 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
10	12	14
20	8	10
30	6	8
40	4,5	6,5
50	3	5
60	2	4

Legenda:  $L_d$  = Comprimento do entalhe. Fonte: Projeto de revisão da PNBR 7190 (2011).

Além da geometria da emenda e da pressão de colagem, para Segundinho *et al.* (2013) e Molina *et al.* (2016), alguns outros fatores determinantes na qualidade desse tipo de ligação são: espécie de madeira, teor de umidade e o tipo de adesivo utilizado.

### 1.3 ESPÉCIES DE MADEIRA

A madeira, por ser heterogênea, apresenta propriedades físicas, químicas, mecânicas e anatômicas que variam entre espécies, dentro da espécie e até mesmo dentro da própria árvore. Dessa forma, conhecer a multiplicidade e interação das propriedades que tornam a madeira matéria-prima ideal para determinado uso é de fundamental importância para o seu emprego correto (PALERMO *et al.*, 2013).

Para Almeida *et al.* (2013) a madeira, quer seja proveniente de florestas plantadas ou de florestas nativas, ambas devidamente manejadas, fornece matéria-prima para diversos ramos da indústria e de prestação de serviços no Brasil. Um dos principais meios de utilização da madeira pela construção civil é como elemento estrutural. Desta forma, a técnica da MLC teve que se adaptar às espécies disponíveis, visto que as indústrias produtoras se localizam, sobretudo, no Sul e Sudeste, onde as áreas de reflorestamento são predominantemente de espécies exóticas, como dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. A utilização de ambos os gêneros na técnica de MLC é difundida no Brasil, como exemplifica a Figura 2.

Figura 2. Exemplos de obras executadas com MLC de Pinus e Eucalipto.



(A)

(B)

Legenda: (A) Cobertura em MLC de Pinus do Ginásio Jones Minosso, Lages/SC; (B) Cobertura em MLC de Eucalipto do Núcleo Ressacada de Pesquisas em Meio Ambiente – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC. Fonte: Autora, 2015.

### 1.3.1 *Pinus taeda*

O *Pinus taeda* é considerado uma das espécies madeireiras mais importantes economicamente para a região Sul do Brasil e também a mais cultivada, apesar de ser nativa da América do Norte (Estados Unidos e Canadá). As árvores podem alcançar cerca de 20 m de altura e 1 m de diâmetro à altura do peito (DAP), produzindo copa densa, casca gretada e ramos acinzentados. Tem rápido crescimento, quando comparado ao seu desenvolvimento nos países de origem, apresenta maior número de galhos e menor índice de resina na madeira. Em reflorestamento, tem sido preferida em relação a outras espécies de *Pinus* spp.. Sua madeira serve para produção de celulose de fibras longas, para serraria, construção civil, movelaria, laminados e compensados (AMBIFLORA, 2012).

Aguiar *et al.* (2014) afirmam que as características que favorecem o plantio de *P. taeda* incluem a coloração clara da madeira, assim como a fibra longa, apropriada para fabricação de papel de alta resistência para embalagens, papel de imprensa e outros tipos de papéis, além da rusticidade e tolerância da espécie ao frio.

Segundo a NBR 7190/1997, o *P. taeda* se enquadra na classe C-30 de resistência para coníferas, na condição de umidade de 12%. A Tabela 3 apresenta as resistências mecânicas médias da espécie, segundo a norma.



Tabela 3. Propriedades físico-mecânicas do *P. taeda* segundo a NBR 7190/1997.

$\rho_{ap}$ (12%) (g/cm <sup>3</sup> )	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{t,0}$ (MPa)	$f_{t,90}$ (MPa)	$f_v$ (MPa)	$E_{c,0}$ (MPa)	$n$
0,645	44,4	82,8	2,8	7,7	13304	15

Legenda:  $\rho_{ap}$  = densidade aparente média a 12% de umidade;  $f_{c,0}$  = resistência média à compressão paralela às fibras;  $f_{t,0}$  = resistência média à tração paralela às fibras;  $f_{t,90}$  = resistência média à tração normal às fibras;  $f_v$  = resistência média ao cisalhamento;  $E_{c,0}$  = módulo de elasticidade longitudinal médio obtido no ensaio de compressão paralela às fibras;  $n$  = número de corpos de prova ensaiados. NOTAS: 1) Coeficiente de variação para resistências a solicitações normais  $\delta$  = 18%. 2) Coeficiente de variação para resistências a solicitações tangenciais  $\delta$  = 28%. Fonte: Adaptado da NBR 7190 (1997).

### 1.3.2 *Eucalyptus spp.*

As espécies do gênero *Eucalyptus* são nativas da Austrália, Indonésia e de outras ilhas da Oceania. No Brasil, estima-se que tenham sido introduzidos os primeiros exemplares do gênero em meados de 1860 (REMADE, 2001) e atualmente é o gênero que detém a maior área de reflorestamentos comerciais. Segundo Iwakiri *et al.* (2013), a utilização de espécies do gênero *Eucalyptus* é uma alternativa para ampliar a oferta de matéria-prima proveniente de florestas plantadas de rápido crescimento para fabricação de produtos de madeira sólida e reconstituída. Várias espécies do gênero já são empregadas comercialmente na produção de celulose e papel, carvão vegetal, painéis aglomerados e de fibras de madeira, dentre as quais se destacam o *E. grandis*, *E. saligna* e o híbrido *E. urograndis*.

Entre as espécies de eucalipto mais utilizadas para produtos sólidos, o *E. grandis* se destaca, já que possui características desejáveis para usos múltiplos e apresenta bom desempenho nas fases de desdobro e secagem. Em função destas características é que esta espécie foi adotada como padrão de comparação neste trabalho.

De acordo com a NBR 7190/1997, a espécie é classificada como C-40 de resistência para dicotiledôneas, levando-se em conta a umidade de equilíbrio de 12%. A Tabela 4 apresenta as propriedades físico-mecânicas da espécie segundo a norma.

Tabela 4. Propriedades físico-mecânicas do *E. grandis* segundo a NBR 7190/1997.

$\rho_{ap}$ (12%) (g/cm <sup>3</sup> )	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_{t,0}$ (MPa)	$f_{t,90}$ (MPa)	$f_v$ (MPa)	$E_{c,0}$ (MPa)	$n$
0,640	40,3	70,2	2,6	7,0	12813	103

Legenda:  $\rho_{ap}$  = densidade aparente média a 12% de umidade;  $f_{c,0}$  = resistência média à compressão paralela às fibras;  $f_{t,0}$  = resistência média à tração paralela às fibras;  $f_{t,90}$  = resistência média à tração normal às fibras;  $f_v$  = resistência média ao cisalhamento;  $E_{c,0}$  = módulo de elasticidade longitudinal médio obtido no ensaio de compressão paralela às fibras;  $n$  = número de corpos-de-prova ensaiados. NOTAS: 1) Coeficiente de variação para resistências a solicitações normais  $\delta$  = 18%. 2) Coeficiente de variação para resistências a solicitações tangenciais  $\delta$  = 28%. Fonte: Adaptado da NBR 7190 (1997).

#### 1.4 REFORÇO COM TECIDOS DE FIBRAS DE VIDRO E DE CARBONO

Para Khelifa *et al.* (2015b), melhorar o desempenho estrutural das construções combinando materiais de reforço com os materiais convencionais é um conceito antigo, amplamente utilizado no setor. Alguns deles, como as barras de aço, alumínio e fibras têm sido utilizados sob diferentes metodologias de aplicação (NADIR *et al.*, 2016).

Engenheirados em madeira fabricados com reforço, apresentam melhor desempenho e possuem muitas vantagens sobre os tradicionais. Ao comparar com barras e placas de aço convencionalmente utilizadas para reforço, a utilização de fibras tem uma relação mais eficiente de peso vs. resistência mecânica, não são corrosivos, têm custos de manutenção reduzidos à longo prazo e podem ser instalados no local da obra (NADIR *et al.*, 2016). As fibras mais utilizadas para este procedimento são as fibras de vidro, de carbono e aramida (CHEW *et al.*, 2016).

A aplicação de fibras se apresenta vantajosa principalmente por aumentar a resistência e rigidez dos elementos estruturais em madeira. Esse reforço reduz a variabilidade das propriedades mecânicas e permite maiores valores de cálculo, além do uso de espécies com menores resistências mecânicas e de crescimento mais rápido, o que, consequentemente, reduz as dimensões e o peso da estrutura final (GLIŠOVIĆ *et al.*, 2015; NADIR *et al.*, 2016).

Khelifa *et al.* (2016) afirmaram que mesmo em condições excelentes de manufatura, a resistência mecânica das emendas por entalhes múltiplos será menor do que a da madeira maciça, tornando essas ligações um dos principais pontos de perda de resistência mecânica da MLC. Considerando que o comportamento das emendas por entalhes múltiplos geralmente é regido por flexão, o reforço em elementos estruturais com emendas por entalhes múltiplos utilizando fibras surgiu como uma técnica nova especialmente adequada à madeira (KHELIFA *et al.*, 2015a; KHELIFA *et al.*, 2016). Análises experimentais mostraram que o uso de um menor comprimento de reforço, apenas próximo às regiões de concentração de tensões, pode resultar na diminuição de volume de madeira bem como de fibras, concomitante ao incremento da resistência mecânica do produto, tornando a MLC mais competitiva (KHELIFA *et al.*, 2016).

## 2 OBJETIVO

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar análise de desempenho tecnológico de emendas por entalhes múltiplos com reforço de tecidos de fibras de vidro e fibras de carbono para a produção de elementos estruturais para Madeira Laminada Colada (MLC).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a eficiência dos reforços com tecidos de fibras de vidro ou de carbono aplicados sobre emendas por entalhes múltiplos em madeira de *Pinus taeda* e de *Eucalyptus* spp. quando submetidas à tração paralela às fibras;
- Avaliar o desempenho de diferentes geometrias de emendas por entalhes múltiplos em madeiras de *P. taeda* e de *Eucalyptus* spp. quando submetidas à tração paralela às fibras;
- Avaliar a influência do reforço das emendas por entalhes múltiplos de vigas MLC;
- Verificar ocorrência de uma relação entre a espessura dos reforços e a espessura das lâminas no desempenho das emendas;
- Avaliar a viabilidade técnica de aplicação de reforços com tecidos de fibras de vidro ou de carbono utilizando-se o mesmo adesivo da produção de MLC.



### 3 CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DE EMENDAS POR ENTALHES MÚLTIPLOS REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO OU DE CARBONO EM *Eucalyptus* spp. E *Pinus taeda*

#### RESUMO

Na emenda por entalhes múltiplos é, atualmente, a união de topo entre as lâminas de madeira mais utilizada na fabricação da Madeira Laminada Colada (MLC). Considerando a influência destas uniões na rigidez e na resistência mecânica final dos elementos estruturais em MLC, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a resistência à tração paralela às fibras da madeira com diferentes composições de reforços. Foram utilizadas duas geometrias para os entalhes múltiplos e duas espécies de madeira: *Eucalyptus* spp e *Pinus taeda*. Os reforços foram feitos com tecidos de fibras de vidro ou de fibras de carbono, colados com adesivo poliuretano reativo sobre as emendas. Os tratamentos empregados foram: “A-Vidro”, “A-Vidro2”, “A-Carbono”, “B-Vidro”, “B-Vidro2” e “B-Carbono”, sendo a letra A ou B, as geometrias e 2, o número de camadas de tecido de fibras. Para a análise dos resultados foi utilizado o teste de Scott Knott com 95% de confiabilidade. Os resultados mostraram que as emendas por entalhes múltiplos, mesmo dentro dos referenciais normativos, diminuí significativamente (em até 43%) a resistência à tração paralela às fibras, independentemente da geometria ou da espécie. Para as amostras de *Eucalyptus* spp, os tratamentos “B-Vidro2”, “B-Carbono” e “A-Vidro2” apresentaram resistência mecânica média equivalente à madeira maciça. Para as amostras de *P. taeda*, os tratamentos com desempenho similar à madeira maciça foram “A-Vidro2”, “A-Carbono”, “B-Vidro2”, “B-Carbono” e “B-Vidro”. Pode-se concluir que a aplicação em duas camadas de reforço de fibras de vidro ou uma camada de fibras de carbono, ambos concentrados na região das emendas por entalhes múltiplos com a geometria B, aumenta significativamente (em até 71% para o *P. taeda* e 25% para o *Eucalyptus* spp.) a resistência à tração paralela às fibras. Conclui-se ainda que as densidades (*P. taeda*  $\rho_{ap,m} = 0,49$  e *Eucalyptus* spp.  $\rho_{ap,m} = 0,60$ ) apresentam fraca correlação com a resistência à tração paralela às fibras.

**Palavras-chave:** *finger-joint*, reforço com fibras, geometria de emendas longitudinais; compósitos em madeira; madeira engenheirada.

### 3.1 INTRODUÇÃO

As tecnologias da indústria de compósitos vêm sendo utilizadas com frequente crescimento pela engenharia e pelas indústrias mecânicas. A introdução de novos materiais em conjunto com o conhecimento das técnicas para sua adequada utilização faz com que esses produtos atinjam as propriedades desejadas em projeto e normas de desempenho.

A madeira e seus derivados estão entre os mais importantes materiais de construção e têm se tornado cada vez mais usuais sob a forma de produtos compósitos engenheirados (KHELIFA *et al.*, 2015b). Todavia, a disponibilidade de peças maciças de grande porte é cada vez mais rara e cara, mesmo quando sejam oriundas de plantios homogêneos certificados, muito comuns com espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Além disso, essas peças maciças possuem o comportamento mecânico influenciado por defeitos como nós, fissuras e orientação das fibras. Estes defeitos são mais prejudiciais na zona de tração do que na zona de compressão, uma vez que a tensão aplicada sob eles tende a propiciar o surgimento de desenvolver fendas (KHELIFA *et al.*, 2015b).

Para Segundinho *et al.* (2013), a Madeira Laminada Colada (MLC) apresenta vantagens em função da possibilidade de diminuição da influência desses defeitos por meio da laminação e de emendas coladas. Utilizada principalmente em estruturas de médio e grande porte, a MLC requer altos padrões de qualidade e de precisão durante o processo de fabrico (MOLINA *et al.*, 2016). É por meio dessa técnica que são produzidos elementos estruturais com maior rigidez e resistência mecânica, sendo que um dos fatores fundamentais neste processo é a emenda longitudinal das lâminas.

Os modelos mais conhecidos de ligações longitudinais são as emendas de topo (reta), as biseladas e as por entalhes múltiplos (*finger-joints*). Esta última é a mais indicada para fins estruturais em função das suas boas propriedades, tais como a linearidade, estabilidade dimensional, comprimento ilimitado e intercambialidade com madeira sem emendas. Esse modelo de ligação é considerado o mais adequado para uso na construção de estruturas em MLC (KHELIFA *et al.*, 2015a). As geometrias utilizadas nas emendas são regidas por normas, conforme descrito na Tabela 1.

