

TALITHA OLIVEIRA ROSA

Vigas de Madeira Laminada Colada de Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*  
(Huber ex Ducke) Barneby) Reforçadas com Fibras Sintéticas

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

Orientador: Profº Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo  
Co-orientadora: Profª Dra. Poliana D'Angelo Rios.

Lages – SC

Fevereiro, 2017

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

Oliveira Rosa, Talitha  
Vigas de Madeira laminada colada de paricá  
(*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex  
Ducke) Barneby) Reforçadas com Fibras Sintéticas /  
Talitha Oliveira Rosa. - Lages , 2017.  
79 p.

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

1. Estrutura em madeira. 2. Compósito. 3. Reforço  
estrutural. 4. Fibras sintéticas. I. Figueiredo  
Terezo, Rodrigo . II. D'Angelo Rios, Polliana. ,  
.III. Universidade do Estado de Santa Catarina,  
Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título.

**TALITHA OLIVEIRA ROSA**

**VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA DE PARICÁ (*Schizolobium parahyba*  
var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby) REFORÇADAS COM FIBRAS  
SINTÉTICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Florestal como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina.

**Banca Examinadora**

Orientador:



---

Prof. Dr. Rodrigo Figueiredo Terezo

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro:

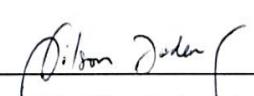


---

Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro:



---

Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Lages, 21 de fevereiro de 2017.

## **DEDICATÓRIA**

Meu querido avô Luiz (*in memoriam*), em sua sabedoria, desde pequena aprendi que independentemente do tamanho, qualquer trabalho é divino...

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, não apenas na vida acadêmica, mas ao longo de minha vida, guiando-me pelos caminhos que muitas vezes não sabia se era o certo. A esse Mestre que me proporcionou luz e que me ensinou a ver os milagres mesmo nas pequenas coisas do dia a dia.

À Universidade Estadual de Santa Catarina, pela oportunidade de fazer parte deste lugar.

Ao apoio das instituições FAPESC e CAPES pelo suporte financeiro durante parte do mestrado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo F. Terezo, pelo auxílio, conselhos, paciência e amizade. Ao corpo docente do curso de Engenharia Florestal, por me proporcionar não apenas o conhecimento racional, mas por seu caráter e afetividade da educação em todos os processos de formação profissional. Em especial aos professores Polliana D'Angelo Rios, pela coorientação; e Alexsandro B. da Cunha, pelo apoio e conselhos.

Aos membros da banca que aceitaram prontamente contribuir com esse trabalho e compartilhar suas experiências.

A minha mãe, pelo apoio incondicional, incentivo e por sempre ter estado presente. Ao meu irmão, pela ajuda e amizade.

Ao meu companheiro de estudo, amigo e noivo, pelo suporte, pela dedicação e auxílio, obrigada por me fazer ver o que parecia ser impossível.

Aos amigos, em especial Helena Vieira, que nas batalhas diárias sempre esteve presente, seja com uma ideia ou com um sorriso, ambos fizeram diferença.

Aos amigos e colegas do grupo NEBios, Angela Stüpp, Cleide Beatriz, Deyvis Borges pelo colegismo e trabalho em equipe, este que sempre determinou nossas conquistas. Em especial ao bolsista João Laryan, por estar junto e alegre mesmo quando as coisas pareciam não funcionar.

A WL Madeiras, aos Srs. Acácio Furtado e Ademir, João, Diego e Admilson dos serviços gerais do CAV, pelo suporte na execução de inúmeras atividades deste trabalho e pela amizade. A todas as outras pessoas que não foram citadas, mas que direta ou indiretamente auxiliaram na execução deste trabalho.

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos sempre ser humildes, recatados e despidos de orgulho.”

(Dalai Lama)

## RESUMO

A Madeira Lamelada Colada (MLC) é formada por lamelas de madeira com tamanho reduzido em relação ao componente final, coladas entre si no sentido paralelo às fibras, sendo utilizada em estruturas para a construção em madeira. No Brasil, a MLC é produzida, principalmente, com madeiras exóticas provenientes de florestas plantadas, tais como o *Pinus* e o *Eucalyptus*. O paricá é uma espécie nativa plantada em florestas comerciais na Amazônia. Pesquisas mostram que a espécie possui aptidão para o uso em MLC, mas sua resistência é menor que o *Eucalyptus*. Durante a produção de elementos estruturais, o reforço com fibras durante pode aumentar o desempenho do MLC de paricá. Deste modo, esse trabalho visou avaliar o potencial da espécie de paricá para utilização em vigas de MLC reforçadas com fibras de vidro e fibras de carbono, utilizando o adesivo a base de resorcinol. Na primeira parte do trabalho foi feita a classificação das lamelas de paricá para a produção de vigas MLC. Para isto, as lamelas foram separadas pela densidade aparente em oito classes, então empregados o ensaio de flexão não destrutivo a três pontos, sendo o deslocamento medido de forma expedita e por um sistema de aquisição automático de dados. Os dados foram avaliados pelo teste de médias Scott Knott a 5% de significância. Na segunda parte do trabalho, foram ensaiadas 30 vigas em MLC de paricá à flexão, separadas em 5 tratamentos: T1 - sem reforço; T2 - com reforço em fibra de vidro com gramatura  $110 \text{ g.m}^{-2}$ ; T3 – fibra de vidro com  $200 \text{ g.m}^{-2}$ ; T4 – fibra de vidro com  $330 \text{ g.m}^{-2}$ ; e T5 - com de fibra de carbono  $200 \text{ g.m}^{-2}$ . Apenas 1 camada de fibra foi utilizada em todos os tratamentos com reforços. Os valores médios e característicos foram determinados para a resistência à tensão axial na flexão, ao cisalhamento,  $E_w$ , e o cisalhamento e tração normal da linha de cola. Os dados foram avaliados quanto a sua normalidade, homogeneidade e comparação de médias pelo teste Tukey à 5% de significância. As vigas de MLC compostas com lamelas classificadas pelo método expedito tiveram um erro relativo de até 26,21% em relação a vigas de MLC compostas com lamelas classificadas pelo método com transdutor de deslocamento. Os valores característicos de resistência a tensão axial, tensão de cisalhamento e  $E_w$  foram: T1(51,96; 1,39; 12.097,93 MPa); T2 (59,40; 1,27; 12.062,91 MPa); T3 (53,45; 1,27; 14.068,63 MPa); T4 (61,09; 1,45; 13.370,25 MPa) e T5 (52,16; 1,24; 12.823,84 MPa), respectivamente. Ao comparar o ganho de resistência das vigas reforçadas com o T1, um aumento de até 17,57% foi obtido para vigas reforçadas com fibra de vidro e o reforço de fibra de carbono apresentou apenas 0,38%. Observou-se que as rupturas das vigas não foram tensões de cisalhamento, indicando que o uso de adesivo a base de resorcinol foi satisfatório. O cálculo analítico diferiu estatisticamente apenas no tratamento T5 (21.627 MPa no analítico; 12.857

MPa no experimental), devido ao alto Ew fibra de carbono. O método expedito poderá ser utilizado para a classificação do Ew por empresas de produção de MLC. Os reforços com fibras sintéticas mostraram resultados promissores nas de vigas de MLC ao utilizar o adesivo a base de resorcinol, levando a um aumento de até 22,32% na resistência a tensões axiais em vigas reforçadas com fibras de vidro com gramatura acima de 200 g.cm<sup>-2</sup>.

**Palavras-chave:** Estrutura em madeira. Compósito. Reforço estrutural. Fibras sintéticas.

## ABSTRACT

The glulam is made up by laminated timbers with restricted size regarding the final component, they are glued each other and being lied in parallel direction to fibers, being used in structures to timber construction. In Brazil, the glulam is mainly manufactured with exotic timbers from planted forests, such as *Pinus* and the *Eucalyptus*. Paricá is a native specie quite planted in business forests from Amazonia. Reseraches shows that the specie has aptitude for being used in glulam, but its resistance is lower than *Eucalyptus*. During structural elements manufacturing, the reinforcement with fibers may increase the paricá's glulam performance. Thus, this research aims to evaluate the potential of paricá specie for be used in glulam beams reinforced with glass fiber and carbon fiber with adhesive based on resorcinol. In the first part of work, it was made a classification laminates of paricá timber for manufacturing of glulam beams. Therefore, the laminated were divided by density and classified into 8 classes, then used a non-destructive bending test, with three points, being the siplacemtn mesure by expeditious mode and by data acquisition system. Datas were assessed by Scott Knott average test with 5% of meaningfulness. In the second part of work, bending tests was made on 30 Paricá's glulam beams, arranged in 5 treatments: T1- without reinforcement; T2 - with fiberglass reinforcement with grammage  $110 \text{ g.m}^{-2}$ ; T3- glass fiber with  $200 \text{ g.m}^{-2}$ ; T4 –glass fiber with  $330 \text{ g.m}^{-2}$ ; and T5 - carbon fiber with grammage  $200 \text{ g.m}^{-2}$ . Just one fiber layer was used on treatment with reinforcement. The the average and characteristic values were determined of strength to axial stress, strength to shear, elasticity modulus – MOE, and the normal shear and normal tension on glue line. Datas were assessed about normality, homogeneity and averages comparison by Tukey test to 5% of meaningfulness. The glulam beams composed with classified laminated timbers by expeditious mode had a relative error about 26,21% regarding glulam beams composed with laminated timbers classified by a displacement transducer. Characteristic values of strength to axial stress, shear stress and MOE were: T1 (55,06; 1,4; 12.097,93 MPa); T2 (59,40; 1,27;12.062,91 MPa); T3 (53,45; 1,27; 14.068,63 MPa); T4 (61,09; 1,45; 13.370,25 MPa); and T5 (52,16; 1,24; 12.823,84 MPa), respectively. When comparing the strength gain of reinforced beams regarding T1, an increase about axial stresses 17,57% was obtained for glulam beams reinforced with fiber glass and the reinforcement with carbon showed just 0,38%. It was observed beams breaking did not happen by shear forces, this fact shows that to use adhesive based on resorcinol was satisfactory. Analytic design differed statistically on treatment T5 (21.627 MPa on analytic; 12.857 MPa on theoretical) due to high elasticity modulus of the carbon fiber. The expeditious mode can be used to classified the MOE by glulam

manufactory companies. Reinforcements with synthetic fibers showed promising results on timber beams reinforcement when is used adhesive based on resorcinol, this fact lead to an increase of up to 22,32% on the strength to axial stresses when is used fiberglass with  $200\text{g.cm}^{-2}$ .