De maneira geral, a madeira apresenta maior resistência mecânica paralelamente às fibras. Portanto, desenvolver uma emenda longitudinal que seja capaz de resistir às tensões axiais melhor do que as atuais emendas múltiplas tem sido o objetivo de muitas pesquisas nos últimos anos (BUSTOS *et al.*, 2003; AICHER *et al.*, 2012; BAYATKASHKOLI *et al.*, 2012; RAO *et al.*, 2012; AJDINAJ & HABIBI, 2013; AMAYA, 2013; IWAKIRI *et al.*, 2013;

FRANKE *et al.*, 2014; VOLKMER *et al.*, 2014; FINK & KOHLER, 2015; KHELIFA *et al.*, 2015a; HABUPI *et al.*, 2016; KHELIFA *et al.*, 2016).

Recentemente, compósitos formados com base em fibras de vidro e de carbono associados a uma matriz polimérica têm sido utilizados para reforçar estruturas em madeira, tanto em regiões de ligações, como para aumentar a resistência mecânica e o módulo de elasticidade ( $E_w$ ) das peças nas áreas mais solicitadas. As fibras comumente utilizadas nesse tipo de reforço são as de vidro e as de carbono, aliadas a matrizes que podem ser termoplásticas ou termoendurecíveis, dependendo do modo de aplicação e utilização da estrutura. Nos compósitos de reforço associados à madeira, as matrizes mais utilizadas têm sido a poliuretano, a fenólica e a epóxi (CRUZ *et al.*, 2000; CERCHIARI, 2013; STERLEY *et al.* 2014).

Segundo Raftery & Rodd (2015), as resinas epóxi, que são mais caras que os adesivos comumente utilizados na fabricação da MLC, são a primeira escolha de adesivo quando se trata de aplicação de reforços em madeira. No entanto, a produção da MLC reforçada se tornaria significativamente mais rentável com a aplicação de um único adesivo em todo o sistema.

Ademais, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos em função de avaliar a influência do comprimento do reforço em relação ao incremento em resistência mecânica, considerando apenas, de modo geral, a porcentagem de reforço aplicado em relação à seção transversal das peças estruturais. A possibilidade de aumentar a resistência mecânica da MLC com aplicação do reforço somente nas regiões de maior perda de resistência mecânica, como as emendas por entalhes múltiplos, pode vir a reduzir os custos de produção deste novo tipo de compósito (KHELIFA *et al.*, 2015b).

Neste sentido, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho de emendas por entalhes múltiplos, sem e com a aplicação de reforços de tecidos de fibras, visando o seu uso com o mesmo tipo de adesivo empregado na produção de elementos estruturais em MLC.

### 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas duas espécies de madeira, *Pinus taeda* e *Eucalyptus* spp., dois modelos de fresas de emendas por entalhes múltiplos e três diferentes composições dos reforços com tecidos de fibras de vidro ou de fibras de carbono.

A Tabela 5 apresenta de forma resumida o delineamento experimental. Foram produzidos 223 corpos de prova de tração paralela às fibras variando em: duas geometrias;

duas espécies; três composições de reforço com tecidos de fibras, (i) uma camada de tecido de fibras de carbono, (ii) uma camada de tecido de fibras de vidro e (iii) duas camadas de tecidos de fibras de vidro; e testemunhas, em madeira maciça e com emendas sem aplicação de reforço.

Tabela 5. Esquema de apresentação dos tratamentos.

<i>Geometria</i>	<i>Espécie</i>	<i>Reforço</i>	<i>Nº de CPs</i>
A	<i>P. taeda</i>	Vidro	10
		Vidro 2	10
		Carbono	9
		Sem Reforço	11
	<i>Eucalyptus spp.</i>	Vidro	15
		Vidro 2	15
		Carbono	14
		Sem Reforço	14
B	<i>P. taeda</i>	Vidro	10
		Vidro 2	10
		Carbono	10
		Sem Reforço	12
	<i>Eucalyptus spp.</i>	Vidro	15
		Vidro 2	15
		Carbono	15
		Sem Reforço	15
Maciça	<i>P. taeda</i>	Sem emenda	8
	<i>Eucalyptus spp.</i>	Sem emenda	15
<b>Total</b>			<b>223</b>

Legenda: Nº de CPs = número de corpos de prova; Vidro = Uma camada de tecido de fibras de vidro; Vidro2 = Dupla camada de tecido de fibras de vidro; Carbono = uma camada de tecido de fibras de carbono; Sem reforço = Com emenda e sem aplicação de reforço; Sem emenda = corpo de prova em madeira maciça. Fonte: Autora, 2016.

### 3.2.1 Seleção e preparo das amostras

A madeira de *P. taeda* utilizada era proveniente de florestas plantadas do planalto catarinense, com idade aproximada de 28 anos. Estas toras foram desdobradas em 55 tábuas, as quais foram selecionadas aleatoriamente, com dimensões de 300 cm x 20 cm x 2,2 cm, com teor de umidade em média de 18%, após secagem ao ar livre pelo período aproximado de 40 dias. Posteriormente, estas amostras foram armazenadas em área coberta durante 120 dias no Laboratório de Tecnologia da Madeira, atingindo teor de umidade médio de 16%.

As amostras de *Eucalyptus spp.* foram provenientes de florestas plantadas do Estado do Rio Grande do Sul, com idade entre 13 e 15 anos. As toras foram serradas em 80 tábuas, as



quais foram selecionadas aleatoriamente, com dimensões de 300 cm x 20 cm x 3 cm, com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras. As tábuas foram primeiramente armazenadas ao ar livre pelo período aproximado de 30 dias para a evaporação da água livre da madeira. Posteriormente, todas as peças foram condicionadas em estufa, com temperatura de 56 °C e umidade relativa de 50% por 6 dias, atingindo teor de umidade médio de 12%.

As amostras foram selecionadas de forma aleatória de lotes de madeira que possuíam aproximadamente 1 m<sup>3</sup> para cada espécie. As amostras eram isentas de defeitos.

### 3.2.2 Produção dos corpos de prova

As tábuas de *P. taeda* foram serradas em 100 peças isentas de defeitos, com dimensões de 60 cm x 5 cm x 2,2 cm, e a madeira de *Eucalyptus* spp. foi serrada em 150 peças, com dimensões de 60 cm x 5 cm x 3 cm, sendo retiradas a 30 cm de distância das extremidades. Estas amostras foram fresadas com os entalhes múltiplos (Tabela 6), em máquina de alta rotação, e nas 24 h seguintes, foram coladas em dois sistemas de prensagem controlada. O controle de gramatura do adesivo à base de poliuretano reativo (PUR) foi realizado com a utilização de balança digital, na qual o recipiente foi pesado antes e depois da aplicação em cada emenda, seguindo a recomendação do fabricante de aplicar-se 200 g/m<sup>2</sup>.

Tabela 6. Geometrias dos entalhes para cada tratamento.

Geometria	Comprimento $L_d$ (mm)	Largura da base $t_d$ (mm)	Largura da ponta $b_d$ (mm)	Grau de Enfraquecimento $v_d$ (%)
<i>P. taeda</i> - A	21,8	6,7	1,5	22%
<i>P. taeda</i> - B	19,1	6,5	1,7	26%
<i>Eucalyptus</i> spp.- A	20,5	6,5	1,5	23%
<i>Eucalyptus</i> spp.- B	18,6	6,6	1,8	27%

Legenda: A = Geometria A; B = Geometria B. Fonte: Autora, 2017.

As amostras permaneceram armazenadas por 72 h para a cura do adesivo PUR que se solidifica e não retorna à condição líquida. Após esse período, todas as peças foram serradas e aplainadas obtendo-se dimensões finais aproximadas de 45,0 cm x 4,9 cm x 1,8 cm.

O processo de prensagem das peças foi realizado de duas formas: (i) com prensa hidráulica automatizada em pátio fabril; e (ii) com prensa manual em laboratório, monitorado com sistema de aquisição de dados da HBM, modelo MX440A®, softwares Catman Easy® e Quantum X®, com célula de carga U10M® com capacidade de 125 kN. A Figura 3 ilustra estas etapas do processo de fabricação dos corpos de prova.

Figura 3. Sistemas de prensagem para colagem das emendas por entalhes múltiplos.



(A)

(B)

(C)

Legenda: (A) Prensa automatizada. (B) Contenção lateral para prensa manual. (C) Prensa manual com sistema de aquisição de dados. Fonte: Autora, 2016.

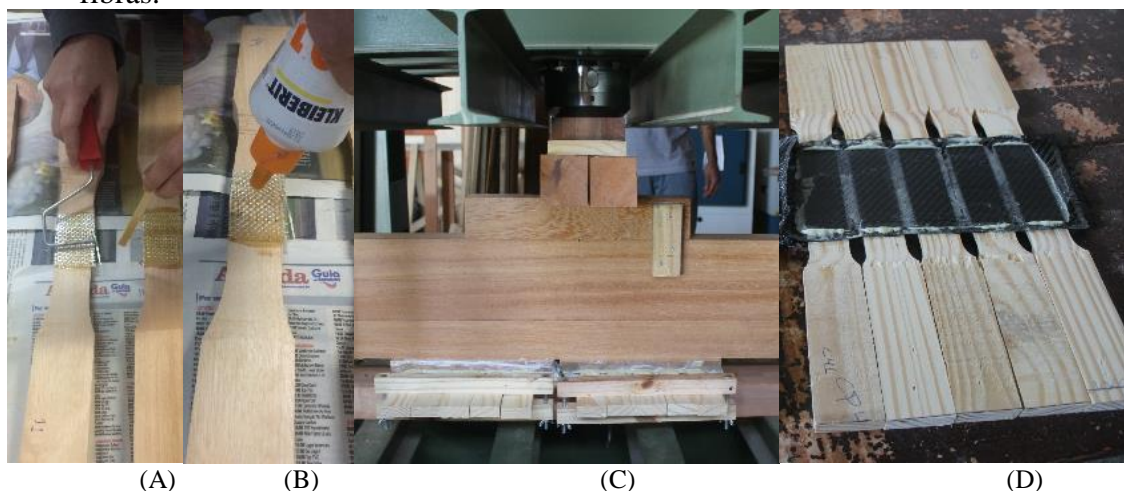
A pressão de colagem no sistema de prensagem hidráulica utilizado foi em média de 4,4 MPa para *P. taeda* e de 8,8 MPa para *Eucalyptus* spp. Já no sistema manual utilizado no laboratório, a pressão de colagem para cada corpo de prova, foi em média de 4,6 MPa para *P. taeda* e de 6,5 MPa para *Eucalyptus* spp. Estes valores são inferiores àquele recomendado pelo projeto de revisão da PNBR 7190/2011. Porém, salienta-se que estes foram determinados por meio de ensaios preliminares, nos quais foi observada a ruptura das emendas quando eram utilizadas pressões superiores a estes valores. A variação das pressões médias entre as duas espécies pode ser explicada pela diferença na densidade básica dos lotes.

Ao final, as peças foram usinadas em marcenaria para atenderem as dimensões do corpo de prova de tração paralela às fibras, conforme sugere o anexo B da NBR 7190/1997.

### 3.2.3 Aplicação dos reforços nos corpos de prova

Na área central do corpo de prova de tração paralela às fibras, região em que se encontra a emenda por entalhe múltiplo, foi aplicado o mesmo adesivo PUR com gramatura controlada e recomendada pelo fabricante de 200 g.m<sup>2</sup>. Sobre o adesivo foi posicionado o reforço em fibra e posteriormente realizado o processo de desaeração. Em seguida, foi aplicado novamente o adesivo, conforme Figura 4, sendo estes prensados manualmente com o controle de pressão empregando-se o mesmo sistema de aquisição de dados da HBM. Este processo foi realizado em ambas as faces do corpo de prova e a pressão de colagem foi de 1 MPa. A aplicação dos reforços ocorreu, em no máximo, 24 h após a usinagem dos corpos de prova, seguindo as mesmas recomendações de colagem da fabricação da MLC.

Figura 4. Aplicação do reforço com tecidos de fibras em corpo de prova de tração paralela às fibras.



Legenda: (A) Desaeração; (B) Aplicação da camada final de adesivo; (C) Pressão de colagem controlada com sistema de aquisição de dados da HBM; (D) Aspecto dos corpos de prova pós prensagem/cura do adesivo. Fonte: Autora, 2016.

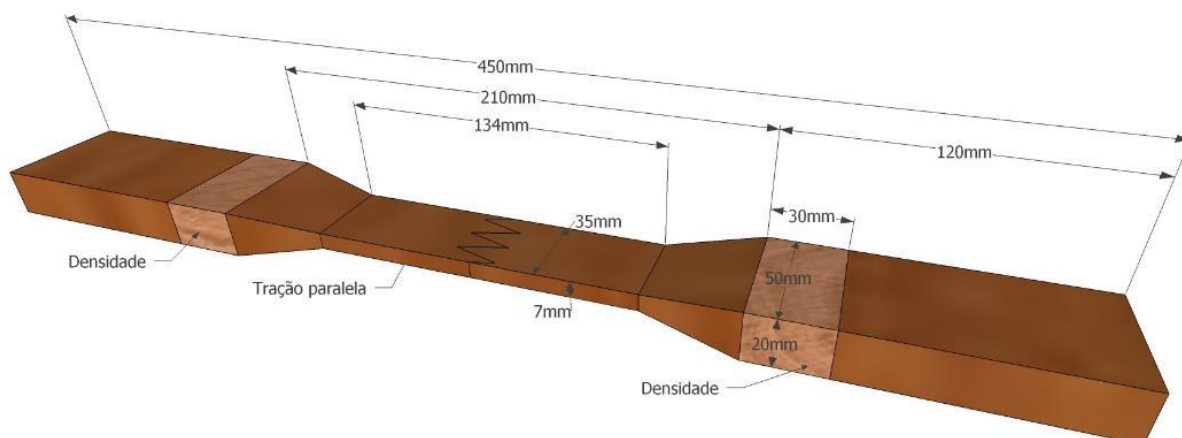
Os tecidos de fibras sintéticas utilizados como reforço foram: (i) o tecido bidirecional de fibras de vidro, do tipo tela 1x1, com 5x5 fios/cm, 200 g.m<sup>-2</sup> de densidade e 0,18 mm de espessura; e (ii) o tecido bidirecional de fibras de carbono, do tipo sarja 2x2, com 5x5 fios/cm, 200 g.m<sup>-2</sup> de densidade e 0,40 mm de espessura. O comprimento da fibra a ser aplicada foi na proporção de 4:1, sendo 4 unidades de comprimento de fibra para cada unidade de área da seção transversal do entalhe. Essa metodologia foi adotada após execução de ensaios preliminares, visando diminuir a ocorrência de rupturas por cisalhamento na ligação fibra/madeira.

#### 3.2.4 Ensaios de avaliação tecnológica

As análises tecnológicas realizadas foram com base nos ensaios tração paralela às fibras, densidade básica e densidade aparente, teor de umidade e modos de ruptura.

O ensaio de tração paralela às fibras foi executado em Máquina Universal de Ensaios, modelo EMIC DL 30000, com velocidade de carregamento monotônica crescente a uma taxa de 10 MPa/min. Os corpos de prova para a determinação da densidade e teor de umidade da madeira foram retirados dos corpos de prova de tração paralela às fibras após o ensaio e isentos de defeitos, conforme mostra a Figura 5, sendo assim, possível estabelecer uma correlação direta entre as propriedades estudadas.

Figura 5. Esquema para extração dos corpos de prova de densidade.



Fonte: Autora, 2016.

Os procedimentos para obtenção da densidade básica, densidade aparente e teor de umidade da madeira consistiram na mensuração e pesagem dos corpos de prova em três momentos: (i) após o ensaio de tração paralela às fibras, (ii) saturados e (iii) à 0% de umidade.

Foi realizada também a análise dos modos de ruptura das peças submetidas ao ensaio de tração paralela às fibras, pela norma ASTM D 4688 (1999), que sugere seis modos de ruptura.

### 3.2.5 Tratamento estatístico

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC), em dois sistemas de fatorial. A primeira fatorial, executada a fim de avaliar se há perda significativa de resistência mecânica das emendas por entalhes múltiplos em relação à madeira maciça, considera como fatores as espécies utilizadas e as diferentes geometrias (sem reforço) com a madeira maciça, em um esquema 2 x 3. Todos os tratamentos com emendas por entalhes múltiplos foram analisados em uma segunda fatorial, 2 x 18, a fim de avaliar se haveria diferença significativa em relação à resistência à tração paralela às fibras.

Os testes estatísticos empregados foram os: de Grubbs para valores espúrios, de normalidade dos resíduos por Kolmogorov-Sminorv, de transformação dos valores por Johnson quando necessária, de homogeneidade das variâncias por Bartlett, de análise de variância ANOVA, e de comparação entre médias por Scott Knott, sendo todos com 95% de confiabilidade. Também foi realizada análise de regressão a fim de determinar o grau de correlação entre a densidade aparente e a resistência à tração paralela às fibras.

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.3.1 Tração paralela às fibras

Para a análise fatorial entre as geometrias e as espécies na resistência à tração paralela às fibras, a correlação desses fatores não apresentou diferença significativa. Entretanto, a diferença foi significativa quanto às diferentes geometrias analisadas, como é possível observar na Tabela 7.

Tabela 7. Desempenho das geometrias sem reforço.

<i>Geometria</i>	<i><math>f_{t,0m}</math> (MPa)*</i>	<i>Coefficiente de Variação (%)</i>
Maciça	64,73 a	28
B	43,42 b	25
A	37,05 c	35

Legenda:  $f_{t,0m}$  = resistência média à tração paralela às fibras a 12% de umidade; Maciça = tratamento sem presença de emenda; B = tratamento com emendas da geometria B; A = tratamento com emendas da geometria A; \* Médias seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferenciam entre si pelo teste de Scott Knott ( $p>0,05$ ). Fonte: Autora, 2017.

Raftery & Harte (2013), estudando a espécie *Irish-Grown Sitka Spruce*, obtiveram resistência máxima à tração paralela às fibras de 104 MPa para corpos de prova maciços e de 45 MPa para os corpos de prova com emendas por entalhes múltiplos. Isso significa uma eficiência de apenas 43,3% com relação à madeira maciça. Já os resultados encontrados neste estudo, ambas as geometrias apresentaram taxas de eficiência superiores ao apresentado pelos autores citados, com uma eficiência média de 57% para a geometria A e de 67% para a geometria B.

Os principais fatores de influência foram controlados durante o processo de execução das emendas, conforme citado anteriormente, e ainda assim as geometrias não permitiram desempenhos adequados.

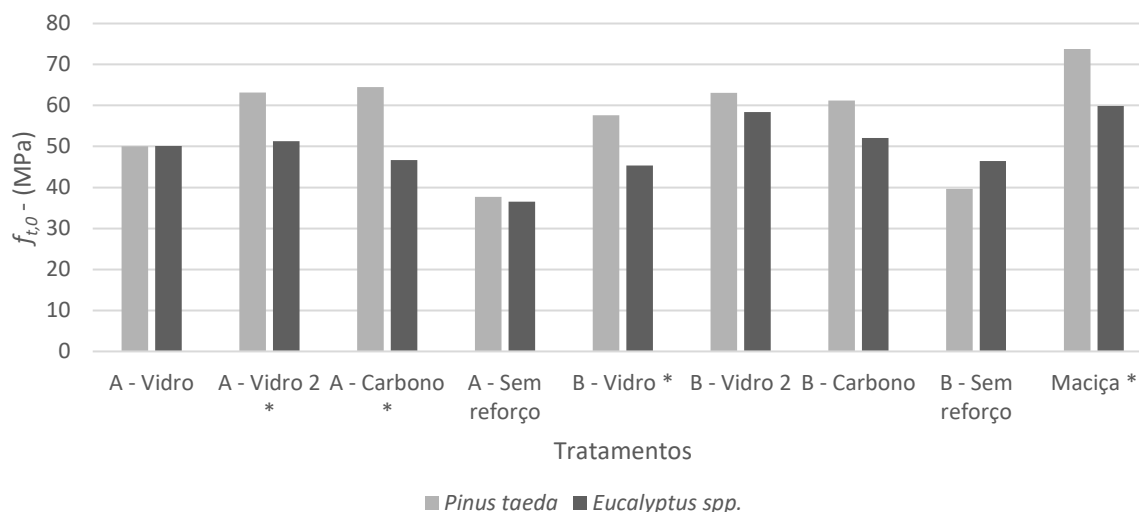
A segunda análise fatorial executada indicou que a relação entre os fatores espécie e tratamentos é significativa em ambos os sentidos, conduzindo os desdobramentos por fator. Na Tabela 8, são apresentados os resultados da estatística para as espécies dentro de cada tratamento, e a Figura 6, ilustra graficamente as diferenças.

Tabela 8. Desempenho das espécies de acordo com os tratamentos.

Tratamento	Espécie	$f_{t,0m}$ (MPa)*	Coefficiente de Variação (%)
A - Vidro	<i>P. taeda</i>	50,00 a	8
	<i>Eucalyptus spp.</i>	50,10 a	29
A - Vidro2	<i>P. taeda</i>	63,15 a	11
	<i>Eucalyptus spp.</i>	51,30 b	42
A - Carbono	<i>P. taeda</i>	64,52 a	11
	<i>Eucalyptus spp.</i>	46,70 b	40
A - Sem reforço	<i>P. taeda</i>	37,73 a	16
	<i>Eucalyptus spp.</i>	36,53 a	46
B - Vidro	<i>P. taeda</i>	57,61 a	18
	<i>Eucalyptus spp.</i>	45,39 b	23
B - Vidro2	<i>P. taeda</i>	63,10 a	9
	<i>Eucalyptus spp.</i>	58,38 a	30
B - Carbono	<i>P. taeda</i>	61,24 a	24
	<i>Eucalyptus spp.</i>	52,08 a	25
B - Sem reforço	<i>P. taeda</i>	39,68 a	21
	<i>Eucalyptus spp.</i>	46,41 a	25
Maciça	<i>P. taeda</i>	73,80 a	22
	<i>Eucalyptus spp.</i>	59,90 b	29

Legenda:  $f_{t,0m}$  = Resistência média à tração paralela às fibras; Vidro = Uma camada de tecido de fibras de vidro; Vidro2 = Dupla camada de tecido de fibras de vidro; Carbono = Uma camada de tecido de fibras de carbono; A = Geometria A; B = Geometria B; \* Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferenciam entre si pelo teste de Scott Knott ( $p>0,05$ ). Fonte: Autora, 2017.

Figura 6. Gráfico desempenho das espécies dentro de cada tratamento.



Legenda:  $f_{t,0m}$  = Resistência média à tração paralela às fibras; Vidro = Uma camada de tecido de fibras de vidro; Vidro2 = Dupla camada de tecido de fibras de vidro; Carbono = Uma camada de tecido de fibras de carbono; A = Geometria A; B = Geometria B; \* Médias diferentes entre si pelo teste de Scott Knott ( $p>0,05$ ). Fonte: Autora, 2017.

O desempenho estatisticamente diferente entre as espécies era esperado, por terem propriedades físicas e mecânicas reconhecidamente distintas. Entretanto, analisando a Figura 6, é possível perceber que as espécies apresentaram respostas diferentes também com relação ao tipo de reforço aplicado. A madeira de *Pinus taeda* teve perda de resistência de 48,9 e 46,2% nos tratamentos com as geometrias A e B não reforçadas, respectivamente, comparadas à madeira maciça. Por sua vez, os mesmos tratamentos aplicados ao *Eucalyptus* spp. apresentaram perdas inferiores, de 39,1 e 22,5%, respectivamente.

Pereira *et al.* (2016), em estudo de emendas por entalhes múltiplos não reforçadas com um híbrido de *E. grandis* com *E. urophylla*, encontraram médias de 50,73 MPa para corpos de prova sem emendas e 19,10 MPa para corpos de prova com a emenda. Os autores obtiveram uma eficiência de 47,7% em relação à madeira maciça, porém, o desempenho foi inferior aos tratamentos sem reforço aplicados neste estudo.

Em função da diferença significativa no comportamento de cada espécie, os tratamentos foram analisados separadamente para cada uma. A Tabela 9 apresenta os resultados de comparação das médias pelo teste de Scott Knott para estas análises.

Tabela 9. Desempenho dos tratamentos de acordo com as espécies.

<i>Espécie</i>	<i>Tratamento</i>	$f_{t,0m}$ (MPa)*	<i>Taxa de</i> <i>Eficiência (%)</i>	<i>Coeficiente de</i> <i>Variação (%)</i>
<i>Eucalyptus</i> spp.	Maciça	59,90 a	100	29
	B - Vidro 2	58,38 a	97,4	30
	B - Carbono	52,08 a	86,9	25
	A - Vidro 2	51,30 a	85,6	42
	A - Vidro	50,10b	83,6	29
	A - Carbono	46,70b	77,9	40
	B - Sem reforço	46,41b	77,5	25
	B - Vidro	45,39b	75,8	23
	A - Sem reforço	36,53 b	60,9	46
<i>P. taeda</i>	Maciça	73,80 a	100	22
	A - Carbono	64,52 a	87,4	11
	A - Vidro 2	63,15 a	85,6	11
	B - Vidro 2	63,10 a	85,5	9
	B - Carbono	61,24 a	82,9	24
	B - Vidro	57,61 a	78,1	18
	A - Vidro	50,00 b	67,7	8
	B - Sem reforço	39,68 b	53,7	21
	A - Sem reforço	37,73 b	51,1	16

Legenda:  $f_{t,0m}$  = Resistência média à tração paralela às fibras; Vidro = Uma camada de tecido de fibras de vidro; Vidro2 = Dupla camada de tecido de fibras de vidro; Carbono = Uma camada de tecido de fibras de carbono; A = Geometria A; B = Geometria B; \* Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferenciam entre si pelo teste de Scott Knott ( $p > 0,05$ ). Fonte: Autora, 2017.

Os resultados mostram que a aplicação de reforço é significativamente eficiente em alguns tratamentos para ambas as espécies, permitindo alcançar desempenho semelhante ao da madeira maciça.

Para as amostras em madeira de *Eucalyptus* spp., os tratamentos “A – Vidro 2”, “B – Vidro 2” e “B – Carbono” são considerados estatisticamente iguais ao tratamento madeira maciça, ainda que com médias ligeiramente inferiores. Os tratamentos de ambas as geometrias “Sem reforço” e “Vidro” e o tratamento “A – Carbono” foram considerados inferiores ao tratamento madeira maciça.

Já para o caso do *P. taeda*, o único tratamento que recebeu aplicação de reforço e não apresentou incremento significativo de resistência foi o “A – Vidro”, permanecendo equiparado aos tratamentos referentes às geometrias não reforçadas. Todos os demais tratamentos mostraram aumento significativo de resistência mecânica, equiparando-se ao desempenho da madeira maciça.



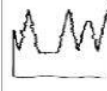
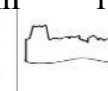
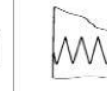

As amostras de madeira maciça analisadas neste trabalho apresentaram resistências mecânicas próximas às apresentadas pela NBR 7190 (1997), em que o *P. taeda* apresenta resistência média à tração paralela às fibras de 82,8 MPa e o *E. grandis* de 70,2 MPa e superiores às encontradas por Stüpp (2016), de 44,48 e 53,33 MPa, respectivamente. Stüpp (2016), ainda, analisando o desempenho de duas geometrias de emendas por entalhes múltiplos semelhantes àquelas utilizadas neste trabalho, coladas com PUR e sem reforço, em *E. grandis* e *P. taeda*, obteve resistências médias à tração paralela às fibras de 28,01 e 19,78 MPa e 26,68 e 17,98 MPa, respectivamente. Tais valores foram inferiores àqueles obtidos neste estudo, o que indica um bom desempenho das emendas sem a aplicação do reforço.

Amaya (2013), estudando um híbrido de *E. grandis* com *E. urophylla* com emendas por entalhes múltiplos de 28 mm de comprimento utilizou três tratamentos, (i) sem reforço, (ii) reforçada com uma camada tecido de fibras de vidro e (iii) reforçada com quatro camadas de tecido de sisal obteve resistências médias à tração paralela às fibras de 52, 82 e 87 MPa, respectivamente. Estes resultados mostram a efetividade da utilização do reforço como forma de aumentar a eficiência da ligação na direção longitudinal nos corpos de prova, chegando a um incremento de até 67% na resistência à tração paralela às fibras no tratamento de reforço com sisal. Esse incremento se mostrou superior ao encontrado no presente estudo para o *Eucalyptus* spp., que foi de 25,8% para o tratamento com melhor desempenho. Entretanto, no caso do *P. taeda*, o tratamento com melhor desempenho (“A – Carbono”) permitiu alcançar um incremento de 71% na resistência média à tração paralela às fibras.



Os modos de ruptura foram classificados de acordo com as recomendações da ASTM D4688 (1999), pela contagem do número de ocorrências e estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Modos de ruptura de acordo com a ASTM D 4688 (1999).

<i>Espécie</i>	<i>Tratamento</i>						
<i>P. taeda</i>	A – Vidro	-	1	4	3	1	1
	A – Vidro2	-	2	1	2	1	4
	A – Carbono	-	-	3	2	-	4
	A – Sem reforço	-	-	4	5	1	-
	B – Vidro	-	-	1	5	1	8
	B – Vidro2	-	1	1	1	3	9
	B – Carbono	-	-	1	2	1	11
	B – Sem reforço	-	-	3	8	1	-
<i>Total A</i>		0	3	12	12	3	9
<i>Total B</i>		0	0	6	16	6	28
<i>Total P. taeda</i>		0 (0)	3 (3%)	18 (20%)	28 (31%)	9 (10%)	37 (41%)
<i>Eucalyptus</i> spp.	A – Vidro	-	1	2	6	2	4
	A – Vidro2	-	-	2	1	3	9
	A – Carbono	-	1	-	1	2	10
	A – Sem reforço	2	-	1	4	7	-
	B – Vidro	-	-	1	5	1	8
	B – Vidro 2	-	1	1	1	3	9
	B – Carbono	-	-	1	2	1	11
	B – Sem reforço	2	2	2	2	4	3
<i>Total A</i>		2	2	5	12	14	23
<i>Total B</i>		2	3	5	10	9	31
<i>Total Eucalyptus spp.</i>		4 (3%)	5 (4%)	10 (7%)	22 (16%)	23 (17%)	54 (41%)
<b>Total Geral</b>		<b>4 (2%)</b>	<b>8 (4%)</b>	<b>28 (13%)</b>	<b>50 (22%)</b>	<b>32 (14%)</b>	<b>91 (41%)</b>

Legenda: A = Geometria A; B = Geometria B; Carbono = Uma camada de tecido de fibras de carbono; Vidro = Uma camada de tecido de fibras de vidro; Vidro2 = Dupla camada de tecido de fibras de vidro; Sem Reforço = com emenda sem aplicação de reforço; % = frequência relativa. Fonte: Autora, 2017.