**Key-words:** Wood structures. Composite. Structural reinforcement. Synthetic fibers.

## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Floresta plantada de paricá com 1,5 anos consorciado com mogno no Estado do Pará.....   | 18 |
| Figura 2 - Aspecto da madeira de paricá.....   | 19 |
| Figura 3 - Tecido de fibra de carbono (a) e tecido de fibra de vidro (b) com gramatura de 200 g.m <sup>-2</sup> .....  | 21 |
| Figura 4 - Esquema de aplicação de carga (F) e leitura do deslocamento (D) de lamelas para a determinação da sua rigidez (a) com leitura por régua de medição (b) e por um transdutor de deslocamento (c)..... | 28 |
| Figura 5. Distribuição das lamelas para montagem as vigas de MLC.....  | 30 |
| Figura 6 - Seção mostrando a combinação de lâminas com diferentes módulos de elasticidade à flexão.....  | 31 |
| Figura 7 - Distribuição de lamelas dentro de 8 classes de densidade para dois métodos de determinação de Ew.....   | 32 |
| Figura 8 - Correlações entre o método visual e transdutor com a densidade aparente em peças de paricá em diferentes classes de densidade.....  | 35 |
| Figura 9 - Relação entre EW obtidos pelo método visual (a) e pelo método com transdutor (b) com as classes de densidade aparente da madeira de paricá.....   | 38 |
| Figura 10 - Distribuição das lamelas para montagem as vigas de MLC.....  | 45 |
| Figura 11 - Processo de colagem das fibras na viga MLC; posicionamento da fibra sobre a MLC (a), desaeração com rolo (b) e aspecto do tecido de fibra de vidro após a primeira desaeração (c) .....            | 46 |
| Figura 12 - Corpo de prova de cisalhamento na linha de cola pela Norma Francesa NF B 5-32.....   | 47 |
| Figura 13- Aplicação de cola nas fibras sintéticas dos corpos de prova de tração paralela. ....  | 47 |
| Figura 14 - Leitura do deslocamento no ponto de simetria da viga, em que (1) é a célula e carga, (2) é o transdutor de deslocamento posicionado no ponto de simetria e fixado na linha neutra (3). .....       | 48 |
| Figura 15 - Geometria e Ew dos elementos componentes da viga: a) Seção original; b) Seção transformada. Dimensões em cm.....   | 49 |
| Figura 16 - Vigas do tratamento T3 rompidas por tensões de tração (a) e vigas do tratamento T5 rompidas por tensões de compressão (b). .....   | 58 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Valores médios do Ew (MPa) para as diferentes classes de densidade e nos dois métodos de obtenção do deslocamento com respectivo erro padrão.....                                 | 33 |
| Tabela 2 - Média de rigidez em vigas com lamelas classificadas pelo método visual e pelo método com transdutor de deslocamento.(Continua).....   | 36 |
| Tabela 2 - Média de rigidez em vigas com lamelas classificadas pelo método visual e pelo método com transdutor de deslocamento. (Conclusão).....   | 37 |
| Tabela 3 - Módulo de elasticidade estimado pelo MHS de vigas nos tratamentos com e sem reforço de fibras de vidro ou carbono, com a comparação estatística pelo teste de média de Tukey..... | 53 |
| Tabela 4 - Valores médios e característicos das tensões axiais e de cisalhamento e EW obtidos do ensaio de flexão em vigas de MLC sem e com reforço de fibras sintéticas.....                | 54 |
| Tabela 5 - Incremento em porcentagem de resistências e EW dos tratamentos com vigas reforçadas com fibras sintéticas comparados com vigas não reforçadas.....                                | 55 |
| Tabela 6 - Resistência da linha de cola para os ensaios de tração paralela e normal às fibras, e cisalhamento .....  | 56 |
| Tabela 7 - Diferenças de deformação entre o cálculo teórico e o experimental em vigas de MLC de paricá com e sem reforço de fibra de vidro ou carbono.....                                   | 59 |
| Tabela 8 - Comparação dos EW médios calculados pelo ensaio à flexão estática (experimental) e por cálculo teórico - MHS. ....  | 60 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

|               |  |
|---------------|--|
| <b>ABRAF</b>  | Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas           |
| <b>ASTM</b>   | <i>American Society for Testing and Materials</i>                    |
| <b>CAV</b>    | Centro de Ciências Agroveterinárias                                  |
| <b>CAPES</b>  | Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior             |
| <b>C.V</b>    | Coeficiente de variação  |
| <b>DAP</b>    | Diâmetro à altura do peito   |
| <b>FAPESC</b> | Fundação de amparo à pesquisa e inovação do estado de Santa Catarina |
| <b>Ha</b>     | Hectare  |
| <b>MHS</b>    | Método de Homogeneização da Seção                                    |
| <b>MLC</b>    | Madeira Lamelada Colada  |
| <b>MLCR</b>   | Madeira Lamelada Colada Reforçada                                    |
| <b>NBR</b>    | Norma Brasileira   |
| <b>NF</b>     | Norma Francesa   |

## LISTA DE SIGLAS

|                    |   |
|--------------------|---|
| A                  | Nova área da lâmina;  |
| A*                 | Nova área da lâmina;  |
| B                  | Base da lâmina;   |
| b*                 | Nova base para a lâmina;  |
| d                  | Distância entre a linha neutra da peça e a linha neutra da lâmina;    |
| Di                 | Distância entre o centro da lâmina e um eixo horizontal               |
| Ec                 | Ew da lâmina de menor modulo de elasticidade                          |
| Ei                 | Ew da lâmina  |
| EI                 | Rigidez a flexão do element estrutural                                |
| EM,I               | Valor médio dos módulos de elasticidade do lote inferior              |
| EM,s               | Valor médio dos módulos de elasticidade do lote superior              |
| Ew                 | Módulo de elasticidade  |
| Gc                 | Módulo de cisalhamento  |
| I                  | Momento de inércia de individual da lâmina                            |
| I <sub>(1/2)</sub> | Momento de inércia da metade central da seção transversal             |
| I <sub>(1/4)</sub> | Momento de inércia da quarta parte da mais afastada;                  |
| I*                 | Momento de inércia de uma área composta                               |
| MPa                | Mega Pascal   |
| P                  | Carga total   |
| Q*                 | Momento estático  |
| T                  | Altura da lâmina  |
| y <sub>i</sub>     | Distância entre o centro da lâmina e o centro de gravidade da peça;   |
| y <sub>ln</sub>    | Distância entre o centroide da sessão e o eixo arbitrário horizontal; |
| χ*                 | Fator de forma  |
| δ                  | Flecha máxima   |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| RESUMO .....   | 7  |
| ABSTRACT .....   | 9  |
| LISTA DE ILUSTRAÇÃO .....  | 11 |
| LISTA DE TABELAS .....   | 12 |
| LISTA DE ABREVIATURAS .....  | 13 |
| LISTA DE SIGLAS .....  | 14 |
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 17 |
| 2. OBJETIVOS.....  | 23 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL .....   | 23 |
| 2.2    OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 23 |
| 3 – CAPÍTULO I - CLASSIFICAÇÃO DE LAMELAS DE PARICÁ ( <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> (HUBER EX DUCKE) BARNEBY) POR MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS ..... | 24 |
| 3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A CLASSIFICAÇÃO DE LAMELAS EM MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS .....  | 25 |
| 3.2. MATERIAL E MÉTODOS DA CLASSIFICAÇÃO DE LAMELAS EM MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS.....  | 27 |
| 3.2.1 Amostragem.....  | 27 |
| 3.2.2 Ensaios não destrutivos.....   | 28 |
| 3.2.3 Classificação das lamelas e composição das vigas MLC .....   | 29 |
| 3.2.4 Homogeneização da elasticidade das vigas MLC .....   | 30 |
| 3.2.5 Tratamento estatístico .....   | 31 |
| 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO DA CLASSIFICAÇÃO DE LAMELAS EM MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS .....  | 31 |
| 3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS DA CLASSIFICAÇÃO DE LAMELAS EM MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS.....  | 39 |
| 4 – CAPÍTULO II - MADEIRA LAMELADA COLADA DE PARICÁ ( <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> ) REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO OU CARBONO.40                         |    |
| 4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MLC DE PARICÁ REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO OU CARBONO .....  | 41 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.2 MATERIAL E MÉTODOS DE MLC DE PARICÁ REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO OU CARBONO .....</b>      | <b>44</b> |
| 4.2.1 Amostragem.....   | 44        |
| 4.2.2 Determinação do teor de umidade e densidade .....   | 44        |
| 4.2.3 Confecção das vigas .....   | 44        |
| 4.2.4 Confecção dos corpos de prova .....   | 46        |
| 4.2.5 Ensaio de resistência à flexão .....  | 48        |
| 4.2.6 Modos de ruptura .....  | 48        |
| 4.2.7 Método de homogeneização da seção.....  | 49        |
| 4.2.8 Tratamento estatístico .....  | 51        |
| <b>4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES DE MLC DE PARICÁ REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO OU CARBONO .....</b> | <b>52</b> |
| 4.3.1 Propriedades físicas .....  | 52        |
| 4.3.2 Classificação das lamelas e homogeneização dos $E_w$ .....                                    | 52        |
| 4.3.3 Vigas de MLC reforçadas com fibras sintéticas .....   | 53        |
| 4.3.4 Resistência da linha de cola .....  | 56        |
| 4.3.5 Modos de ruptura .....  | 57        |
| 4.3.6 Cálculo teórico para $E_w$ e flecha .....   | 58        |
| <b>4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS DE MLC DE PARICÁ REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO OU CARBONO.....</b>      | <b>61</b> |
| <b>5. CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES .....</b>   | <b>62</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>64</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>71</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A Amazônia legal foi criada com o objetivo de melhor planejar e executar operações realizadas na área que se estende por oito estados brasileiros (Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e parte do Maranhão), correspondendo a 59% do território brasileiro (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2008).

A exploração de madeira na Amazônia foi impulsionada pelo crescimento do mercado externo e interno, pelo esgotamento das florestas da Mata Atlântica e pela abertura de rodovias no Estado do Pará. A exploração que antes era feita manualmente e transportada por várzeas passou a ser feita com motosserras e transportada pelas rodovias, aumentando a quantidade de madeira. Entretanto, grande parte do produto era desperdiçado e as áreas remanescentes de exploração foram seriamente danificadas (HOMMA, 2003, 2011).

Para ajudar a controlar os impactos ambientais na Amazônia, sem diminuir a oferta de madeira no mercado brasileiro e no exterior, utiliza-se madeira proveniente de florestas plantadas. As espécies comumente plantadas nesta região do Brasil são: eucalipto (*Eucalyptus* sp.), mogno (*Swietenia macrophylla*), ipê (*Tabebuia* sp.), jatobá (*Hymenaea courbaril*) freijó (*Cordia goeldiana*) e o paricá (*Schizolobium amazonicum*). Essas florestas têm ganhado espaço na Amazônia, por auxiliar na recuperação econômica de áreas degradadas e manter madeira para o mercado (TEREZO, 2010).

Nos últimos anos tem se investido em florestas plantadas com paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*), já que a espécie nativa da Amazônia, destacou-se entre 30 outras espécies como a mais promissora pela grande taxa de crescimento ( $35\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ) e consequentemente rápida colheita. Os altos incrementos em altura e diâmetro possibilitam sua colheita aos 15 anos de idade (RONDON, 2002). Árvores com 18 meses de idade chegaram a 4 m de altura e 10 cm de DAP (diâmetro à altura do peito). Para Silva; Leão (2006), o paricá é uma espécie que possui um tempo de vida curto a médio, quando comparada às espécies climáx.

O paricá tem sido a espécie nativa mais cultivada nas áreas de reflorestamento (Figura 1) da região amazônica pela sua capacidade de se adaptar à diversas condições edafoclimáticas, por seu rápido crescimento, pelas características da madeira, e pelo seu valor econômico (MARQUES; YARED; SIVIERO, 2006).

Figura 1 - Floresta plantada de paricá com 1,5 anos consorciado com mogno no Estado do Pará.