Segundo Habipi & Ajdinaj (2015), peças unidas por entalhes múltiplos e produzidas a partir de espécies de menor densidade básica tendem a falhar na madeira, enquanto que aquelas de alta, rompem-se nas emendas, onde a resistência mecânica da linha de cola é o fator mais relevante. Considerando que as densidades básicas ( $\rho_{bas}$ ) médias do *P. taeda* e do *Eucalyptus* spp. foram de 0,40 e 0,47 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, este efeito não pode ser observado com clareza, provavelmente devido à pequena variação entre as densidades básicas médias.

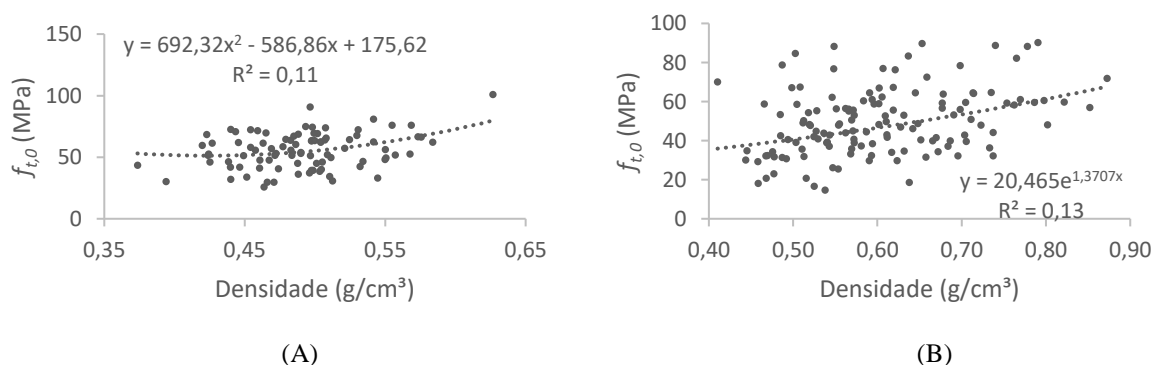
Stüpp (2016), em estudo que avaliou o desempenho de duas geometrias de emendas semelhantes àsquelas utilizadas neste trabalho, coladas com PUR e sem reforço, em *P. taeda* e *E. grandis*, observou maior frequência no modo de ruptura IV, para ambas as espécies e geometrias. Bustos *et al.* (2003), avaliando pressões de colagem e tempo de cura em emendas por entalhes múltiplos com madeira de *Picea mariana*, obtiveram 80% das rupturas nos modos III e IV, frequência superior àquela atingida nesta pesquisa. Desta forma, o aumento da frequência das rupturas na madeira nos tratamentos com aplicação de reforço indica uma melhora efetiva no desempenho das emendas longitudinais reforçadas, relativas também à gramatura do adesivo e pressão de colagem.

### 3.3.2 Propriedades físicas e análise de correlação

O teor de umidade médio do lote de madeira de *P. taeda* foi de 16% e de *Eucalyptus* spp. foi de 12%. As densidades básica ( $\rho_{bas}$ ) e aparente ( $\rho_{ap}$ ) das espécies avaliadas foram de 0,40 e 0,49 g/cm<sup>3</sup> para o *P. taeda* e de 0,47 e 0,60 g/cm<sup>3</sup> para o *Eucalyptus* spp., respectivamente. Segundo Ajdinaj & Habipi (2015), a MLC pode ser feita com madeiras de dicotiledôneas ou coníferas, que possuam baixa densidade (já que estas quando inferiores a 0,7 g/cm<sup>3</sup> aparentam ter um melhor comportamento, por terem maior facilidade na colagem e, portanto, permitindo maior penetração do adesivo) e umidade no máximo de 18% (NBR 7190-97), indicando conformidade das propriedades físicas fundamentais para uso em MLC.

As análises de correlação entre a resistência à tração paralela às fibras e a densidade aparente do material avaliado é apresentada graficamente na Figura 7 e apêndice A.

Figura 7. Correlação entre a resistência à tração paralela às fibras e densidade aparente para *P. taeda* e *Eucalyptus* spp..



Legenda: (A) *P. taeda*; (B) *Eucalyptus* spp.. Fonte: Autora, 2017.

Observando os gráficos de ambas as espécies é possível identificar uma leve tendência crescente da resistência à tração paralela às fibras conforme o aumento da densidade aparente. Entretanto, pela nuvem de distribuição e análise do  $r^2$  constata-se correlação fraca, conforme Figura 7. Avaliando os tratamentos separadamente, conforme apêndice A, não é possível identificar um padrão de comportamento, nem mesmo para a madeira maciça.

Christoforo *et al.* (2013) encontraram correlação moderada entre a densidade e a resistência à tração paralela às fibras estudando madeira maciça das espécies *Ocotea* sp. ( $r^2 = 0,74$ ), *Xylopia* sp. ( $r^2 = 0,66$ ), *Micropholis venulosai* ( $r^2 = 0,75$ ), *Vochysia* sp. ( $r^2 = 0,79$ ) e *Protium* sp. ( $r^2 = 0,61$ ), constatando que a densidade influencia diretamente nas propriedades mecânicas.

Esta tendência crescente da resistência à tração paralela às fibras conforme aumento da densidade média também é encontrada na literatura para madeira com emendas longitudinais, como Vrazel & Sellers (2004), que encontraram uma resistência à tração paralela às fibras média de 63,76 MPa para o *Dipterocarpus* spp. ( $\rho_{bas} = 0,78$ ) e de 55,99 e 54,64 MPa para as espécies *Pinus* spp. ( $\rho_{bas} = 0,58$ ) e *Pseudosuga menziesii* ( $\rho_{bas} = 0,55$ ) em emendas coladas com PUR. Todavia, para Pereira *et al.* (2016), tratando de emendas longitudinais, este desempenho pode ser influenciado por outras características naturais ou anatômicas da madeira de tal forma que não se torna possível concluir que esta relação seja uma regra para todas as espécies.

Salienta-se, ainda, que a alta variabilidade no comportamento das amostras de eucalipto (CV% acima do limite normativo em 6 dos 9 tratamentos – Tabela 8, página 28) analisadas pode omitir resultados de diferença significativa entre tratamentos. Essa variação, possivelmente, está ligada às diferenças de densidade aparente dentro do lote avaliado ( $\rho_{ap}$  mínima de 0,4 e máxima de 0,9 g/cm<sup>3</sup>), superior àquela encontrada para o *P. taeda* ( $\rho_{ap}$  mínima de 0,4 e máxima de 0,6 g/cm<sup>3</sup>). Variações dessa magnitude tornam o material demasiadamente heterogêneo, dificultando a determinação de um comportamento padrão.

### 3.4 CONCLUSÕES

Por meio das análises realizadas neste experimento foi possível concluir que a resistência mecânica das emendas por entalhes múltiplos não reforçadas foi significativamente inferior à madeira maciça, independentemente da espécie ou da geometria utilizada.

O desempenho das espécies em relação aos tratamentos aplicados apresentou diferença significativa, sendo que a execução das emendas sem aplicação de reforço teve taxas de eficiência inferiores para a espécie *P. taeda*. Entretanto, nesta mesma espécie, os incrementos em resistência à tração paralela às fibras com a aplicação dos reforços foram mais evidentes, alcançando-se um incremento máximo com relação às emendas não reforçadas de 71%, enquanto que o tratamento mais eficiente nas amostras de *Eucalyptus* spp. permitiu um incremento de 25,8%.

Alguns dos reforços aplicados aumentaram a resistência média à tração paralela às fibras de maneira significativa, equiparando o desempenho das emendas ao da madeira maciça nos seguintes tratamentos:

- *Eucalyptus* spp.:
  - Geometria A – Reforço com dupla camada de tecido de fibras de vidro;
  - Geometria B – Reforço com dupla camada de tecido de fibras de vidro;
  - Geometria B – Reforço com uma camada de tecido de fibras de carbono.
- *P. taeda*:
  - Geometria A – Reforço com dupla camada de tecido de fibras de vidro;
  - Geometria A – Reforço com uma camada de tecido de fibras de carbono;
  - Geometria B – Reforço com uma camada de tecido de fibras de vidro;
  - Geometria B – Reforço com dupla camada de tecido de fibras de vidro;
  - Geometria B – Reforço com uma camada de tecido de fibras de carbono.

### 3.5 RECOMENDAÇÕES

A utilização de diferentes pressões de colagem nas espécies avaliadas, determinadas por ensaios preliminares e inferiores àquelas definidas por norma, indica a necessidade de avaliação de várias escalas de densidade para a determinação das pressões ideais de colagem. Outros fatores que podem ser avaliados são as características químico-anatômicas de cada espécie para execução da emenda, pois estas podem influenciar significativamente na capacidade de absorção do adesivo pela madeira.

Recomenda-se ainda a execução de estudos que avaliem o quanto a aplicação do reforço influencia na relação resistência à tração paralela às fibras e densidade aparente, auxiliando significativamente no desenvolvimento deste tipo de tecnologia já que não foram constatadas correlações entre esses parâmetros neste trabalho.

#### 4      **CAPÍTULO II - CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA LAMINADA COLADA DE *Eucalyptus* spp. COM E SEM REFORÇO DE FIBRAS DE VIDRO OU CARBONO**

##### RESUMO

Melhorar o comportamento estrutural de edificações combinando materiais de reforço com os de construção convencionais é um conceito antigo, amplamente utilizado na construção civil. Nesse sentido, o reforço à flexão em elementos estruturais com emendas por entalhes múltiplos utilizando fibras surgiu como uma técnica especialmente adequada à madeira. Para tanto, no presente capítulo objetiva-se avaliar o desempenho de Madeira Laminada Colada (MLC) produzida em *Eucalyptus* spp., com três composições de reforço, “Vidro”, “Vidro2” e “Carbono” quanto à resistência à tração paralela às fibras, tração perpendicular às fibras, cisalhamento e flexão estática. Todos os ensaios foram executados de acordo com as diretrizes da NBR 7190/1997, sendo empregado o teste de Tukey para as análises estatísticas com 95% de confiabilidade. O desempenho das vigas MLC de *Eucalyptus* spp. não apresentou diferenças significativas para a avaliação das linhas de colagem. Entretanto, na resistência à flexão, os tratamentos “Vidro 2” e “Carbono” foram significativamente superiores às vigas MLC sem reforço, chegando a incrementos de 37,8% e 40,5%, respectivamente, nas tensões axiais. Os módulos de elasticidade não diferiram significativamente entre si. Foi constatada ruptura por tração na região das emendas em todas as vigas avaliadas, entretanto as tensões de flexão foram superiores às resistências à tração paralela às fibras, indicando influência da espessura das lâminas e espessura dos reforços no desempenho das emendas reforçadas. Desta forma, é possível concluir que a aplicação de reforço concentrado na região das emendas por entalhes múltiplos melhora, significativamente, o desempenho de vigas MLC de *Eucalyptus* spp. em flexão.

**Palavras-chave:** *Eucalyptus* spp.; engenheirado em madeira; emendas por entalhes múltiplos reforçadas.

## 4.1 INTRODUÇÃO

O aquecimento do mercado madeireiro, em função do uso da madeira na construção civil, é uma realidade a nível mundial. Isso se deve a grande versatilidade do material, que pode ser processado em diversas formas como madeira serrada, lâminas, partículas e fibras. Estes elementos podem, então, ser combinados com adesivos para dar forma a uma grande variedade de compósitos engenheirados em madeira como a Madeira Laminada Colada (MLC), Vigas “I”, Painéis de lâminas paralelas (LVL – *Laminated Veneer Lumber*) e a Madeira laminada colada cruzada (CLT – *Cross Laminated Timber*) (NADIR *et al.*, 2016).

Considerando o destaque que a Madeira Laminada Colada (MLC) vem obtendo nesse meio, devido ao seu uso em construções duradouras de grande porte, a sua capacidade de vencer amplos vãos e elevadas cargas (GLIŠOVIĆ *et al.*, 2015), bem como pela diminuição da pressão sobre as florestas nativas (BAYATKASHKOLI *et al.*, 2012; HABUPI *et al.*, 2016), devem ser efetuados estudos que auxiliem no desenvolvimento do emprego de madeiras de floresta plantada nessa tecnologia.

Embora seja um dos mais antigos produtos resultantes da colagem de lâminas, a MLC ainda não é um material plenamente justificável para o emprego nas construções brasileiras, devido à pequena tradição do seu uso, do elevado custo dos adesivos e do reduzido número de empresas envolvidas em sua fabricação. Em contraposição, suas vantagens em relação à madeira serrada são relevantes, especialmente quanto à possibilidade de se produzir peças praticamente sem limitações dimensionais, com aumentos de resistência mecânica e rigidez (MIOTTO & DIAS, 2010), da adaptabilidade do sistema e da constante evolução das tecnologias na produção de compósitos engenheirados em madeira. Todavia, sua resistência à flexão, muitas vezes, continua limitada pela presença das emendas por entalhes múltiplos (*finger-joints*) nas zonas de concentração de tensões (GLIŠOVIĆ *et al.*, 2015).

Para Danawade *et al.* (2014), a emenda por entalhe permite o uso pleno da madeira, por retirar defeitos e aumentar a homogeneidade do material, ainda que de forma geral reduza a sua resistência mecânica. Segundo Khelifa *et al.* (2015b), a madeira apresenta altas resistências às tensões de tração e de compressão na direção paralela às fibras, porém, geralmente acompanhada de baixa rigidez. Desta forma, o reforço em vigas de madeira pode alcançar maior rigidez, sem necessidade de aumentar as dimensões do elemento estrutural.

Segundo Nadir *et al.* (2016), ao longo das últimas décadas, a madeira e seus derivados têm sido reforçados por meio de diversas técnicas, que incluem o uso de placas e barras de aço ou de alumínio, cabos de aço de alta resistência, lâminas pré esforçadas e polímeros

reforçados com fibras. Neste sentido, a utilização de tecidos com fibras associados a matrizes poliméricas como reforço em elementos estruturais de madeira tem se tornado cada vez mais usual devido às suas vantagens, tais como elevada resistência mecânica em relação ao seu peso, excelente resistência à corrosão e boa durabilidade (LU *et al.*, 2015).