Fonte: Terezo, 2010

Segundo relatório da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (2013), o crescimento do paricá é de  $35 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , esse incremento anual é maior que o gênero *Pinus* ( $25$  a  $30 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ) e de *Tectona grandis* ( $15$  a  $20 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ), apenas o gênero *Eucalyptus* pode chegar a  $50 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ , ressalta-se que o paricá não possui nenhum programa de melhoramento genético, ao contrário de outras espécies utilizadas em plantios de larga escala no Brasil (SILVA, 2014).

A espécie possibilita madeira de excelente qualidade para o mercado, por produzir peças sem nós até a quarta tora (Figura 2). Também possui grande potencial para o processamento de sua madeira, pois apresenta facilidade quanto ao descascamento, laminação, secagem, prensagem e oferece excelente acabamento (SILVEIRA, 2014). Possui grande potencial para a produção de painéis laminados e compensados (ALMEIRA et al., 2013; AMSTALDEN et al., 2013), e pesquisas recentes afirmaram que a espécie pode ser utilizada em produtos estruturais por sua madeira ser classificada como classe C-20 conforme a Norma Brasileira NBR 7190-97, bem como na Madeira Lamelada Colada – MLC (TEREZO; SZÜCS, 2010; ALMEIDA et al., 2011a; TEREZO et al., 2015).

Figura 2 - Aspecto da madeira de paricá.



Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

A Madeira Lamelada Colada – MLC é um compósito a base de madeira e adesivo. As lamelas, que possuem um tamanho reduzido quando comparado ao tamanho final do elemento MLC, são coladas com adesivos de alta resistência de forma que as fibras da madeira fiquem paralelas entre si (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; TEREZO; SZÜCS, 2010; CHEW et al., 2016). O processo de fabricação do MLC consiste em separar, secar e acondicionar; classificar as lamelas de acordo com sua rigidez; unir as peças com emendas de topo; cortar para obter o tamanho desejado das lamelas; aplicar o adesivo; prensar as lamelas para confecção da viga e acondiciona-las para término de cura do adesivo.

As melhores peças não são necessariamente as com melhor aspecto visual, mas sim as peças de maior rigidez e de acordo com Teles (2009) e AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D3737 (2012), esse processo de classificação da rigidez na produção pode garantir um produto de melhor qualidade e estabilidade.

A MLC pode ser feita com madeiras de dicotiledôneas ou coníferas, que possuam baixa densidade (já que estas quando menores que  $0,7 \text{ g/cm}^3$  aparentam ter um melhor comportamento por terem maior facilidade na colagem e, portanto, maior penetração do adesivo) (AJDINAJ; HABIPI, 2015), tenham pouco teor de resina e umidade no máximo de 18% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7190, 1997). Assim, estruturas com baixo peso específico, podem vencer grandes vãos e reduzir a quantidade de ligações da estrutura (BERTOLINE, 2015).

Diversos autores pesquisaram o potencial do MLC com espécies comercializadas no Brasil (TEREZO; SZÜCZ, 2010; CUNHA; MATOS, 2010a; ALMEIDA et al., 2011a;

DEGIOVANI; SEGUNDINHO; CALIL JUNIOR, 2011; ABRANTES, 2012; SEGUNDINHO et al., 2013a; PAPPALARDO JUNIOR, 2013; CALIL NETO et al., 2014), e grande parte dos trabalhos indicou a classificação prévia da rigidez das lamelas utilizadas para obter a máxima resistência do elemento. Posicionando as lamelas de maior rigidez na periferia e as de menor rigidez no centro, conforme indicado por Bodig; Jayne (1993).

Com a necessidade das construções atuais de suprir maiores vãos e cargas, peças maciças ou roliças não são indicadas, por terem tamanho e área transversal limitadas pelo crescimento das árvores, mas a necessidade de peças com grandes envergaduras pode ser sanada com o uso de MLC. Porém, muitas vezes é essencial aumentar a resistência do MLC, por meio de vigas em MLC reforçadas nas zonas de maior tensão, gerando um acréscimo da capacidade de carga sem aumentar a seção transversal do elemento lamenado colado.

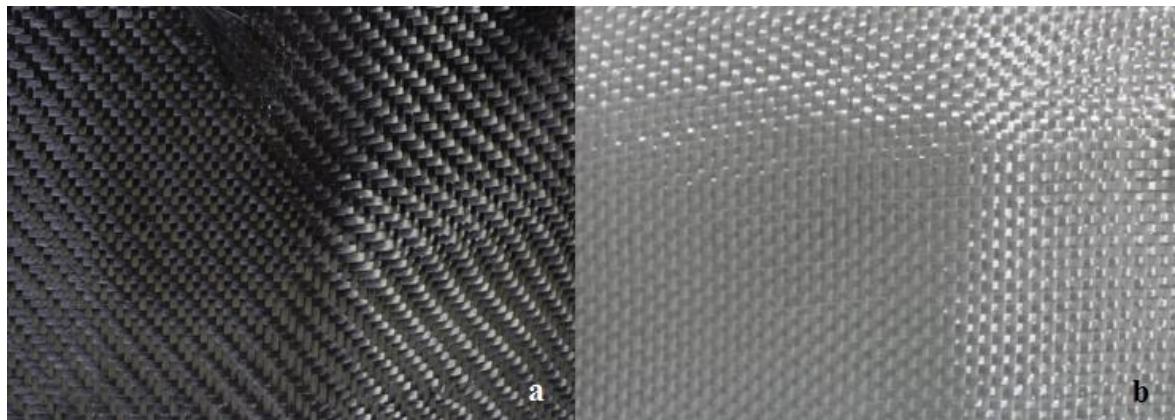
Os reforços utilizados nos dias atuais são barras de aço ou alumínio, fibras de vidro, carbono e/ou aramida. As fibras são utilizadas nas formas de tecido, barras ou fios para reforçar estruturas com madeira.

As Fibras Sintéticas (FS) têm sido utilizadas há décadas nas mais variadas formas conforme comenta por Biscaya; Cruz; Chastre (2016). Segundo Juvandes; Barbosa (2012) o reforço de elementos estruturais com FS buscando a melhor resistência e interação da união do compósito fibras-madeira ainda é uma técnica em desenvolvimento.

As FS oferecem um interessante campo de pesquisa, já que elas possuem ótima resistência mecânicas comparadas ao baixo peso específico, resistência à oxidação, e por manter suas propriedades mesmo quando submetidas a amplas faixas de temperatura (FREIRE et al., 1994; CHEW et al., 2016).

O polímero reforçado com fibras de carbono (Figura 3a) é um material utilizado em pesquisas para reforços ou recuperação de componentes estruturais, por seu alto desempenho mecânico, baixo peso específico e a capacidade de associar-se com outros materiais facilmente (NADIR et al., 2016). As fibras de vidro (Figura 3b) são utilizadas nas formas de placas ou hastes ou tecidos com diferentes gramaturas comerciais para aumentar a resistência nas madeiras (ARRIAGA; ÍNIGUES-GONZALES; ESTEBAN, 2011). Os tecidos são encontrados nas formas unidirecional ou multidirecional com diferentes gramaturas, sendo o primeiro o mais indicado para reforço em estruturas (RAFTERY; HARTE, 2011).

Figura 3 - Tecido de fibra de carbono (a) e tecido de fibra de vidro (b) com gramatura de 200 g.m<sup>-2</sup>.



Fonte: Elaborada pela autora, 2016.

As FS podem ser aplicadas para recuperar estruturas de edificações com muito tempo de uso ou podem ser coladas em elementos estruturais que serão utilizados em edificações a serem construídas. Normalmente, a fibra é aplicada na forma de tecido e nas zonas tracionadas em vigas de MLC, gerando ganho da resistência (ROMANI; BLAß, 2001; BERTOLINI, 2015; GLIŠOVIĆ; STEVANOVIĆ; TODOROVIĆ, 2015; KHELIFA et al., 2015; KLIGER et al., 2016).

As pesquisas com Madeira Lamelada Colada Reforçada - MLCR ainda estão em desenvolvimento e embora, haja vários estudos (ARRIAGA; IÑIGUES-GONZÁLES; ESTEBAN, 2011; JUVANDES; BARBOSA, 2012; RAFTERY; WHELAN, 2014; D'AMBRISI; FOCACCI; LUCIANO, 2014; GLIŠOVIĆ; STEVANOVIĆ; TODOROVIĆ, 2015; CHEW et al., 2016; YANG et al., 2014) com resultados satisfatórios ao reforçar elementos estruturais de madeira, necessita-se observar esse comportamento por métodos de cálculo teórico, objetivando predizer o comportamento de vigas reforçadas, como o método de homogeneização da seção – MHS.

Com as pesquisas de reforços em vigas de madeira ainda em desenvolvimento, buscam-se mais trabalhos com as madeiras utilizadas no Brasil. Já que o país possui alta variabilidade e grande heterogeneidade dentro das espécies florestais nativas e exóticas plantadas.

## 1.2 PROBLEMÁTICA

A madeira de paricá possui características de resistência mecânica compatíveis para a produção de elementos estruturais em MLC (TEREZO; SZUCS, 2010; TEREZO et al., 2015; CAVALHEIRO et al., 2016). Entretanto, as vigas em MLC de paricá produzidas em pesquisa no Brasil apresentaram resultados inferiores às vigas MLC de *Eucalyptus*. O reforço de vigas MLC de paricá utilizando-se fibras sintéticas coladas nas lamelas inferiores promoverá um incremento da sua resistência à flexão. O desempenho final deste produto poderá ser melhor do que o de vigas MLC de *Pinus* e similar ao de *Eucalyptus*.

## 1.3 HIPÓTESES

(1) é possível classificar lamelas de madeira de paricá pelo Ew utilizando a classificação de lamelas pelo ensaio de obra com leitura em uma régua de medição? (2) há diferença entre os Ew de lamelas de paricá mensurados com dois métodos de leitura do deslocamento? (3) é possível aumentar a resistência do MLC de paricá reforçando-o com fibras sintéticas e com adesivo à base de resorcina? (4) há diferenças significativas de resistência da MLC de paricá reforçada com diferentes tipos de fibras? e (5) o desempenho de vigas MLC de paricá reforçadas é compatível com vigas MLC de outras espécies?

A presente pesquisa está dividida em duas partes. A primeira, avaliou o método de ensaio pexdito com leitura do deslocamento por uma régua graduada e método com leitura por um transdutor de deslocamento, para determinar o Ew em lamelas da espécie de paricá (*Schizolobium amazonicum* var. *parahyba*). A segunda parte avaliou a aplicação de fibras sintéticas como reforço estrutural em vigas de MLC de paricá por meio dos resultados de ensaios laboratoriais de flexão, cisalhamento e tração, bem como a caracterização das linhas de colagem.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Determinar a resistência mecânica de vigas de madeira lamelada colada de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) reforçadas com fibras sintéticas em tensões de flexão.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar métodos não destrutivos para a classificação de lamelas para produção de MLC de paricá;
- Determinar a resistência à flexão de vigas em MLC de paricá sob diferentes tipos de reforços com fibras sintéticas;
- Analisar o desempenho do Método Numérico de Homogeneização da Seção em relação ao ensaio destrutivo para a determinação do módulo de elasticidade de vigas MLC de paricá com e sem reforço de fibras sintéticas;
- Avaliar o desempenho de vigas MLC de paricá reforçadas em relação às vigas de MLC de paricá sem reforço;
- Comparar o desempenho de vigas MLC de paricá reforçadas desta pesquisa com vigas MLC de *Pinus* e de *Eucalyptus* da literatura.

**3 – CAPÍTULO I - CLASSIFICAÇÃO DE LAMELAS DE PARICÁ  
(*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (HUBER EX DUCKE) BARNEBY) POR  
MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

### 3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A CLASSIFICAÇÃO DE LAMELAS EM MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

A literatura aponta que os primeiros ensaios com o objetivo de analisar a relação entre o carregamento e seus efeitos (tensões e deformação), foram feitos por Galileu e Hooke, no século XVII. Os experimentos para determinar as constantes elásticas da madeira, considerado um material ortotrópico, só foram feitos por volta do século XX por Jenkin & Canington conforme citado por Ballarin; Nogueira (2003).

Nos dias atuais, existem diversas formas de ensaios para determinar as propriedades mecânicas da madeira, desde os destrutivos realizados com o rompimento total do material, ou mesmo os não destrutivos, esse último é comumente utilizado para classificar, sem destruir, as lamelas que formarão os elementos em Madeira Lamelada Colada - MLC.

A MLC é um produto engenheirado de madeira que necessita ser fabricada com precisão em todos os estágios do processo. Por isso, requer um controle de qualidade na produção para assegurar que as propriedades físicas e mecânicas da MLC sejam adequadas para as resistências especificadas pelos projetos e normas (CALIL NETO, 2011; SEGUNDINHO et al., 2013b). Como os materiais utilizados na construção civil normalmente passam um longo tempo em uso, os mesmos devem ser resistentes a esforços com a menor deformação possível.

Para obter o melhor aproveitamento do material MLC é necessário conhecer as propriedades físicas e mecânicas das lamelas que irão compor o mesmo conforme, Cavalheiro, 2014, dentre outras). Para tal, pode-se proceder com a classificação da madeira, que conforme Carreira et al. (2012), consiste em agrupar as lamelas em classes de acordo com os defeitos e o módulo de elasticidade ( $E_w$ ). Este procedimento prevê o uso racional da madeira, tornando possível a disposição de peças de menor defeito e mais resistentes no local de maior solicitação (tensões axiais máximas de tração e compressão) e as madeiras de menor qualidade nas zonas menos carregadas da estrutura (linha neutra) (BODIG; JAYNE, 1993).

A ABNT-NBR 7190/97, preconiza ensaios destrutivos para avaliação das propriedades mecânicas da madeira. Porém, estes ensaios com corpos de prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos não exprimem o real comportamento de uma peça quando solicitada a um determinado esforço (FREITAS; CALIL JÚNIOR, 2005; VIVIAN et al., 2012). Isto gera uma demanda para a realização de ensaios com o material em tamanho real que será aplicado na

construção. Para tanto, podem ser empregados os ensaios não destrutivos para a determinação do Ew, esses testes possibilitam uma classificação mais rápida e eficaz, além de não destruir o material e utilizá-lo no produto final (SALES; CANDIAN; CANDIAN, 2011).

Atualmente, existem diversos equipamentos para determinar a rigidez de peças de madeira de forma eficaz, como o “*stress wave*” (DONG; HAI, 2011; LIU et al., 2014; RIBEIRO et al., 2016), a vibração transversal (CARREIRA et al., 2012), o ultrassom (MISSIO et al., 2013; CADEMARTORI et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015; MELO; MENEZZI, 2016) e o resistógrafo (CARRASCO; PEREIRA; ALVES, 2013).

Algumas dessas técnicas tornam-se difíceis de serem aplicadas por pequenas empresas brasileiras devido ao elevado preço dos equipamentos. Porém, a classificação de rigidez pode ser realizada adaptando-se a ASTM D4761-2002, a qual preconiza o ensaio de rigidez de forma não destrutiva baseando-se na premissa do deslocamento da peça ensaiada ao se aplicar uma força constante.

O deslocamento é a diferença entre posição final e inicial que um corpo sofre ao ser submetido a uma ação. Considerando que a rigidez é a capacidade do material de resistir a um esforço sem se deformar de forma significativa, quanto menor o deslocamento maior será a rigidez (HIBBEKER, 2011).

Contudo, para que a determinação do deslocamento possa ser realizada necessita-se de um leitor de deslocamento. Este pode ser feito com a utilização de equipamentos eletrônicos de alta precisão ou com um operador que realizará a determinação do deslocamento visualmente com uma régua graduada.

Porém, todas as formas de determinação de uma manifestação da natureza apresentam erros, pela medição ser uma transferência de informação entre um sistema e um operador que utilizará as informações. Essa interação entre o sistema fonte e o sistema de medição provoca a modificação das propriedades de ambos. Assim o valor da medição é uma estimativa do valor verdadeiro que não poderá ser realmente obtido (RM – 68, 2013). Podendo gerar uma leitura diferente entre a leitura de uma máquina calibrada e um operador.

Essas diferenças também podem ser ocasionadas pelos erros grosseiros, devidos à falta de atenção do operador, por erros sistemáticos, como o incorreto posicionamento da régua, ou por erros aleatórios, associados a diferenças naturais (CABRAL, 2004).

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar analiticamente o desempenho de vigas MLC compostas por lamelas classificadas e ordenadas conforme seus respectivo  $E_w$ . Sendo estes determinados no ensaio expedito não destrutivo a flexão com deslocamento mensurado por (1) régua de medição e (2) por um transdutor conectado a um sistema automático de aquisição de dados

### 3.2. MATERIAL E MÉTODOS DA CLASSIFICAÇÃO DE LAMELAS EM MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

#### 3.2.1 Amostragem

A madeira de paricá utilizada no presente estudo era proveniente de florestas plantadas da região nordeste do Estado do Pará. As árvores tinham idades de 6, 10, 19 e 28 anos. As duas primeiras idades foram plantadas no Município de Aurora do Pará (latitude  $2^{\circ} 10' 27.5''$  S e longitude  $47^{\circ} 32' 42.0''$  W), e as duas últimas idades no Município de Tomé-Açu (latitude  $2^{\circ} 23' 42.7''$  S e longitude  $48^{\circ} 08' 43.4''$  W).

As toras foram serradas em pranchas de 5 cm x 20 cm x 250 cm, sendo secas em estufa a 12% de umidade, na capital Belém, e depois transportadas para o Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV na Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, no Município de Lages, onde permaneceram armazenadas e protegidas de intempéries até atingirem a umidade de equilíbrio de 13,87%. Em uma serra circular, os pranchões foram desdobrados em 241 cm x 5 cm x 2 cm obtendo-se um total de 136 lamelas.

Devido à heterogeneidade do lote, ocasionado pelas diferentes idades e sítios, as peças foram separadas em classes de densidade, conforme a regra de Sturges. A densidade aparente foi determinada pelo peso individual obtido com o auxílio de uma balança digital e com o volume estipulado pelas dimensões da peça em espessura, largura e comprimento.

Os tratamentos foram compostos por oito classes de densidade e identificados conforme o método de determinação do deslocamento, sendo C1-V a C8-V para o visual e C1-T a C8-T para o transdutor de deslocamento.

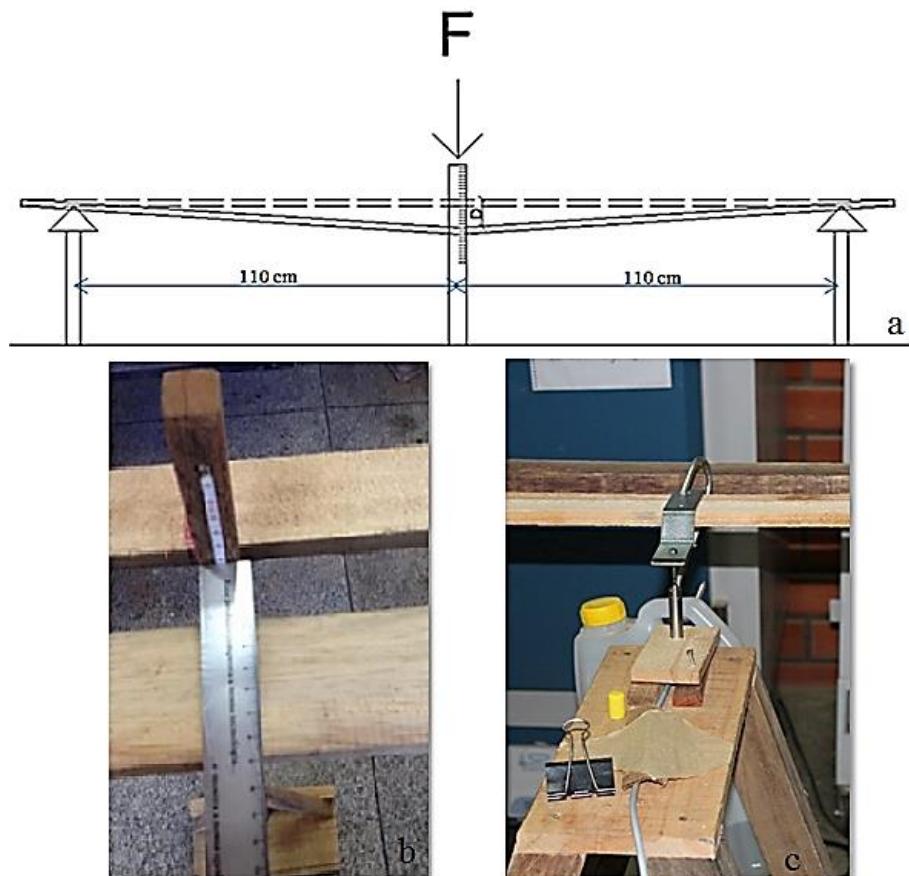
### 3.2.2 Ensaios não destrutivos

Todas as peças foram identificadas e avaliadas quanto à rigidez com o ensaio não destrutivo, baseado na ASTM D4761 (2002) que regulamenta o ensaio de flexão à três pontos com carregamento na direção transversal da menor inércia do material.

Foram realizados ensaios preliminares de carga e deslocamento para a delimitação do regime elástico em 5 lamelas. Com base nestes, foi escolhida uma carga de 30 N, de modo a garantir que o deslocamento a ser medido nas demais lamelas, também seriam no regime elástico. O vão foi constante para todas as lamelas medindo 220 cm.

Os ensaios foram realizados conforme o método de ensaio expedito não destrutivo. Esse método artesanal consiste em fazer duas leituras no ponto médio do vão; a primeira leitura sem carga na peça e a segunda com carga (Figura 4a).

Figura 4 - Esquema de aplicação de carga (F) e leitura do deslocamento (D) de lamelas para a determinação da sua rigidez (a) com leitura por régua de medição (b) e por um transdutor de deslocamento (c).



Fonte: Elaborada pela autora, 2017

As leituras foram realizadas de duas formas: na primeira, a determinação do deslocamento foi feita usando-se uma régua de medição, e posteriormente a determinação foi feita mediante o uso de um transdutor indutivo acoplado a um sistema de aquisição automático de dados. No meio do vão e abaixo do ponto de aplicação da carga foram posicionados a régua de medição (Figura 4b) e em seguida o transdutor (Figura 4c). Foram realizadas duas determinações de deslocamento para cada lamela, uma vez que ao término da primeira determinação repetia-se o mesmo procedimento para o verso da lamela, obtendo-se o segundo deslocamento.