Atualmente, os adesivos epóxis são considerados como a primeira escolha de adesivo para interface fibra/madeira. Raftery & Rodd (2015) revisaram pesquisas que avaliavam o reforço na madeira e concluíram que esses produtos não haviam sido comercializados ainda devido às etapas adicionais com resina epóxi que deviam ser incluídas no processo produtivo. Ademais, materiais como os tecidos de fibras de carbono, utilizados no processo, também têm custo elevado. Em análises experimentais, Khelifa *et al.* (2016) mostraram que o uso de um menor comprimento desta tipologia de reforço, apenas próximo às regiões de concentração de tensões, pode resultar na diminuição de volume de madeira elevando a resistência mecânica do produto MLC.

Salienta-se ainda que, para construções de alto valor ou nas quais a rigidez e resistência mecânica são fatores decisivos, madeiras provenientes de reflorestamentos são frequentemente consideradas inferiores às aquelas originárias de florestas nativas. Pela perspectiva da pesquisa, este problema é superado com a utilização de técnicas de engenharia da madeira. O desenvolvimento de novos produtos neste gênero auxilia na utilização efetiva e aumenta a valorização comercial de madeiras de menor qualidade ou provenientes de toras de menor porte (NADIR *et al.*, 2016).

Ponderando as vantagens da utilização dos compósitos em madeira para fins estruturais, o presente estudo tem por objetivo avaliar tecnologicamente as propriedades mecânicas da MLC de *Eucalyptus* spp. e suas emendas por entalhes múltiplos com reforço de tecidos de fibras de vidro ou de carbono, utilizando o adesivo estrutural de Poliuretano Reativo - PUR.

#### 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

A madeira utilizada foi da espécie *Eucalyptus* spp., proveniente de florestas plantadas do Estado do Rio Grande do Sul. As amostras foram de indivíduos com idade entre 13 e 15 anos. O material selecionado foi proveniente de um lote de aproximadamente 5 m<sup>3</sup> que se encontrava serrado em tábuas de 200 cm x 8 cm x 3 cm, com 11% de umidade. Destas, foram selecionadas 250 tábuas, aleatoriamente, para produção dos corpos de prova.

O adesivo utilizado foi o monocomponente PUR, que inicia o processo de cura quando em contato com a umidade. Foi utilizada a gramatura de 200 g/m<sup>2</sup> recomendada pelo fabricante e uma pressão de 0,7 MPa por 5 h.

Os tecidos de fibras utilizados como reforço foram o de fibras de vidro bidirecional, do tipo tela 1x1, com 5x5 fios/cm, 200 g/m<sup>2</sup> e espessura de 0,18 mm e o tecido de fibras de carbono bidirecional do tipo sarja 2x2, com 5x5 fios/cm, 200 g/m<sup>2</sup> e espessura de 0,40 mm. Quatro unidades de comprimento de fibra foram aplicadas para cada unidade de área da seção transversal no entalhe (proporção 4:1). Essa metodologia foi adotada após a execução de ensaios preliminares com diferentes proporções, visando diminuir a ocorrência de rupturas por cisalhamento na ligação fibra/madeira.

A colagem das emendas por entalhes múltiplos das lâminas, assim como a colagem e prensagem das vigas de MLC, foi executada em pátio fabril. Os ensaios tecnológicos realizados foram: densidade básica e aparente, teor de umidade, tração paralela às fibras, tração perpendicular às fibras, cisalhamento na linha de cola e flexão estática; todos os ensaios foram conduzidos nas dependências do Laboratório de Tecnologia da Madeira da UDESC.

#### *4.2.1 Produção dos corpos de prova*

Das tábuas selecionadas, 100 foram reserradas em 200 peças com dimensões de 80,0 cm x 2,5 cm x 7 cm. Essas amostras foram fresadas obtendo-se entalhes múltiplos com as dimensões médias de 18,6 mm de comprimento, 6,6 mm de largura da base e 1,8 mm de largura da ponta do entalhe. Para a colagem das emendas utilizou-se uma prensa hidráulica automatizada, adotando-se 8,8 MPa de pressão. Após 24 h da cura do adesivo, as lamelas foram aplainadas e serradas com dimensão finais de 2 cm x 5 cm x 60 cm e 2 cm x 6 cm x 160 cm, totalizando 100 lamelas com emendas por entalhes múltiplos.

A geometria do entalhe utilizada é originalmente baseada em padrão normativo do PNBR 7190 (2011) com grau de enfraquecimento de 14% (Tabela 1), porém apresenta variações em função de uma afiação executada nas lâminas da fresadora.

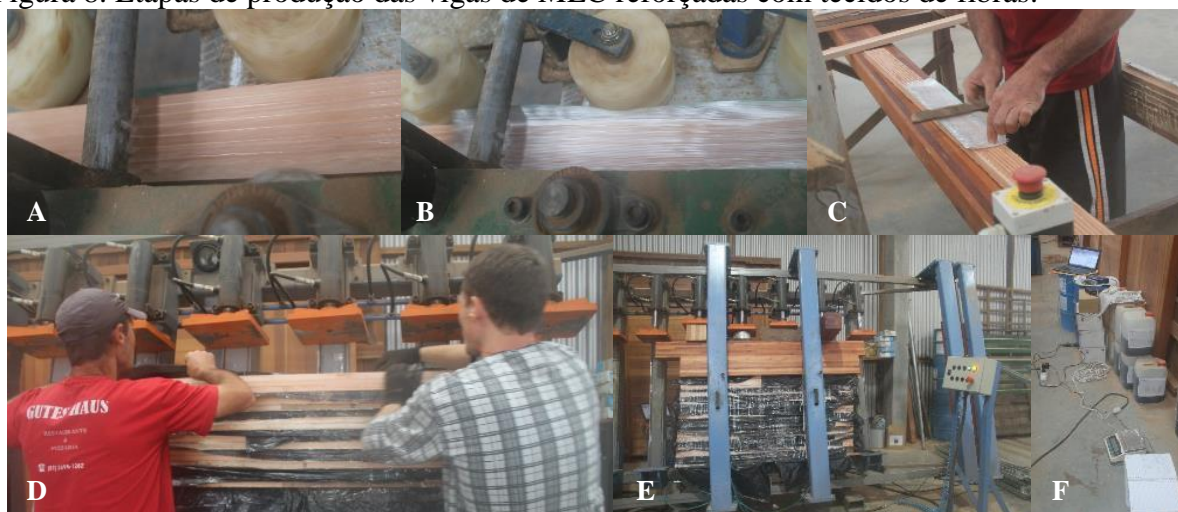
Todas as 100 lamelas produzidas continham na região central apenas uma emenda por entalhe. Destas, foram selecionadas 60 lamelas para a confecção dos corpos de prova de tração paralela às fibras e mais 32 lamelas para a composição da linha inferior nas vigas MLC destinadas ao ensaio de flexão. Concomitantemente, foram preparadas outras 80 lamelas



isentas de defeitos, para compor as demais camadas das vigas MLC e para extração dos corpos de prova de tração normal às fibras e cisalhamento na linha de cola.

As lamelas foram aplainadas e, em seguida, foi aplicado o adesivo com auxílio de uma encoladeira. Antes de as lamelas com adesivo serem colocadas na prensa, os tecidos de fibras foram posicionados sobre as emendas, sendo realizado o processo de desaeração e, novamente, a aplicação de adesivo. A Figura 8 ilustra o processo de produção da MLC.

Figura 8. Etapas de produção das vigas de MLC reforçadas com tecidos de fibras.



Legenda: (A) Encoladeira – Lâmina sem reforço; (B) Encoladeira – Lâmina com reforço; (C) Desaeração da fibra; (D) Composição das lâminas na prensa; (E) Prensagem com célula de carga; (F) Sistema de aquisição de dados. Fonte: Autora, 2016.

O controle de gramatura foi realizado com auxílio de folhas de papel (6 cm x 15 cm) com peso conhecido presos às lâminas. Desta maneira, quando a lâmina passava pela encoladeira, o pedaço de papel recebia a cola da mesma forma que a madeira e então era pesado em balança de precisão. As leituras indicaram uma gramatura média de 197 g/m<sup>2</sup> por linha de cola aplicada.

Também foi realizado o acompanhamento das pressões de colagem ao longo da produção dos elementos. Para tal, foi utilizado, acoplado à prensa, um sistema de aquisição de dados modelo MX440A® da HBM, softwares Catman Easy® e Quantum X®, com célula de carga U10M® com capacidade de 125 kN. De acordo com as leituras realizadas com o sistema de aquisição de dados a pressão média utilizada na fabricação das vigas foi de 0,7 MPa, dentro das recomendações de utilização indicadas pelo fabricante do adesivo, que pressupõe variação de 0,6 a 1 MPa.

#### 4.2.2 Ensaios de avaliação tecnológica

As análises tecnológicas realizadas foram com base nos ensaios tração paralela às fibras, tração perpendicular às fibras, cisalhamento na linha de cola, flexão estática, densidade básica e densidade aparente, teor de umidade e avaliação dos modos de ruptura.

A velocidade de carregamento adotada no ensaio de cisalhamento segue a norma NBR 7190 (1997), porém a geometria do corpo de prova adotada foi semelhante à Norma Francesa NF B 5-32 (1942). Esse modelo de corpo de prova foi adotado em função de estudo realizado por Santos Neto *et al.* (1998), no qual os autores evidenciam a ruptura da madeira por cisalhamento puro com menor variabilidade dos resultados.

A análise dos modos de ruptura foi realizada conforme ASTM D 4688 (1999), que sugere seis modos de ruptura, a partir da contagem do número de ocorrências por modo de ruptura, sendo identificados da seguinte forma:

- Modo 1 = Ruptura ao longo das superfícies da linha de cola com poucas falhas (ruptura na madeira < 70%);
- Modo 2 = Ruptura ao longo das superfícies da linha de cola com considerável ruptura por cisalhamento (ruptura na madeira > 70%);
- Modo 3 = Ruptura ao longo do perfil da emenda, mas com alguma ruptura na base dos entalhes. Considerável ruptura por cisalhamento em toda a superfície do perfil;
- Modo 4 = Ruptura na base das emendas. Poucas falhas ao longo do perfil;
- Modo 5 = Ruptura que começa na ponta da emenda e prossegue na madeira;
- Modo 6 = Ruptura é na madeira (não influenciada pela emenda – toda a ruptura é na madeira).

Os ensaios de tração perpendicular às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento na linha de cola e flexão estática foram executados em máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 3000®. No ensaio de flexão estática, foi utilizado o sistema de aquisição de dados da HBM com mensuração da carga e deslocamento da linha neutra. Os corpos de prova do ensaio de flexão estática possuíam dimensões de 140 cm x 6 cm x 6 cm, dimensões estas superiores àquelas propostas por norma; todavia, seguiram os padrões de proporcionalidade entre seção transversal e vão livre.

Os corpos de prova para a determinação do teor de umidade do lote e para a correlação entre densidade aparente e tração paralela às fibras foram extraídos dos próprios corpos de

prova, um de cada extremidade (conforme Figura 5) e eram isentos de defeitos. A condução dos ensaios e a determinação dos valores de densidade básica, densidade aparente e teor de umidade obedeceram às especificações da NBR 7190/97.

#### 4.2.3 Tratamento estatístico

O delineamento experimental (Tabela 11) utilizado foi inteiramente casualizado (DIC), e os testes estatísticos utilizados, por ensaio tecnológico, foram: teste de Grubbs (ou valores espúrios), normalidade por Kolmogorov-Smirnov, homogeneidade das variâncias por Bartlett, transformação por Johnson, quando necessária, análise de variância ANOVA, Tukey com 95% de significância, além de análise de regressão para determinação do grau de correlação entre a densidade aparente da madeira e a resistência à tração paralela às fibras. O software utilizado para a estatística foi o Action Stat®, em planilha eletrônica Excel®.

Tabela 11. Número de corpos de prova por tratamento.

<i>Ensaio tecnológico</i>	<i>Tratamento</i>	<i>Nº de CPs</i>
Tração normal às fibras	Vidro	7
	Vidro 2	7
	Carbono	7
	Sem Reforço	7
Tração paralela às fibras	Vidro	15
	Vidro 2	15
	Carbono	15
	Sem Reforço	15
	Maciça	15
Cisalhamento	Vidro	8
	Vidro 2	8
	Carbono	8
	Sem Reforço	8
Flexão estática	Vidro	8
	Vidro 2	8
	Carbono	8
	Sem Reforço	8
Densidade básica e densidade aparente	Vidro	30
	Vidro 2	30
	Carbono	30
	Sem Reforço	30

Legenda: Nº de CPs = número de corpos de prova. Fonte: Autora, 2016.

### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.3.1 Propriedades físicas

O teor de umidade médio do lote de *Eucalyptus* spp. foi de 12%, indicando que as peças estavam com teor de umidade adequado para a produção das vigas. Segundo Szücs (1992), os teores de umidade das peças utilizadas para confecção do MLC devem estar entre 7% e 14%. Esse intervalo assegura que não haverá transferência de umidade entre as peças adjacentes evitando possíveis contrações e/ou inchamentos das laminas.

A densidade básica do lote foi de 0,47 g/cm<sup>3</sup> e a aparente de 0,61 g/cm<sup>3</sup>. Isto indica que a madeira de *Eucalyptus* spp. utilizada neste estudo apresenta a densidade dentro do intervalo de 0,40 a 0,75 g/cm<sup>3</sup> necessárias para ser utilizado em elementos de MLC (SZÜCS, 1992; TEREZO & SZÜCS, 2010; AJDINAJ & HABIP, 2015).

#### 4.3.2 Resistência da linha de cola

Miotto & Dias (2010) encontraram resistência média ao cisalhamento de 7,7 MPa para MLC sem reforço produzida com um híbrido de *E. grandis* com *E. urophylla*, média esta superior àquela alcançada neste estudo. Entretanto, Nadir *et al.* (2016), estudando o efeito do reforço de tecidos de fibras de vidro e de carbono em MLC de *Hevea brasiliensis*, obtiveram resistências médias ao cisalhamento de 5,81, 5,61 e 5,52 MPa para os tratamentos sem reforço, reforçado com fibras de vidro e reforçados com fibra de carbono, respectivamente. Tais médias também foram superiores às da presente análise, a única exceção foi o tratamento Vidro 2, que apresentou menor resistência ao cisalhamento, possivelmente causada pelo cisalhamento entre as camadas do reforço (Tabela 12).

Tabela 12. Teste de Tukey (p>0,05) para o ensaio de cisalhamento na linha de cola.

Tratamento	Média ( $f_{v,m}$ ) (MPa)*	Valor característico ( $f_{v,k}$ ) (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Vidro	4,70 a	3,29	38
Vidro 2	3,77 a	2,64	60
Carbono	4,90 a	3,43	55
Sem reforço	4,84 a	4,38	18

Legenda: \*Médias seguidas de letras iguais não diferenciam entre si pelo teste de Tukey (p>0,05). Fonte: Autora, 2017.

Segundo a NBR 7190 (1997), a resistência média à tração normal às fibras do *E. grandis* é de 2,6 MPa. Os resultados obtidos nos quatro tratamentos avaliados foram inferiores ao obtido por esta norma (Tabela 13). Entretanto, para Miotto & Dias (2010), a resistência à tração normal às fibras encontrada foi de 1,60 MPa, o que indica desempenho compatível aos padrões da MLC de eucalipto.