Com o deslocamento calculou-se o Módulo de Elasticidade –  $E_w$  que é o parâmetro de rigidez da lamela, sendo dado por:

$$E_w = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot D_x \cdot I} \quad (1)$$

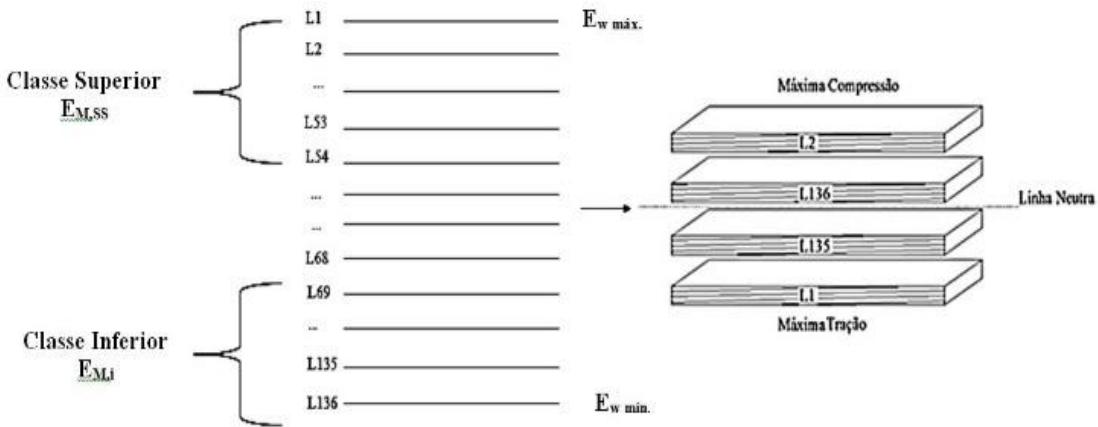
Onde:

$E_w$  = Módulo de Elasticidade em N/mm<sup>2</sup>;  $F$  = Força aplicada no centro do vão em N;  $L$  = vão entre apoios em mm;  $D_x$  = Deslocamento médio da peça em mm;  $I$  = Momento de inércia da peça em mm<sup>4</sup>.

### 3.2.3 Classificação das lamelas e composição das vigas MLC

A distribuição das lamelas foi feita de forma sistemática de acordo com o  $E_w$ , para aumentar a homogeneidade do lote das vigas. Para cada método (visual ou transdutor) foi montado uma composição conforme o  $E_w$  obtido, perfazendo-se um total de 32 vigas em cada método, com 4 lamelas por viga. Para tal, os  $E_w$  foram agrupados do maior para o menor valor. As lamelas de maior  $E_w$  foram posicionadas na camada externa da zona de máxima tração, a segunda lamela com maior  $E_w$  foi posicionada na parte extrema de máxima compressão, as lamelas de menor  $E_w$  foram posicionadas na parte central da viga (Figura 5).

Figura 5. Distribuição das lamelas para montagem as vigas de MLC



Fonte: Elaborada pela autora, 2017

### 3.2.4 Homogeneização da elasticidade das vigas MLC

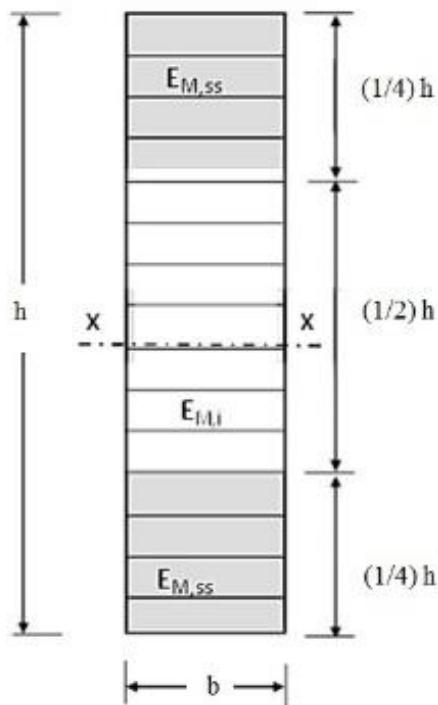
O  $E_w$  individual de cada viga foi calculado conforme o projeto de revisão de norma da PNBR 7190 (2011). A peça de MLC, constituída da combinação de lâminas com módulo de elasticidade à flexão do lote de valores superior, empregado nas quartas partes mais afastadas da linha neutra, e lâminas com módulo de elasticidade à flexão do lote de valores inferior, empregado na metade central da seção transversal (Figura 6), deverá ter a rigidez à flexão calculada pela consideração de seção transformada, como segue equação (2):

$$EI = [2 * E_{m,s} * I_{(1/4)} + E_{m,i} * I_{(1/2)}] \quad (2)$$

Onde:

$EI$  é a rigidez à flexão do elemento estrutural;  $E_{m,s}$  é o valor médio dos módulos de elasticidade do lote de valores superior;  $E_{m,i}$  é o valor médio dos módulos de elasticidade do lote de valores inferior;  $I(1/4)$  é o momento de inércia da quarta parte mais afastada, em relação ao eixo baricêntrico ( $x$ );  $I(1/2)$ : momento de inércia da metade central da seção transversal, em relação ao eixo baricêntrico ( $x$ ).

Figura 6 - Seção mostrando a combinação de lâminas com diferentes módulos de elasticidade à flexão.



Fonte: PNBR (7190), 2016

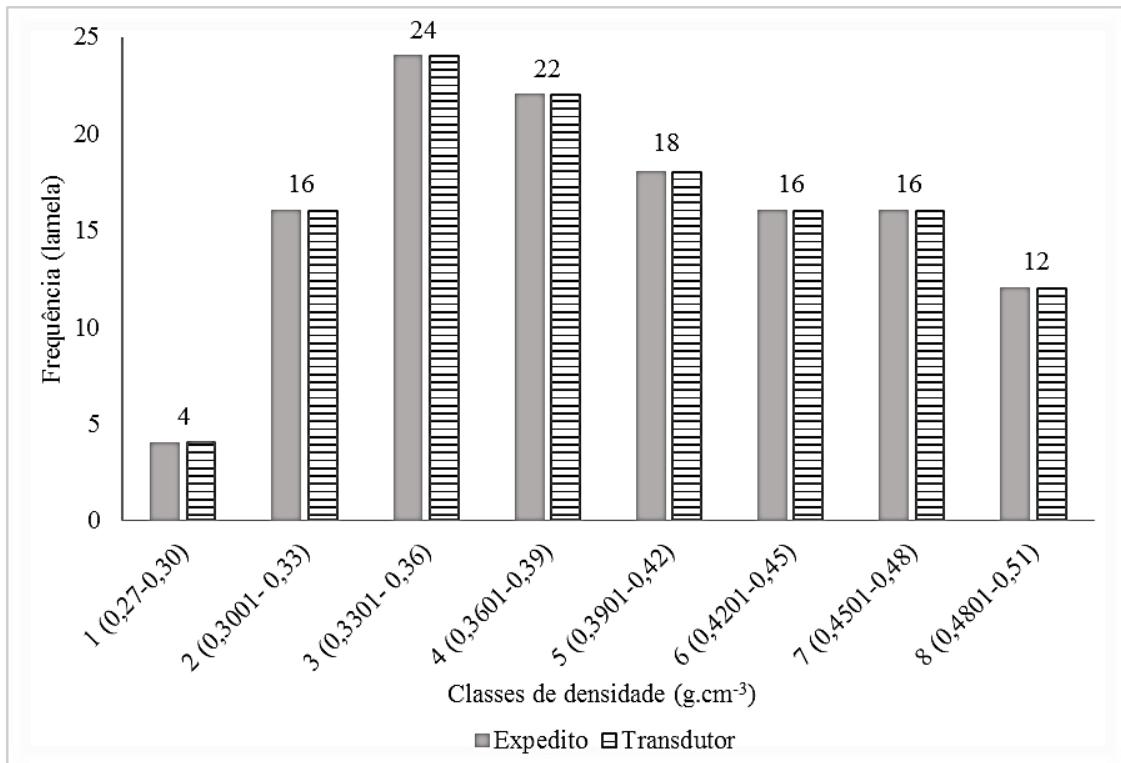
### 3.2.5 Tratamento estatístico

Em cada tratamento foram realizados os testes de valores espúrios (Grubbs), normalidade (Kolmogorov-Smirnov) e homogeneidade (Bartlett), seguidos da Análise de Variância (ANOVA), do teste de médias por Scott Knott. As análises de regressão foram feitas entre os  $E_w$  obtidos em cada método com cada classe de densidade. Todos os testes estatísticos foram feitos a 5% de significância. O erro padrão da estimativa foi calculado para cada uma das classes de densidade em relação aos valores obtidos por Terezo (2010) que caracterizou o mesmo lote de paricá, obtendo  $E_w$  médio a flexão da madeira maciça de 8.738,5 MPa. O erro padrão também foi calculado para cada uma das classes de densidade.

## 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO DA CLASSIFICAÇÃO DE LAMELAS EM MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

A Figura 7 mostra a quantidade de lamelas dentro das 8 classes de densidade com valores que variaram de 0,27 a 0,51  $\text{g.cm}^{-3}$ . Com o teste de Grubbs foram excluídas 5 lamelas que apresentavam valores espúrios.

Figura 7 - Distribuição de lamelas dentro de 8 classes de densidade para dois métodos de determinação de Ew.



Fonte: Elaborada pela autora, 2017

Observa-se a maior quantidade de lamelas foram classificadas dentro das classes 3 e 4 com densidade aparente variando de 0,3301 até 0,39  $\text{g.cm}^{-3}$ . Contudo, devido às diferenças de idade e sítios, as densidades variam de 0,27 a 0,51  $\text{g.cm}^{-3}$ . Os resultados da densidade aparente são similares ao da densidade básica média de 0,31  $\text{g.cm}^{-3}$  estimada por Terezo et al. (2015) que avaliaram o mesmo lote de paricá. Porém, Vidaurre et al. (2012), obtiveram densidades de 0,28  $\text{g.cm}^{-3}$ , de árvores com idades variando de 6 a 11 anos. Indicando que a classificação das peças de paricá é indispensável, já que existe uma variação da densidade dentro da própria espécie devido à idade e procedência das árvores.

Os valores médios do Ew dentro dos intervalos das classes de densidade estão apresentados na Tabela 1. Com os resultados do teste de Scott Knott, observou-se que os métodos de leitura foram estatisticamente iguais. Porém, ao comparar as médias dentro das classes de densidade (C1 a C8) notou-se diferenças estatísticas.

Tabela 1 - Valores médios do Ew (MPa) para as diferentes classes de densidade e nos dois métodos de obtenção do deslocamento com respectivo erro padrão.

| Classes de densidade                      | Métodos de Mensuração |        |                      |
|---|-----------------------|--------|----------------------|
|   | Expedito              |        | Transdutor           |
|   | E <sub>w</sub> (MPa)  | CV (%) | E <sub>w</sub> (MPa) |
|   | Erro padrão           |        | Erro padrão          |
| <b>C1</b>                                 | 7.042,62 b            |        | 5.140,06 b           |
|   | 44,05                 |        | 35,01                |
|   | 1.551,24              |        | 899,75               |
| <b>C2</b>                                 | 7.899,01 b            |        | 5.927,06 b           |
|   | 19,55                 |        | 32,44                |
|   | 386,09                |        | 480,73               |
| <b>C3</b>                                 | 8.095,00 b            |        | 6.983,30 b           |
|   | 14,48                 |        | 48,81                |
|   | 239,28                |        | 696,76               |
| <b>C4</b>                                 | 8.291,54 b            |        | 6.904,86 b           |
|   | 22,34                 |        | 29,47                |
|   | 395,04                |        | 433,94               |
| <b>C5</b>                                 | 8.538,66 b            |        | 8.036,64 a           |
|   | 24,74                 |        | 30,44                |
|   | 497,91                |        | 576,60               |
| <b>C6</b>                                 | 8.941,32 b            |        | 8.080,84 a           |
|   | 19,58                 |        | 35,51                |
|   | 437,64                |        | 717,52               |
| <b>C7</b>                                 | 9.645,94 a            |        | 7.296,46 b           |
|   | 24,95                 |        | 34,61                |
|   | 601,63                |        | 631,38               |
| <b>C8</b>                                 | 11.451,31 a           |        | 9.375, 84 a          |
|   | 18,91                 |        | 43,96                |
|   | 187,03                |        | 254,55               |
| <b>Média Geral</b>                        | <b>8.738 A</b>        |        | <b>7.218 A</b>       |
| <b>Erro padrão (<math>\pm</math> MPa)</b> | <b>187,03</b>         |        | <b>254,55</b>        |
| <b>Ew12%</b>                              | <b>9.228</b>          |        | <b>7.623</b>         |

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúsculas na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott com 5% de significância.

Foi observada uma tendência do Ew aumentar conforme eleva-se a densidade média das lamelas (de 7.042,62 MPa - 0,27 g.cm<sup>-3</sup> para 11.451,31 MPa - 0,51 g.cm<sup>-3</sup>). Resultado também obtido pelos autores Lobão et al. (2004) que avaliaram peças de eucalipto com diferentes densidades e constataram que a densidade influência nas propriedades mecânicas, aumentando os valores destas conforme elevava-se a densidade.

Em pesquisa com peças de paricá de 10 anos com tamanho estrutural Almeida et al. (2013) registraram Ew médio de 8.900 MPa. Analisando as propriedades mecânicas do mesmo lote de paricá desta pesquisa e com idades variando de 6, 10, 19 e 28 anos de idade, Terezo et al. (2015) obtiveram módulos de elasticidade médios entre 9.293; 9.332; 8.190 e 8.137 MPa, respectivamente. Vidaurre (2010) obteve Ew de 5.811 MPa para a espécie com 7 anos de idade.

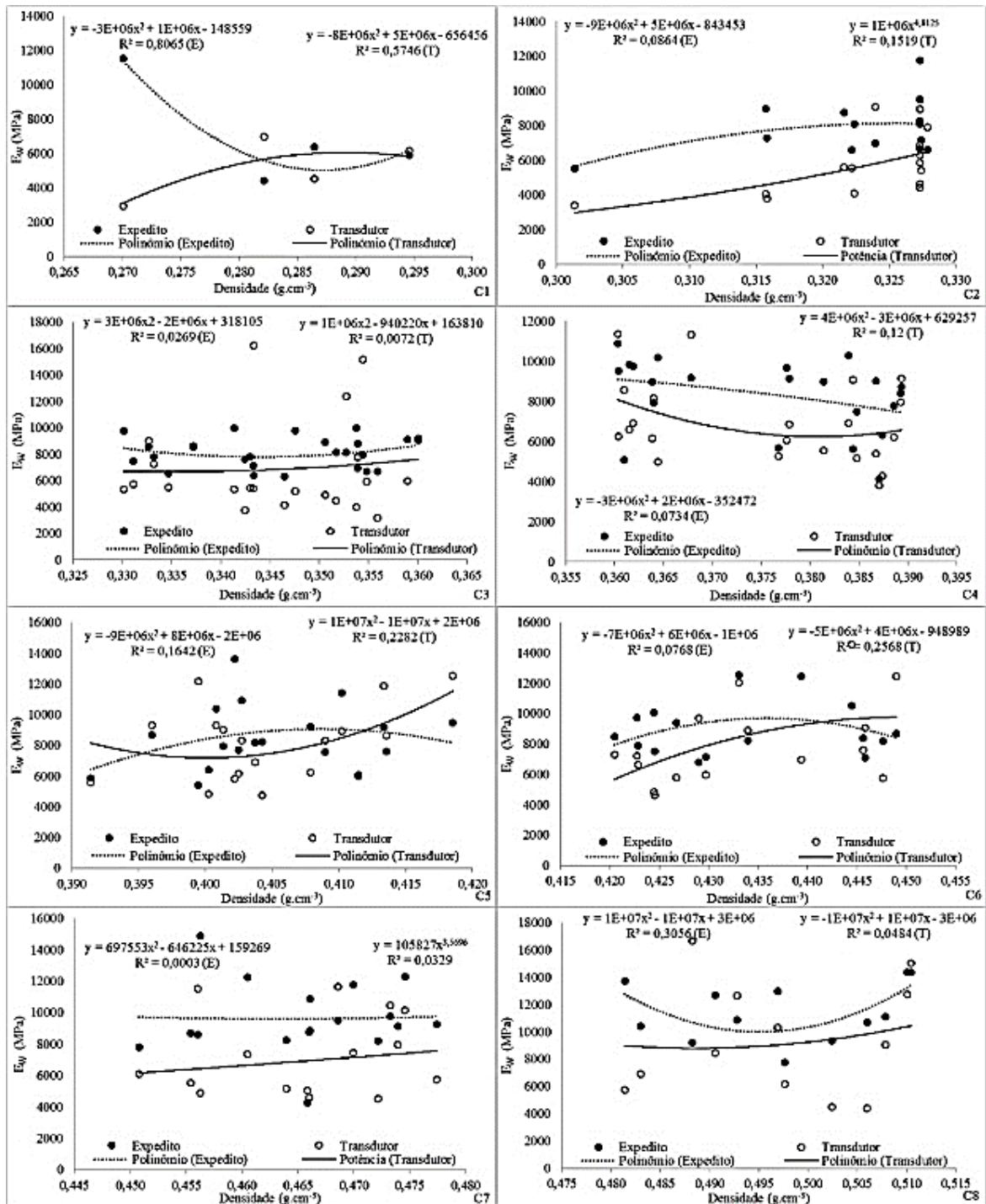
As pesquisas com paricá mostram diferentes médias de Ew, indicando a grande variabilidade de material, seja este devido ao tipo de sítio e local de plantio, ou pela idade. Mas mesmo que a madeira venha de um mesmo local e tenha a mesma idade, ainda pode-se ter diferenças no Ew devido à heterogeneidade dentro de cada árvore, devido ao lenho juvenil e adulto (BALLARIN; PALMA, 2003). Tornando imprescindível a realização de classificações das lamelas.

Essa variabilidade das amostras aumenta o coeficiente de variação (C.V), fator que influencia na ocorrência ou não diferenças estatísticas. A ABNT – NBR 7190 (1997) preconiza a utilização de lotes de madeira homogêneos e com no máximo 12m<sup>3</sup>. Contudo, devido à alta variabilidade de madeira no país, a utilização de um material com características similares pode não ser possível na indústria. Deste modo, a classificação das lamelas pela densidade auxiliaria a diminuir as diferenças dentro de um lote heterogêneo.

Comparando o Ew do paricá (9.228 MPa no método de ensaio expedito e 7.623 MPa no método com transdutor) observa-se que os valores pelo método expedito alcançaram o Ew médio obtido por Missio et al. (2012) ao estudar *Eucalyptus grandis*. Sendo que os valores em peças não tratadas foram de 9.103,09 MPa, e em peças tratadas de 8.822,94 MPa. Na madeira de *Pinus elliotti*, conforme estudado por Missio et al. (2015), o Ew do lenho adulto foi de 12.267, 90 MPa e no lenho juvenil de 6.822,32 MPa, indicando que o Ew do paricá é inferior apenas ao Ew em lamelas de *P. elliotti* com lenho adulto.

Na figura 8 são apresentadas as correlações entre Ew e a densidade aparente das lamelas. Os demais ajustes e relações podem ser observadas no Anexo 1. Na maioria das classes se constatou uma fraca correlação entre o Ew e a densidade aparente. Indicando que ao homogeneizar a densidade da madeira, haverá pouca oscilação do Ew dentro do intervalo de densidade pré-determinado. A forte correlação na classe C1 pode ter ocorrido devido ao lote ter apresentado apenas quatro lamelas com densidade aparente variando de 0,27-0,33 g.cm<sup>-3</sup>, obtendo-se assim poucas repetições e grande variabilidade do Ew.

Figura 8 - Correlações entre o método visual e transdutor com a densidade aparente em peças de paricá em diferentes classes de densidade.



C1- classe de densidade variando de 0,27 – 0,30 g.cm⁻³; C2- 0,3001 – 0,33 g.cm⁻³; C3- 0,3301-0,36 g.cm⁻³; C4-0,3601-0,39 g.cm⁻³; C5- 0,3901-0,42 g.cm⁻³; C6- 0,4201-0,45 g.cm⁻³; C7 – 0,4501- 0,48 g.cm⁻³; C8 – 0,4801- 0,51 g.cm⁻³.

Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

Observa-se que a equação polinomial apresentou as melhores relações em todas as classes avaliadas com exceção das classes C2 e C7 no método por transdutor cujas melhores correlações foram pela equação de potência.

Os valores de  $R^2$  foram valores considerados pouco representativos, devido à pequena variabilidade da densidade dentro de cada classe, não influenciando positivamente no aumento ou decréscimo do  $E_w$ , assim dentro de uma baixa variação da densidade também não ocorrerão grandes variações do  $E_w$ . Mas ao aumentar a heterogeneidade da densidade, aumenta-se as diferenças do  $E_w$ , já que segundo Abruzzi et al. (2012) e Dias; Lahr (2004), existe uma influência da densidade considerável no  $E_w$  da madeira. Isso mostra a importância de se classificar as lamelas para otimizar o potencial do material. Assim, o uso do método visual pode ser aplicado apenas se existir uma classificação da densidade das lamelas.