Tabela 13. Teste de Tukey ( $p > 0,05$ ) para o ensaio de tração normal às fibras na linha de cola.

Tratamento	Média ( $f_{t,90m}$ ) (MPa)*	Valor característico ( $f_{t,90k}$ ) (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Vidro	1,69 a	1,18	24
Vidro 2	1,62 a	1,14	67
Carbono	2,37 a	1,66	35
Sem Reforço	2,30 a	2,15	20

Legenda: \*Médias seguidas de letras iguais não diferenciam entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). Fonte: Autora, 2017.

Salienta-se ainda que os ensaios de cisalhamento e tração normal às fibras apresentaram os maiores coeficientes de variação e acima dos padrões limitantes de acordo com a NBR 7190 (1997), possivelmente ocorrido devido ao posicionamento dos tecidos de fibras diminuindo a interação entre madeira e o adesivo. Essas características devem ser melhor avaliadas, a fim de determinar com maior precisão a influência da gramatura no desempenho da linha de cola.

A resistência média a tração Paralela às fibras da madeira maciça foi inferior àquela apresentada na NBR 7190/97 para o *E. grandis*, de 70,2 MPa, porém sendo superior àquela encontrada por Stüpp (2016), de 53,33 MPa para a mesma espécie (Tabela 14). Stüpp (2016), analisando também o desempenho de emendas por entalhes múltiplos coladas com poliuretano, obteve médias de 28,01 e 19,78 MPa para duas geometrias semelhantes às aquelas utilizadas nesta pesquisa. Estas médias são inferiores às obtidas neste estudo (Tabela 14), o que indica um bom desempenho do processo de colagem aplicado neste trabalho. Outro estudo, de Pereira *et al.* (2016), avaliando emendas por entalhes múltiplos não reforçadas com um híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla* e geometria semelhante àquela adotada no presente estudo, apresentou valores característicos de 50,73 MPa para corpos de prova em madeira maciça e de 24,21 MPa para corpos de prova com a emenda, alcançando eficiência de 47,7% em relação à madeira maciça. O valor característico da madeira maciça neste estudo foi inferior ao obtido por Pereira *et al.* (2016), entretanto o tratamento sem reforço mostrou um valor superior, atingindo uma eficiência de 83,1%.

Tabela 14. Teste de Tukey ( $p>0,05$ ) para o ensaio de tração paralela às fibras.

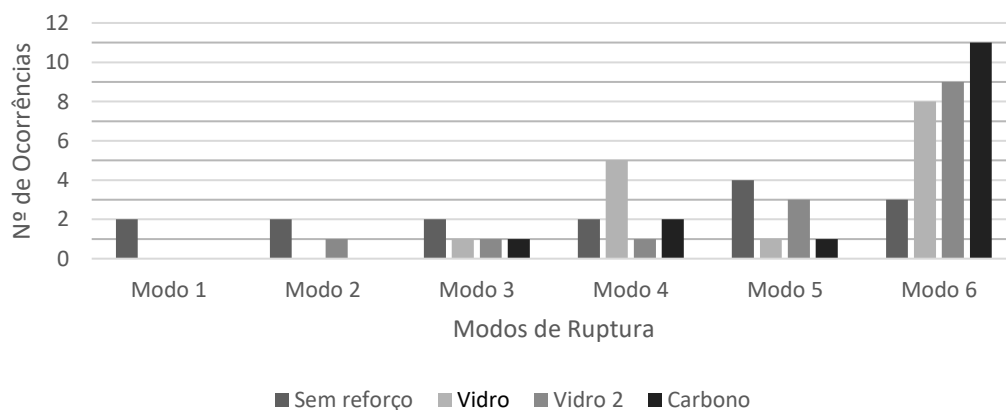
Tratamento	Média ( $f_{t,0m}$ )(MPa)*	Valor característico ( $f_{t,0k}$ )(MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Maciça	59,90 a	42,00	29
Vidro	45,39 a	31,82	23
Vidro 2	58,38 a	40,93	30
Carbono	52,08 a	36,52	25
Sem reforço	46,41 a	34,91	25

Legenda: \*Médias seguida de letras iguais não diferenciam entre si pelo teste de Tukey ( $p>0,05$ ). Fonte: Autora, 2017.

Amaya (2013), estudando um híbrido de *E. grandis* com *E. urophylla* com emendas por entalhes múltiplos de 28 mm de comprimento em três tratamentos, (i) sem reforço, (ii) reforçada com uma camada de tecido de fibras de vidro e (iii) reforçada com quatro camadas de tecido de sisal obteve resistências à tração paralela às fibras médias de 52, 82 e 87 MPa, respectivamente. Estes resultados mostram a efetividade da utilização do reforço como forma de melhorar a eficiência dos entalhes nos corpos de prova, chegando a um incremento de até 67% na resistência à tração paralela às fibras no tratamento de reforço com sisal. Tal incremento foi superior ao encontrado no presente estudo, que foi de 25,8%.

Para Sviták *et al.* (2014), um ótimo desempenho das emendas coladas é caracterizado pelo modo 6 de ruptura, com fratura de 100% na madeira e fora da emenda. Este modo teve maior número de ocorrência nos tratamentos em que o reforço foi aplicado, chegando a 11 ocorrências para o tratamento com tecido de fibras de carbono, 9 para o tratamento com dupla camada de fibras de vidro e 8 para o tratamento com uma camada de fibras de vidro, com apenas 3 nas amostras sem aplicação de reforço, de um total de 15 corpos de prova avaliados por tratamento, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9. Modos de ruptura no ensaio de tração paralela às fibras de acordo com a ASTM D 4688 (1999).

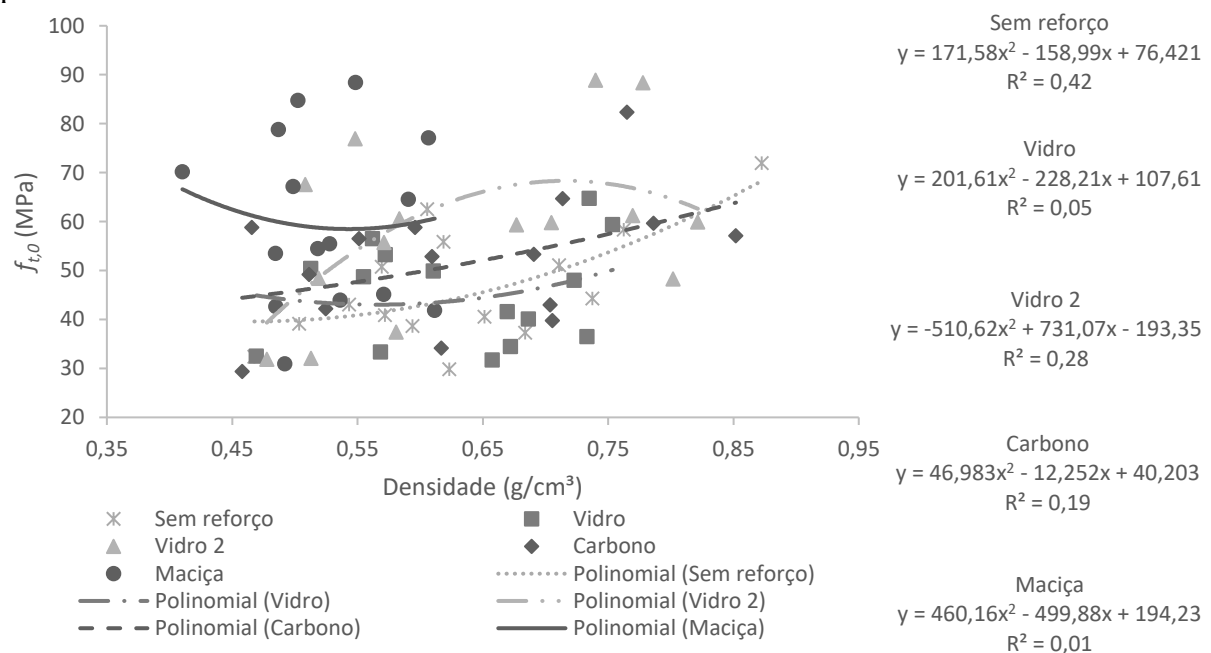


Fonte: Autora, 2017.

Observa-se pela Figura 10 que foi a equação polinomial que apresentou os melhores resultados, entretanto os índices de  $r^2$  em todos os tratamentos mostram correlação fraca. Assim sendo, o comportamento da resistência à tração paralela às fibras não depende proporcionalmente da variação quadrática da densidade aparente.

De acordo com a literatura, para algumas espécies, é identificada uma tendência crescente da resistência à tração paralela às fibras conforme a densidade da madeira aumenta, em amostras com emendas longitudinais. Vrazel & Sellers (2004), por exemplo, verificaram uma resistência à tração média de 63,76 MPa para o *Dipterocarpus* spp. ( $\rho_{bas} = 0,78$ ) e de 55,99 e 54,64 MPa para as espécies *Pinus* spp. ( $\rho_{bas} = 0,58$ ) e *Pseudosuga menziesii* ( $\rho_{bas} = 0,55$ ) em emendas coladas com PUR. Todavia, para Pereira *et al.* (2016), se tratando de emendas longitudinais, este desempenho pode ser influenciado por outras características naturais e anatômicas da madeira ou ainda pela presença do reforço com tecidos de fibras, de tal forma que não é possível concluir que esta relação seja uma regra.

Figura 10. Correlação entre a tensão máxima à tração paralela às fibras e densidade aparente por tratamento.

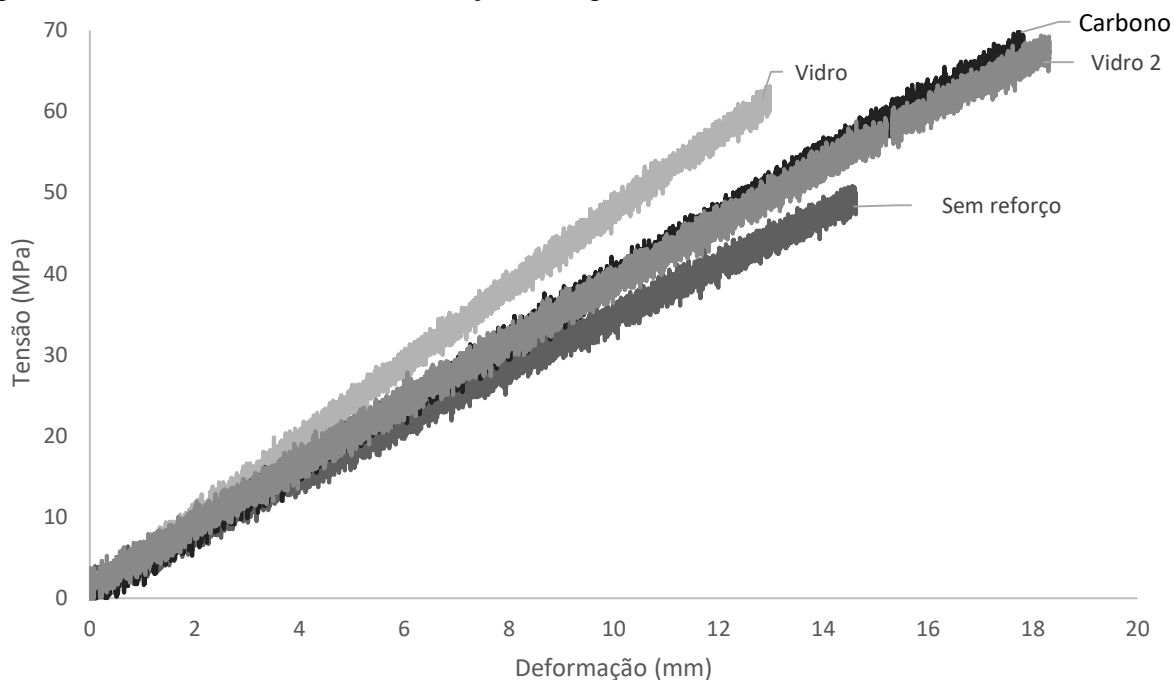


Legenda: Vidro = Uma camada de tecido de fibras de vidro; Vidro2 = Dupla camada de tecido de fibras de vidro; Carbono = Uma camada de tecido de fibras de carbono. Fonte: Autora, 2017.

### 4.3.3 Flexão Estática

A Figura 11 apresenta as curvas de tensão vs. deformação no regime elástico do ensaio de flexão estática à três pontos das vigas com e sem reforço por tecidos de fibras de vidro ou de carbono.

Figura 11. Gráfico Tensão vs. Deformação no regime elástico.



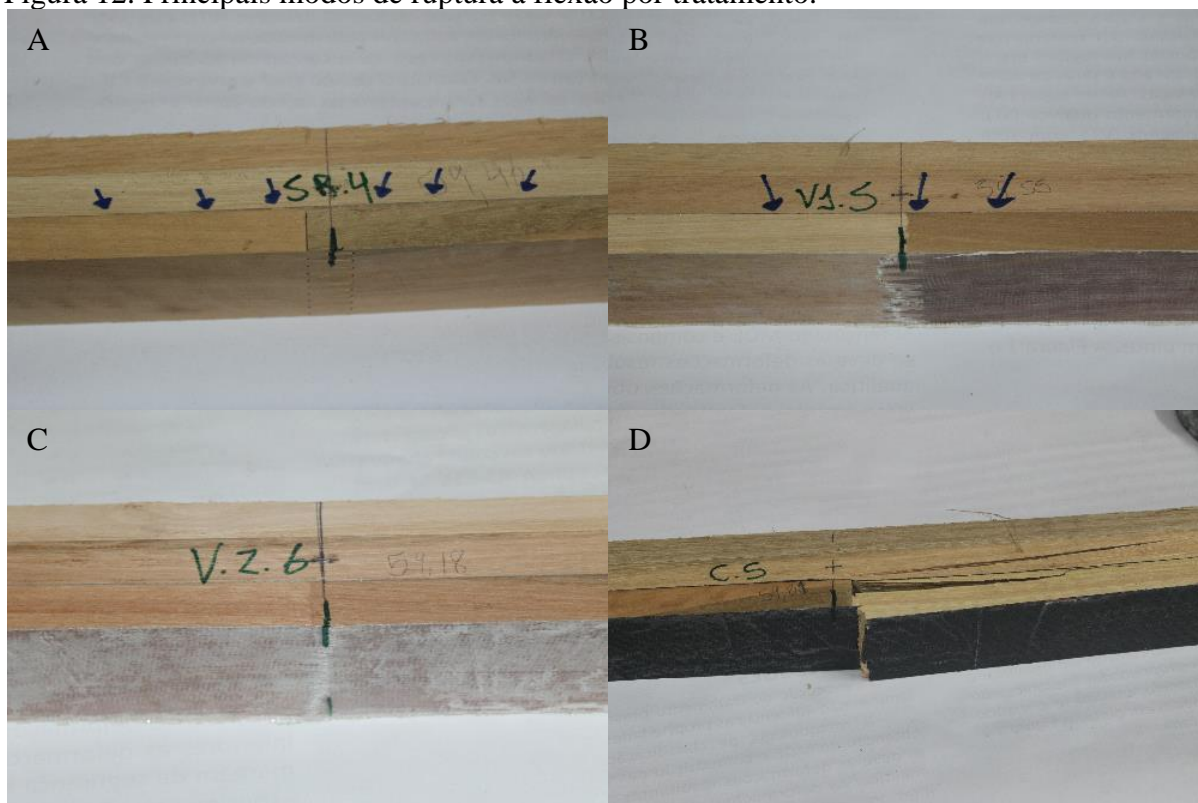
Fonte: Autora, 2017.