Com a classificação das lamelas de paricá as vigas foram compostas de forma ordenada pelo  $E_w$  de cada lamela conforme o Anexo 2 e 3. Os valores de  $E_w$  homogeneizados pelo PNBR 7190 para as vigas com lamelas classificadas pelo método expedido e pelo método com transdutor de deslocamento são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Média de rigidez em vigas com lamelas classificadas pelo método visual e pelo método com transdutor de deslocamento.(Continua)

| Nº viga    | Ew (MPa) |            |         | Nº viga    | Ew (MPa) |            |       | E.R (%) |
|------------|----------|------------|---------|------------|----------|------------|-------|---------|
|            | Visual   | Transdutor | E.R (%) |            | Visual   | Transdutor |       |         |
| <b>V1</b>  | 10.957   | 10.003     | 8,71    | <b>V17</b> | 12.363   | 9.213      | 25,48 |         |
| <b>V2</b>  | 11.016   | 8.785      | 20,26   | <b>V18</b> | 12.371   | 9.291      | 24,90 |         |
| <b>V3</b>  | 11.100   | 8.887      | 19,94   | <b>V19</b> | 12.425   | 9.221      | 25,79 |         |
| <b>V4</b>  | 11.427   | 8.939      | 21,77   | <b>V20</b> | 12.455   | 9.239      | 25,83 |         |
| <b>V5</b>  | 11.686   | 8.966      | 23,28   | <b>V21</b> | 12.484   | 9.314      | 25,40 |         |
| <b>V6</b>  | 11.703   | 8.930      | 23,69   | <b>V22</b> | 12.474   | 9.354      | 25,02 |         |
| <b>V7</b>  | 11.745   | 8.797      | 25,10   | <b>V23</b> | 12.503   | 9.322      | 25,44 |         |
| <b>V8</b>  | 11.761   | 8.839      | 24,84   | <b>V24</b> | 12.621   | 9.377      | 25,70 |         |
| <b>V9</b>  | 11.876   | 8.837      | 25,59   | <b>V25</b> | 12.681   | 9.477      | 25,26 |         |
| <b>V10</b> | 11.900   | 8.818      | 25,06   | <b>V26</b> | 12.821   | 9.522      | 25,73 |         |
| <b>V11</b> | 12.194   | 8.998      | 26,21   | <b>V27</b> | 12.847   | 9.537      | 25,77 |         |
| <b>V12</b> | 12.173   | 9.119      | 25,09   | <b>V28</b> | 12.877   | 9.580      | 25,60 |         |
| <b>V13</b> | 12.210   | 9.147      | 25,09   | <b>V29</b> | 12.931   | 9.623      | 25,58 |         |
| <b>V14</b> | 12.244   | 9.154      | 25,24   | <b>V30</b> | 12.999   | 9.629      | 25,93 |         |

Tabela 3 - Média de rigidez em vigas com lamelas classificadas pelo método visual e pelo método com transdutor de deslocamento. (Conclusão)

| Nº viga         | Ew (MPa)        |               | Nº viga       | Ew (MPa)     |                | E.R (%) |
|-----------------|-----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|---------|
|                 | Visual          | Transdutor    |               | Visual       | Transdutor     |         |
| <b>V15</b>      | 12.294          | 9.159         | 25,50         | <b>V31</b>   | 13.145         | 9.757   |
| <b>V16</b>      | 12.373          | 9.212         | 25,54         | <b>V32</b>   | 13.182         | 9.816   |
| <b>Média</b>    | <b>12.245 a</b> |               | <b>24,36</b>  | <b>Média</b> | <b>9.249 b</b> |         |
| <b>Expedito</b> |                 | <b>Trans.</b> |               |              |                |         |
| <b>Ew %</b>     | <b>12.932</b>   |               | <b>Ew %</b>   | <b>9.768</b> |                |         |
| <b>C.V(%)</b>   | <b>4,86</b>     |               | <b>C.V(%)</b> | <b>3,46</b>  |                |         |
| <b>Erro</b>     |                 |               | <b>Erro</b>   |              |                |         |
| <b>Padrão</b>   | <b>148,78</b>   |               | <b>Padrão</b> | <b>80,00</b> |                |         |
| (±MPa)          |                 |               | (±MPa)        |              |                |         |

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre linhas pelo teste de Scott-Knott com 5% de significância. E.R.= erro relativo. C.V- Coeficiente de variação

Houve diferenças estatísticas entre as vigas com dois métodos de determinação do deslocamento, mostrando que a determinação do deslocamento pelo método expedito utilizando uma régua de medição apresenta Ew maior do que as vigas compostas por lamelas classificadas pelo método com transdutor de deslocamento.

Os valores do Ew em vigas de paricá (12.931,91 MPa para vigas compostas pelo método expedito e de 9.767, 87 MPa para vigas compostas pelo método com transdutor de deslocamento) foram menores que em vigas de *Eucalyptus*, conforme Miotto; Dias (2009) que avaliaram vigas de Lyptus e obtiveram Ew de 20.433 MPa. Contudo, ao avaliar vigas MLC com lamelas classificadas de *Pinus taeda*, Cunha; Matos (2010b) obtiverem Ew médio de 7.765 MPa. Em vigas de paricá, Almeida et al. (2011b) obteve Ew médio de 8.809 MPa. Ambos valores abaixo do determinado neste trabalho.

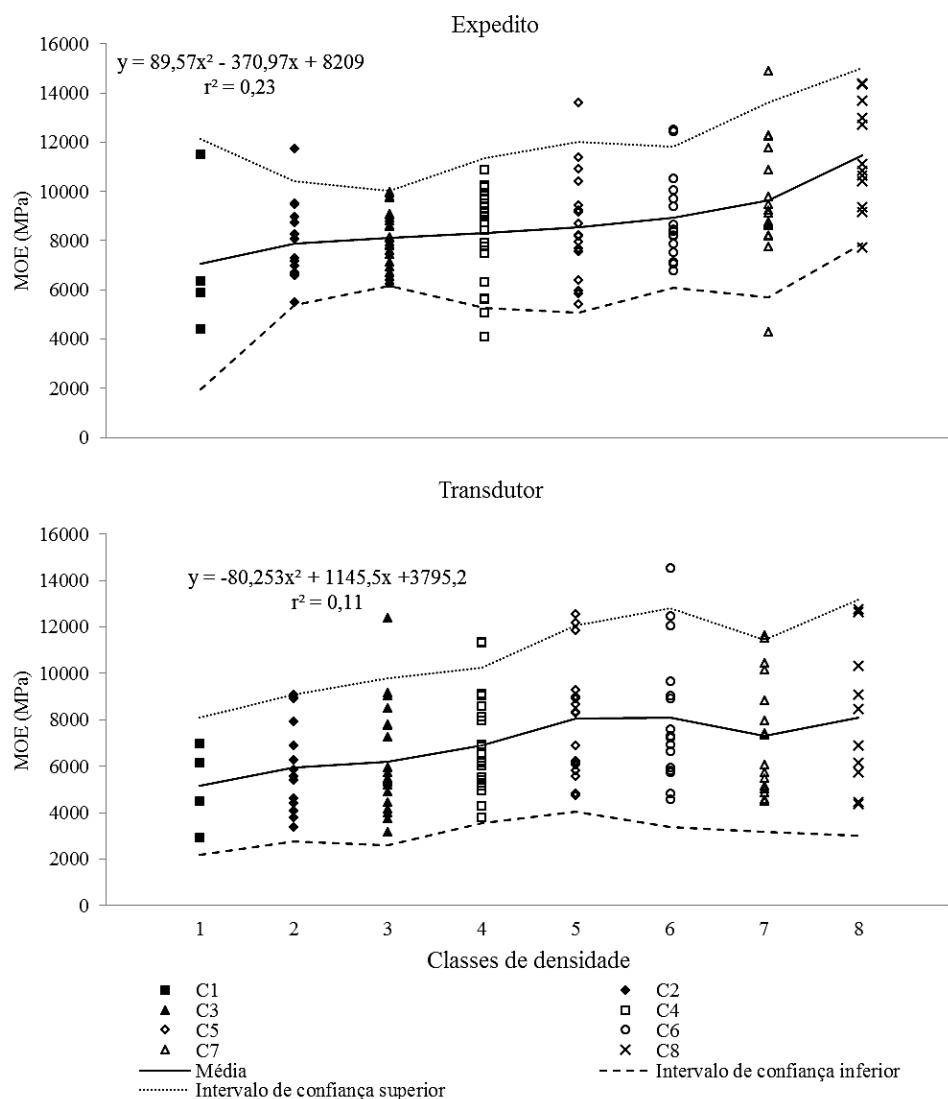
Comparando os valores médios do método expedito com o método por transdutor é possível notar que todas as vigas apresentam maior Ew pelo método expedito. Os erros relativos entre as vigas não superaram 26,21%. Indicando um aumento do Ew em vigas compostas por lamelas classificadas pelo método expedito.

Observa-se que em ambos os métodos houveram baixos coeficientes de variação, já que as vigas foram compostas por lamelas classificadas mecanicamente e dispostas pelo Ew de forma ordenada. A classificação e composição tornam o lote de vigas mais homogêneo, como

observado pelo erro padrão de 148,78 MPa no método expedito e de 80,00 MPa no método com transdutor. Isto indica a necessidade da classificação mecânica, também observado por Cunha; Matos (2010b). Já que apenas a classificação da densidade não é suficiente para diminuir a variação dos lotes, como visto na Tabela 1.

Na Figura 9 tem-se a relação entre o Ew e as diferentes classes de densidade em ambos os métodos, com seus respectivos intervalos de confiança.

Figura 9 - Relação entre EW obtidos pelo método visual (a) e pelo método com transdutor (b) com as classes de densidade aparente da madeira de paricá.



Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

A determinação do deslocamento à flexão de forma manual apresentou bons resultados ao ser comparado com o deslocamento por um transdutor. Dessa forma, a utilização do método

em pátios de empresa de produção de MLC artesanal deve ser aplicado, devido a grande variabilidade da madeira de paricá, aumentando a qualidade do elemento MLC.

Considerando o erro relativo médio de 24,36% entre o método expedito em relação ao método por transdutor de deslocamento, a equação da Figura 9(a) pode ser corrigida para  $y = 67,75x^2 - 280,60x + 6209$ . Deste modo, é possível obter-se para estas procedências e idades de paricá pesquisadas, um  $E_w$  aproximado dos valores como os determinados pelo transdutor de deslocamento, porém realizando o método expedito.

### 3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS DA CLASSIFICAÇÃO DE LAMELAS EM MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

Conclui-se, que devido a variabilidade de idades e sítios das árvores de paricá, possíveis de ocorrer num sistema fabril, é necessária a classificação das lamelas para a produção de elementos em MLC mais homogêneos.

A determinação do deslocamento à flexão de forma expedita apresentou bons resultados ao ser comparado com o transdutor. Para se utilizar o método expedito como determinação do  $E_w$  e a classificação das lamelas, recomenda-se empregar a  $y = 67,75x^2 - 280,60x + 6209$ , e assim obter valores mais próximos dos determinados pelo método com transdutor. Ressalta-se que tal expressão é relacionada às idades e sítios deste trabalho.

Dessa forma, a utilização do método expedito em pátios de empresa de produção de MLC artesanal de paricá poderá ser aplicada, aumentando a qualidade do elemento MLC.

Sugere-se que sejam estudados mais sítios e idades para esta e outras espécies de madeira. Deste modo, poderão ser estimadas curvas de correlação, entre o  $E_w$  e a densidade, mais forte e precisa para o método expedito.

**4 – CAPÍTULO II - MADEIRA LAMELADA COLADA DE PARICÁ  
(*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO  
OU CARBONO**

#### 4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MLC DE PARICÁ REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO OU CARBONO

A madeira é um dos materiais mais antigos utilizados pelo homem para construção. É versátil, de fácil obtenção, baixo consumo energético, tem bom isolamento acústico e térmico. Ela pode ser transformada em diversos produtos que utilizam desde sua forma bruta, até as fibras, e que quando combinados com adesivos podem formar uma grande variedade de produtos engenheirados de madeira. Esses produtos possuem grandes vantagens: como a alta resistência associada ao baixo peso específico, fácil trabalhabilidade e manuseio, ótima aparência estética e a obtenção sustentável fazendo da madeira um excelente material de construção.

Por ser um material heterogêneo, a madeira também possui desvantagens. Kliger et al. (2016) apontaram que as diferenças nas forças e rigidez podem ser causadas por defeitos naturais e variações nas condições de crescimento, tornando difícil a previsão do comportamento em elementos com diferentes cargas.