As rupturas ocorreram na região de concentração das tensões de tração em todas as vigas avaliadas, conforme é possível observar pelas tensões axiais à flexão e resistência à tração paralela às fibras de cada tratamento. Os modos de ruptura das oito vigas Sem reforço ocorreram nas emendas, seguidas de ruptura na linha de cola. Apenas a viga 7 apresentou ruptura na emenda e na madeira. No tratamento Vidro, o modo de ruptura predominante foi na emenda, com rompimento total ou parcial do tecido de fibras de vidro e subsequente ruptura nas linhas de colagem. Neste tratamento, apenas a viga 1 apresentou, juntamente com a ruptura da emenda e tecido de fibras, colapso na madeira. Para o tratamento Vidro 2 a maioria das amostras apresentou ruptura na emenda seguida de rompimento parcial dos tecidos de fibras, exceto as vigas 3 e 4, que também apresentaram ruptura na madeira (viga 3) e na linha de colagem (viga 4). As vigas que receberam aplicação do reforço por fibras de Carbono tiveram como principal característica a ruptura na emenda e reforço somadas à ruptura da



madeira, excetuando-se a viga 8, que apresentou ruptura fora da região da emenda, colapsando completamente na madeira e reforço. Os principais modos de ruptura de cada tratamento estão apresentados na Figura 12.

Figura 12. Principais modos de ruptura à flexão por tratamento.



Legenda: A – Ruptura característica do tratamento Sem reforço; B – Ruptura característica tratamento Vidro; C – Ruptura característica tratamento Vidro 2; D – Ruptura característica tratamento Carbono. Fonte: Autora, 2017.

Raftery & Whelan (2014), analisando MLC de “*Irish-grown Sitka spruce*” com e sem reforço com barras de fibras de vidro em diferentes diâmetros e utilizando epóxi para aplicação do reforço, chegaram a um incremento de 68% no tratamento com melhor desempenho em relação às vigas não reforçadas. Entretanto os autores realizaram o estudo em vigas sem a presença de emendas longitudinais e com aplicação do reforço ao longo de todo o elemento.

Já Khelifa *et al.* (2015a), em estudo com o abeto (densidade média 0,46 g/cm<sup>3</sup>), produziram vigas com uma emenda por entalhes múltiplos (comprimento do entalhe 22 mm) com e sem reforço de tecidos de fibra de carbono aplicados ao longo de todo o comprimento do elemento. Os resultados encontrados pelos autores mostraram que o reforço com tecido de fibras de carbono, aplicado com epóxi, resultou em um incremento de 33,84% na tensão à flexão quando comparada ao tratamento sem reforço. Desta forma é possível afirmar que o

incremento de 40% na tensão à flexão, alcançado pelo tratamento com tecidos de fibras de carbono desta pesquisa foi similar ao encontrado por outros autores (Tabela 15). Todavia, o incremento médio observado na rigidez destas vigas foi de apenas 9,9%, enquanto Khelifa *et al.* (2015a) obtiveram um aumento de 16,7%. Essa diferença no comportamento da rigidez é possivelmente explicada pelo comprimento do reforço, que neste trabalho foi aplicado apenas sobre a região da emenda.

Tabela 15. Teste de Tukey ( $p>0,05$ ) para o ensaio à flexão.

Tratamentos	Tensões (MPa)		$E_w$ Médio (MPa)*	$E_w$ 12% (MPa)
	Flexão*	Cisalhamento*		
<b>Vidro</b>	Média	60,30 ab	1,45 ab	17.724,67 a
	CV (%)	24	24	18
	$f_{k,0}$	42,41	1,02	
<b>Vidro 2</b>	Média	66,57 a	1,59 a	17.747,08 a
	CV (%)	14	14	11
	$f_{k,0}$	53,97	1,29	
<b>Carbono</b>	Média	67,88 a	1,63 a	17.301,17 a
	CV (%)	12	12	6
	$f_{k,0}$	56,50	1,35	
<b>Sem Reforço</b>	Média	48,30 b	1,16 b	15.735,32 a
	CV (%)	14	14	8
	$f_{k,0}$	41,76	1,00	

Legenda:  $f_{k,0}$  = valor característico; CV (%) = Coeficiente de variação;  $E_w$  = Módulo de elasticidade; \*Médias seguidas de letras iguais dentro das colunas não diferenciam entre si pelo teste de Tukey ( $p>0,05$ ). Fonte: Autora, 2017.

Em outro estudo com o abeto, Khelifa *et al.* (2016) avaliaram o desempenho de diferentes comprimentos de reforço com tecidos de fibras de carbono sobre as emendas por entalhes múltiplos. Os autores avaliaram três comprimentos de fibras, (i) ao longo de toda a linha de maior esforço, em (ii) aproximadamente 50% e em (iii) aproximadamente 25% da linha de maior esforço. Os resultados obtidos apresentaram incrementos de resistência à flexão de 30,3%, 16,6% e 16,3%, respectivamente, em relação às vigas não reforçadas. Todavia, esse aumento na resistência à flexão não exerceu influência sobre a rigidez das vigas. Comportamento semelhante ao alcançado pela presente pesquisa (Tabela 15). Já os incrementos nas tensões axiais alcançados foram superiores, com 24,8% para Vidro, 37,8% para Vidro 2 e de 40,5% para Carbono em relação às vigas sem reforço.

#### 4.4 CONCLUSÕES

Embora diferenças estatísticas não tenham sido identificadas nos ensaios de cisalhamento, tração normal às fibras, tração paralela às fibras e módulos de elasticidade na flexão, tornou possível constatar que houve aumento da resistência à flexão com a aplicação dos reforços sobre as emendas por entalhes múltiplos. As diferenças significativamente superiores obtidas com os tratamentos Carbono e Vidro 2 na resistência à flexão mostram que a aplicação do reforço apenas na região das emendas por entalhes múltiplos é eficiente, revelando um desempenho superior das vigas de MLC reforçadas.

A análise dos modos de ruptura no ensaio de tração paralela às fibras revela um aumento no número de rupturas inteiramente fora da região da emenda e da aplicação dos reforços. Entretanto, o mesmo comportamento não ocorreu nos modos de rupturas das vigas à flexão. Desta forma constata-se que existe uma relação entre a espessura das lâminas na emenda e a espessura ou o número de camadas de reforço.

A utilização do adesivo poliuretano reativo para aplicação dos reforços apresentou desempenho positivo em relação às linhas de colagem não reforçadas, dispensando a utilização de um segundo tipo de adesivo para aplicação dos reforços.

#### 4.5 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se a execução de estudos que avaliem a relação da espessura dos tecidos de fibras utilizados como reforço com a espessura das lâminas na emenda, bem como uma avaliação detalhada da influência dessa relação sobre o desempenho das linhas de colagem quanto ao cisalhamento.



## 5 CONCLUSÕES GERAIS

Quanto à eficiência das emendas por entalhes múltiplos em relação à madeira maciça, conclui-se que as emendas longitudinais não reforçadas apresentaram desempenho inferior à madeira maciça, independentemente da espécie ou da geometria utilizada, mesmo conduzindo a execução das mesmas em altos níveis de controle.

O desempenho de emendas por entalhes múltiplos com reforço de tecidos de fibras aplicados com o adesivo PUR sobre as ligações apresentou diferença significativa, alcançando um incremento máximo com relação às emendas não reforçadas de 71% para a espécie *Pinus taeda*, e de 25,8% para *Eucalyptus* spp.. De forma geral, para ambas as espécies, os tratamentos com reforço de tecido de fibras de carbono e dupla camada de tecido de fibras de vidro apresentaram os melhores resultados.

Considerando a produção de MLC de *Eucalyptus* spp. reforçada com tecidos de fibras de vidro ou de carbono, conclui-se que a aplicação de reforço em dupla camada de tecido de fibras de vidro e uma camada de tecido de fibras de carbono apresentou melhora significativa no desempenho das vigas à flexão, embora diferenças estatísticas não tenham sido identificadas nos ensaios de cisalhamento, tração normal às fibras, tração paralela às fibras e módulos de elasticidade em flexão.

A utilização do adesivo PUR para aplicação dos reforços apresentou desempenho positivo com relação às linhas de colagem não reforçadas, dispensando a utilização de um segundo tipo de adesivo para aplicação dos reforços.



## 6 RECOMENDAÇÕES GERAIS

Considerando as dificuldades encontradas no desenvolvimento desta pesquisa, bem como os resultados obtidos, algumas linhas de estudo podem ser sugeridas:

- Realizar análises mais detalhadas quanto à eficiência das emendas por entalhes múltiplos não reforçadas, de acordo com as peculiaridades de cada espécie utilizada, tendo em vista a alta variabilidade de comportamento intraespecífico, tanto em propriedades físicas quanto mecânicas;
- Verificar a influência de fatores químicos e anatômicos das espécies sobre a usinagem dos entalhes e afinidade com adesivos, visando otimizar o desempenho das emendas não reforçadas;
- Verificar a viabilidade de utilização de múltiplas camadas de tecidos de fibras ou camadas únicas de tecidos com maiores gramaturas;
- Analisar a influência da aplicação do reforço na relação densidade x resistência à tração;
- Verificar influência do comprimento do reforço sobre as emendas, considerando diferentes comprimento de emendas e espessuras de lâminas;
- Avaliar o perfil tecido de fibra/adesivo/madeira, por meio de microscopia de varredura;
- Modelagem numérica por elementos finitos para as concentrações de tensões no perfil fibra/adesivo/madeira.





## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4688 - 99** (reapproved 2005) Standard specification for adhesives used for laminate joints in nonstructural lumber products. Pennsylvania, 2005. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR - 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Revisão PNBR - 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 50p.

ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION. **NF B 5-32**: Essai de cisaillement.. Paris: AFN, 1942.

AGUIAR, A. V. de; SOUSA, V. A. de; SHIMIZU, J. Y. Cultivo de Pinus. **Embrapa Florestas**. 2014. Disponível em: <<https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo>> Acesso em 05/02/2016.

AICHER, S.; HEZEL, J.; STAPF, G. Mechanical and glued joints in glulam of ultra high efficiency. In: **Proceedings World Conference on Timber Engineering (WTCE 2012)**, Auckland. 2012.

AJDINAJ, D.; HABIBI, B. The effect of joint slope on bending strength of finger joint connection – case of poplar wood (*Populus alba* L.). IN: **2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering**, BCCCE, Epoka University, Tirana, Albania. 2013.

ALMEIDA, D. H. de *et al.* Caracterização completa da madeira da espécie amazônica Paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v.37, n.6, p.1175-1181, 2013.

AMAYA, L. M. C. **Reforço de emendas dentadas com compósitos de fibras em peças de madeira**. 73f, 2013. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2013.

AMBIFLORA EMPREENDIMENTOS FLORESTAIS E AMBIENTAIS. **Mudas florestais** 2012. Disponível em: <[http://www.ambiflorasul.com.br/mudas\\_florestais.html](http://www.ambiflorasul.com.br/mudas_florestais.html)> Acesso em: 05/02/2016.

ANSHARI, B. et al. Structural behaviour of glued laminated timber beams pre-stressed by compressed wood. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 24-32, 2012.

BAYATKASHKOLI, A.; SHAMSIAN, M.; MANSOURFARD, M. The effect of number of joints on bending properties of laminated lumber made from poplar (*Populus nigra*). **Forestry Studies in China**, v. 14, n. 3, p. 246-250, 2012.

BUSTOS, C. et al. Effects of curing time and end pressure on the tensile strength of finger-jointed black spruce lumber. **Forest Products Journal**, v. 53, n. 11/12, p. 85, 2003.

CERCHIARI, A. M. F. **Aprimoramento do poliuretano a base de óleo de mamona na manufatura de Madeira Laminada Colada (MLC) de *Cupressus lusitanica*, *Corymbia maculata* e *Hevea brasiliensis***. 105f, 2013. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 2013.

CHEW, A. A. et al. Compression strength of composite glulam timber reinforced between first and second, third and fourth lamina. **Jurnal Teknologi**, v. 78, n. 5-4, p. 49-55, 2016.

CHRISTOFORO, A. L. et al. Characterization of tropical wood species for use in civil constructions. **Journal of Civil Engineering Research**, v. 3, n. 3, p. 98-103, 2013.

CRUZ, H. et al. Reforço local de elementos estruturais de madeira por meio de compósitos. In: **Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas**, Anais. p. 825-834, 2000.

DANAWADE, B. A. et al. Effect of Finger Joint on Flexural Strength of Teak Wood. **International Journal of Engineering and Technology (IJET)**, v. 5, n. 6, p. 4929-4937, 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 385: Finger jointed structural timber - Performance requirements and minimum production requirements**. Berlin: DIN, 2001.

FINK, G.; KOHLER, J. Probabilistic modeling of the tensile related material properties of timber boards and finger joint connections. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, n. 3, p. 335-346, 2015.

FRANKE, B.; SCHUSSER, A.; MÜLLER, A. Analysis of finger joints from beech wood. In: **World Conference on Timber Engineering – WCTE**. Quebec, 2014.

GLIŠOVIĆ, I.; STEVANOVIĆ, B.; PETROVIĆ, M. Bending behavior of glulam beams reinforced with carbon FRP plates. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 21, n. 7, p. 923-932, 2015.

HABIPI, B.; AJDINAJ, D. Wood finger-joint strength as function of finger length and slope positioning of tips. **International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)**. v. 2, n. 12 p. 128-132, 2015.

HABIPI, B.; ÇOTA, H.; KODRA, A. The effect of fingers tips position on tensile strength of finger joint connection. **Journal of International Academic Research for Multidisciplinary**. v. 4, n. 1., p. 133-139, 2016.

IWAKIRI S. *et al.* Avaliação da resistência de juntas coladas da madeira de *Eucalyptus benthamii* com diferentes adesivos e faces de colagem. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 411-416, 2013.

KHELIFA, M. *et al.* Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 68, p. 283-297, 2016.

KHELIFA, M.; LAHOUAR, M. A.; CELZARD, A. Flexural strengthening of finger-jointed Spruce timber beams with CFRP. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 29, n. 19, p. 2104-2116, 2015a.

KHELIFA, M. *et al.* Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers. **Engineering Structures**, v. 101, p. 364-375, 2015b.

LU, W. *et al.* Study on flexural behavior of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 23-31, 2015.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica**, p. 37-47, 2010.

MOLINA, J. C.; CALIL NETO, C.; CHRISTOFORO, A. L. Tensile strength of finger joints made of *Manilkara huberi* wood for use in glued laminated timber. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 221-227, 2016.

NADIR, Y. *et al.* Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 547-555, 2016.

PALERMO, G. P. de *et al.* Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* Engelm. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.1, p.191-200, 2013.

PEREIRA, M. C. de M. *et al.* Evaluation of tensile strength of a *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* hybrid in wood beams bonded together by means of finger-joints and polyurethane-based glue. **Materials Research**, v. 19, n. 6, p. 1270-1275, 2016.

RAFTERY, G. M.; HARTE, A. M. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 4, p. 724-735, 2011.

RAFTERY, G. M.; HARTE, A. M. Nonlinear numerical modeling of FRP reinforced glued laminated timber. **Composites Part B: Engineering**, v. 52, p. 40-50, 2013.

RAFTERY, G. M.; RODD, P. D. FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 116-125, 2015.

RAFTERY, G. M.; WHELAN, C. Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 209-220, 2014.

RAO, S. *et al.* Effect of geometric parameters of finger joint profile on ultimate tensile strength of single finger-jointed boards. **Wood and Fiber Science**, v. 44, n. 3, p. 263-270, 2012.

REMADE. O Eucalipto e suas origens. **Revista da Madeira**, ed. nº59, 2001. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=20](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=20)>. Acesso em: fev/2017.

SANTOS NETO, A. B. da S.; SZÜCS, C. A.; LA ROVERE, H. L. Proposta de ensaio para cisalhamento paralelo às fibras da madeira. In: **VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras**, 1998, Florianópolis. Anais... Florianópolis: UFSC, v.1, p.133-144, 1998.

SEGUNDINHO, P. G. de A. *et al.* Evaluation of glued laminated timber beams of cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 441-449, 2013.

STERLEY, M., *et al.* Finger-jointing of freshly sawn norway spruce side boards – A comparative study of fracture properties of joints glued with phenol-resorcinol and one-component polyurethane adhesive. In: **Materials and Joints in Timber Structures**. Springer Netherlands, p. 325-339, 2014.

STÜPP, Â. M. **Otimização do processo de ligação por emendas de entalhes múltiplos para estruturas em madeira laminada colada**. 92f, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina., Lages, 2016.

SVITÁK, M.; GAŠPARÍK, M.; PENC, Jan. Heat resistance of glued finger joints in spruce wood constructions. **BioResources**, v. 9, n. 4, p. 7529-7541, 2014.

SZÜCS, C. A. Influência da variação da densidade da madeira sobre o seu módulo de elasticidade. In: **IV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras**, 1992, São Carlos / SP. Anais... São Carlos / SP: IBRAMEM, 1992. v. 01. p. 13-18. 1992.

SZCÜS, C. A. *et al.* **Estruturas de Madeira**. Universidade Federal de Santa Catarina. – UFSC. Florianópolis – SC. Apostila. 2015. 199p.

TEREZO, R.F.; SZÜCS, C.A. Análise de desempenho de vigas em madeira laminada colada de parica (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke), **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.38, n.87. p.471-480, 2010.

VRAZEL, M.; SELLERS JR, T. The effects of species, adhesive type, and cure temperature on the strength and durability of a structural finger-joint. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 3, p. 66-75, 2004.

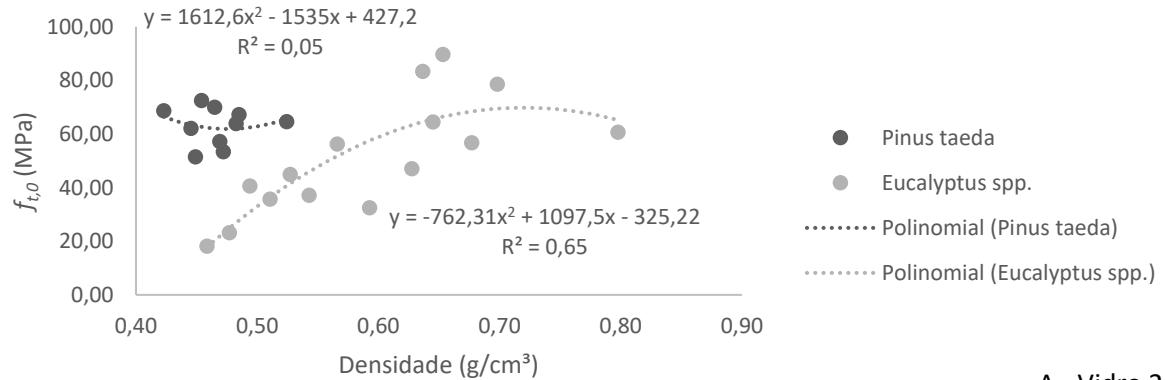
VOLKMER, T.; FRANKE, B.; SCHUSSER, A. Analysis of the penetration of adhesives at finger-joints in beech wood. In: **World Conference on Timber Engineering**, Quebec. 8f, 2014.

YANG, B. Z. *et al.* Bending properties of a novel engineered composite from southern pine lumber. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 72, n. 5, p. 601-607, 2014.

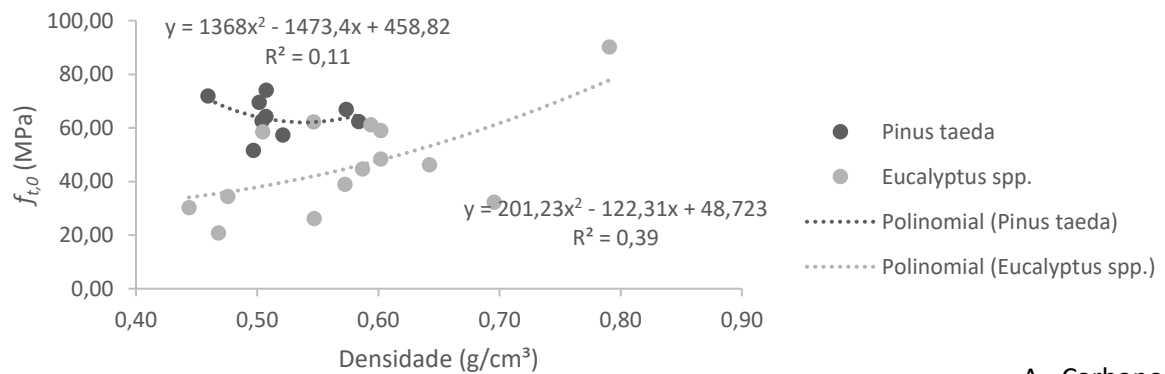


## APÊNCIDES

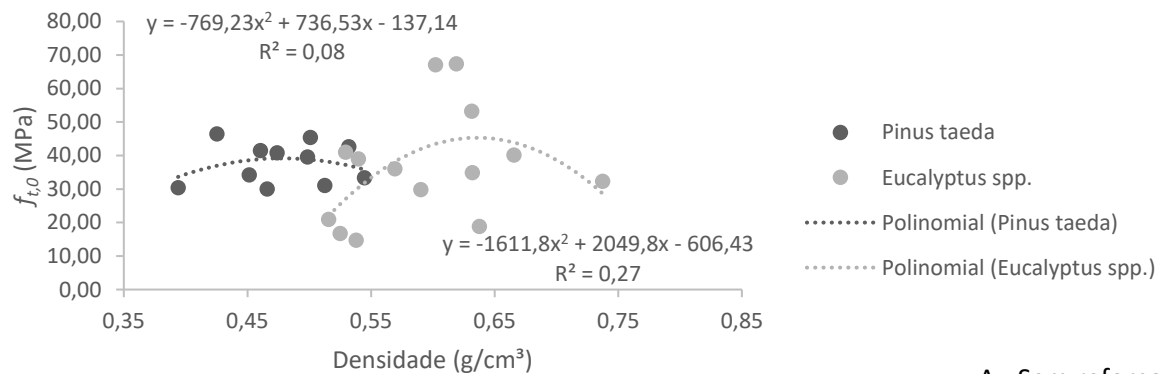
### A. Correlação entre a resistência à tração paralela às fibras e densidade aparente por tratamento (continua).



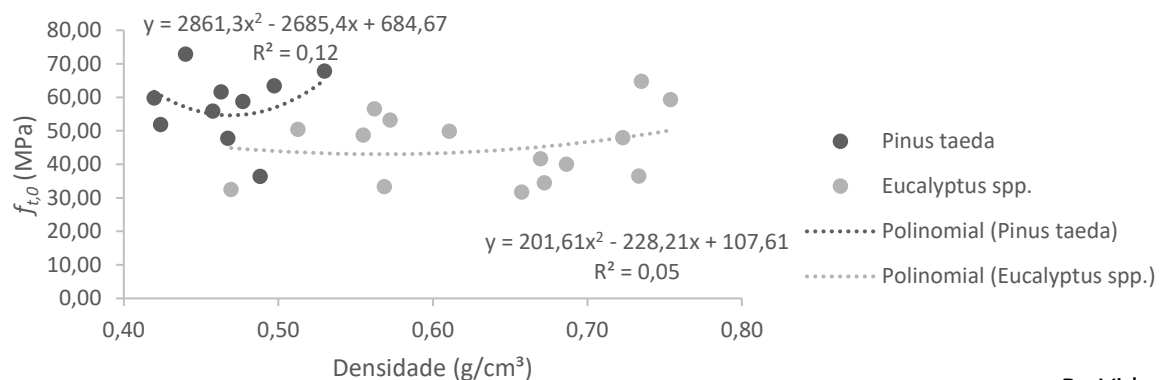
A - Vidro 2



A - Carbono

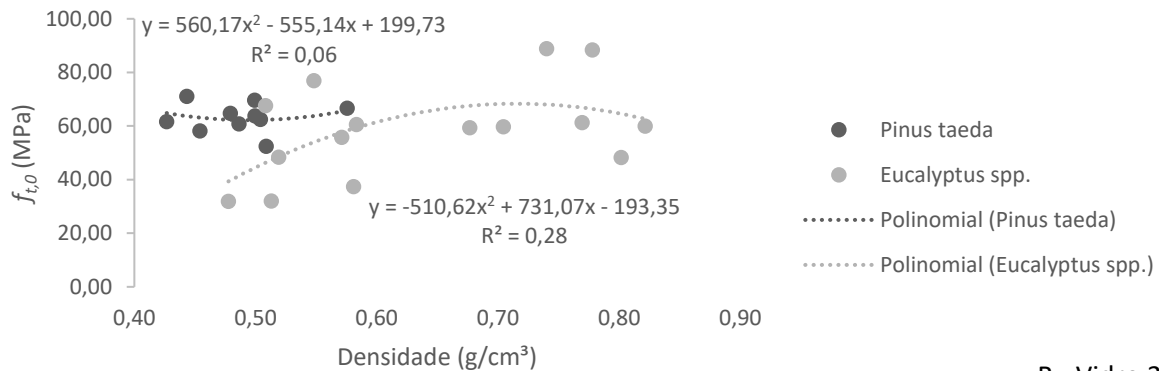


A - Sem reforço

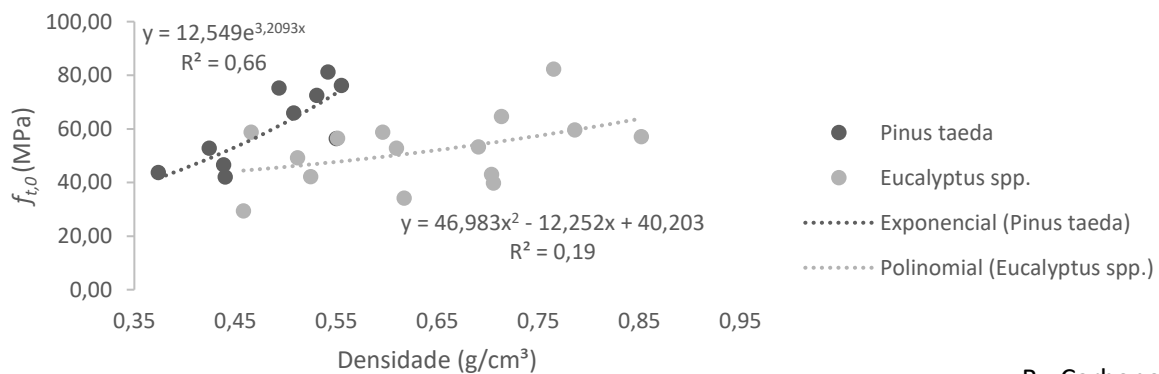


B - Vidro

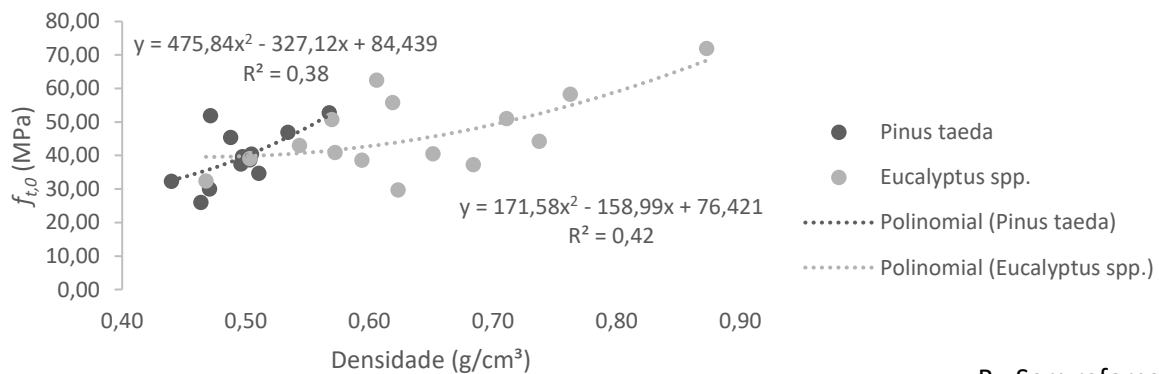
A. Correlação entre a resistência à tração paralela às fibras e densidade aparente por tratamento (conclusão).



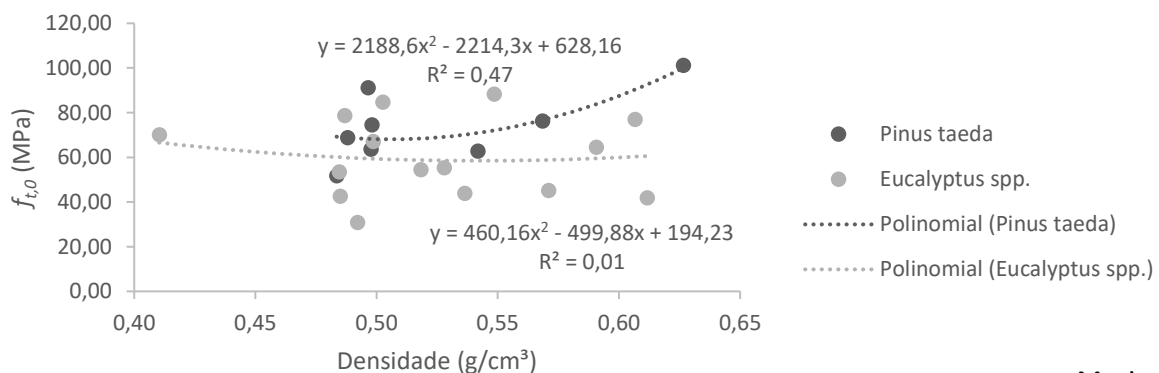
B - Vidro 2



B - Carbono



B - Sem reforço



Maciça