As variações naturais da madeira podem ser reduzidas ao utilizar produtos engenheirados como a Madeira Lamelada Colada - MLC (GLIŠOVIĆ; STEVANOVIĆ; TODOROVIĆ, 2015). De forma geral, a técnica de MLC permite que se criem elementos com grandes dimensões, disperse os defeitos no comprimento do elemento deixando o produto mais uniforme em toda a sua dimensão (JUVANDES; BARBOSA, 2012).

O paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby) é pertencente à família Leguminosae - Caesalpinoideae e pode ser considerado como uma árvore de grande porte, chegando até 40 m de altura e 100 cm de DAP (diâmetro à altura do peito, medido à 1,30 m do solo) na idade adulta (CARVALHO; VIÉGAS, 2004). A madeira é considerada de leve a moderadamente densa (0,25 a 0,51 g.cm<sup>-3</sup>) valores positivos para confecção de MLC (VIDAURRE, 2010; LOBÃO, 2011; SZÜCS, 2012; AJDINAJ; HABIPI, 2015). Sua textura é grossa, grã direita e irregular, de cor cerne creme a vermelhado e alburno creme-claro. Apresenta processamento fácil e recebe bom acabamento, mas possui baixa durabilidade natural segundo Souza; Carvalho; Ramos (2005).

As pesquisas com MLC de *Pinus* e *Eucalyptus* são mais aprofundadas e discutidas, haja vista que a produção industrial brasileira utiliza essas duas espécies. Contudo, a MLC com madeira de paricá está ganhando destaque no meio científico. Estudos avaliaram as

propriedades do paricá para utilização em uso estrutural e o seu emprego em vigas de MLC com diferentes adesivos (TEREZO; SZÜCS, 2010ab; ALMEIDA et al., 2013; TEREZO et al., 2015). Devido a sua baixa resistência natural ao ataque de agentes biodegradadores, foram realizados também trabalhos sobre o comportamento em peças tratadas para a produção de MLC de paricá (CAVALHEIRO, 2014; CÓRDOVA, 2015).

Embora a MLC de paricá ofereça significativa melhoria em relação à madeira serrada (TEREZO; SZÜCS, 2010), o deslocamento final continua sendo um fator limitante, além de possíveis defeitos em emendas dentadas e a fragilidade na zona tracionada do elemento (GLIŠOVIĆ, STEVANOVIĆ, PETROVIĆ, 2015).

Esses defeitos são mais prejudiciais na zona de tração do que na zona de compressão, uma vez que a tensão no local tende a desenvolver rachaduras podendo levar à ruptura. Essa deterioração na zona tracionada pode ser minimizada ao se adicionar elementos de reforço, resultando no fortalecimento da área e melhorando consideravelmente suas propriedades mecânicas (KHELIFA et al., 2015).

Os reforços podem ser feitos utilizando-se fibras sintéticas de vidro ou de carbono, dentre outras. Fibras de carbono são muito mais caras que as fibras de vidro, mas tem propriedades químicas, térmicas e mecânicas superiores (GLIŠOVIĆ, STEVANOVIĆ, PETROVIĆ, 2015). Os atuais valores de compra das fibras com mesma gramatura ( $200\text{ g.m}^{-2}$ ) e procedentes do mesmo fabricante são de U\$ 62,05/m<sup>2</sup> para carbono e U\$ 5,30/m<sup>2</sup> para vidro (REDELEASE, 2017).

Estudos têm utilizado reforços em madeiras, entre eles o reforço de elementos estruturais com fibras de aramida (QING; JIAN, 2011), fibras de vidro (ALHAYED; SVECOVA, 2012), fibras de carbono (JESUS; PINTO; MORAIS, 2012) e fibras naturais de sisal (MASCIA; MAYER; MORAES, 2014; BERTOLINE et al., 2015). Rosa García; Cobo Escamilla; González Garcia (2013) estudaram sistemas de vigas de *Pinus sylvestris* reforçadas com fibras de carbono e de basalto que originaram estruturas com maior rigidez e capacidade de carga do que em estruturas sem reforço.

Chew et al. (2016) analisando blocos de madeira reforçados com fibras de vidro entre a primeira e segunda lâmina e entre a terceira e a quarta lâmina obtiveram um aumento de aproximadamente 6% quando o reforço estava entre a primeira e segunda camada e de até 13% quando o reforço estava entre a terceira e quarta camada de madeira.

Estudando a *Hevea brasiliensis* em Madeira Lamelada Colada Reforçada - MLCR, Nadir et al. (2016) obtiveram acréscimos de resistência de 26% com fibra de vidro e de até 36% com fibra de carbono, sugerindo que mais pesquisas fossem realizadas para avaliar a capacidade do reforço em vigas de MLC com outras espécies e adesivos.

Outros trabalhos também relataram ganho na resistência ao acrescentar reforços com fibras em elementos de madeira, como GENTRY (2011) que comparou vigas de “*southern yellow pine*” de alta densidade sem reforço, com vigas de baixa densidade reforçadas no comprimento, confirmando que vigas de baixa densidade podem resistir como as vigas de madeiras de alta densidade. D’Ambrisi; Focacci; Luciano (2014) estudaram vigas antigas removidas de um prédio histórico em Pievi di Cadoree, restauradas com fibras de carbono e compararam com vigas novas sem o uso de reforço, obtendo resultados positivos para as restaurações. Raftery; Whelan (2014) que estudaram vigas de abeto com reforços em barras circulares de fibras de carbono obtiverem um aumento de até 13,9% na rigidez ao utilizar 1,4% de reforço na zona de tração.

Conhecendo-se os Ew das lamelas, o Ew da fibra e a posição de cada um desses elementos na composição final da viga MLC, é possível estimar o Ew final compatibilizado para todo o elemento estrutural, e assim estimar a flecha para uma carga conhecida. O Método da Homogeneização da Seção, como por exemplo, descrito por La Rovere (1998) para vigas MLC, consiste em estimar o Ew compatibilizado de forma analítica empregando-se expressões matemáticas. Desta maneira, pode-se prever a rigidez final de um elemento estrutural em MLC, sem a necessidade de ensaios laboratoriais destrutivos de vigas. A indústria de MLC poderá utilizar os valores de Ew das lamelas classificadas para então estimar o valor de Ew de cada viga produzida.

Trabalhos, avaliando o reforço em vigas, utilizam a resina Epóxi para colar as fibras à madeira. A utilização destas resinas, mais os adesivos estruturais comumente usados para a colagem das lamelas de madeira (resorcinol, uréia-formol, poliuretano, entre outras), para a fabricação de MLC torna-se oneroso para as empresas. Neste sentido, existe a necessidade de se avaliar o desempenho das fibras coladas com os adesivos estruturais já utilizados pela indústria.

Muitos estudos em elementos estruturais reforçados realizados no exterior empregam madeiras provenientes de florestas europeias (JESUS, PINTO, MORAIS, 2012; ROSA GARCÍA; CABO ESCAMILLA; GONZÁLEZ GARCIA; 2013; ANDRÉ; KLIGER;

OLSSON, 2013; GLIŠOVIĆ; STEVANOVIĆ; PETROVIĆ, 2015; GLIŠOVIĆ; STEVANOVIĆ; TODOROVIĆ, 2015). Essas florestas possuem grande homogeneidade das árvores e consequentemente madeiras com propriedades mais uniformes. Assim, estudos com espécies tropicais brasileiras são poucos desenvolvidos, devido à grande variabilidade. Até o presente trabalho não foram encontradas literaturas que avaliassem o reforço em MLC de paricá.

Deste modo, o objetivo principal é estudar o desempenho de vigas MLC com reforço de uma camada à flexão, usando reforço com uma camada de fibra de vidro e vigas com uma camada de fibra de carbono colados com adesivo a base de resorcinol de modo experimental e avaliar os resultados experimentais com o cálculo teórico.

## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS DE MLC DE PARICÁ REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO OU CARBONO

### **4.2.1 Amostragem**

A madeira de paricá utilizada era proveniente de florestas plantadas da região nordeste do Estado do Pará. As árvores tinham idades de 6, 10, 19 e 28 anos. As duas primeiras idades foram plantadas no Município de Aurora do Pará (latitude 2° 10' 27.5" S e longitude 47° 32' 42.0" W), e as duas últimas idades no Município de Tomé-Açu (latitude 2° 23' 42.7" S e longitude 48° 08' 43.4" W). O desdobramento das pranchas, secagem e armazenamento foram feitos conforme o item 3.2.1.

### **4.2.2 Determinação do teor de umidade e densidade**

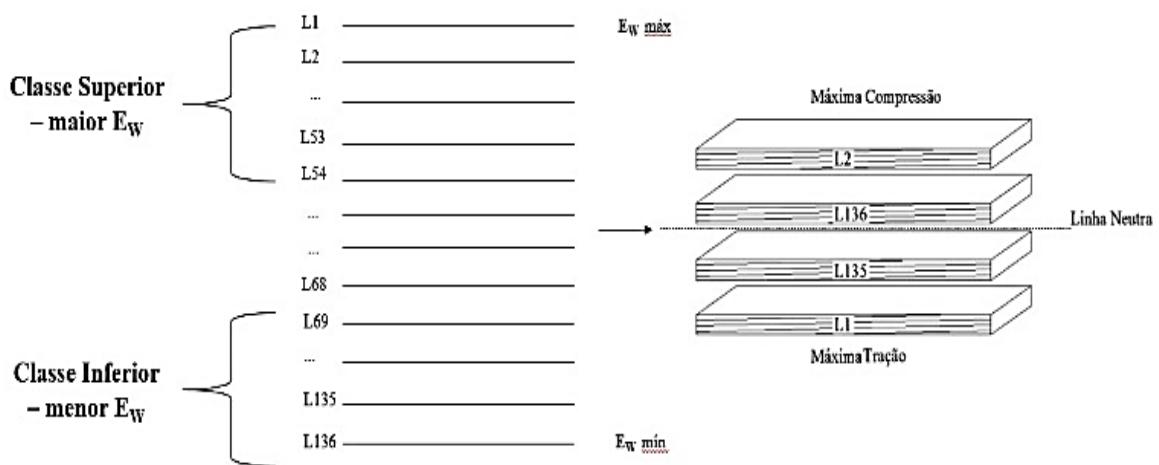
Os ensaios para determinar o teor de umidade e densidade do lote de paricá foram feitos de acordo com a Norma Brasileira NBR 7190-97, nos ensaios realizados foram utilizados 20 corpos de prova para o ensaio de umidade e 20 para o ensaio de densidade.

### **4.2.3 Confecção das vigas**

As lamelas foram cortadas com as dimensões 140 cm x 5,5 cm x 1,2 cm. A distribuição das lamelas foi feita de forma sistemática de acordo com o Ew (obtido pelo ensaio não-

destrutivo conforme premissas da ASTM D4761 (2002). Para tal, os  $E_w$  foram agrupados do maior para o menor valor. As lamelas de maior  $E_w$  foram posicionadas na camada externa da zona de máxima tração, a segunda lamela com maior  $E_w$  foi posicionada na parte extrema de máxima compressão, as lamelas de menor  $E_w$  foram posicionadas na parte central da viga. No total, cada viga foi composta por quatro lamelas (Figura 10).

Figura 10 - Distribuição das lamelas para montagem as vigas de MLC.

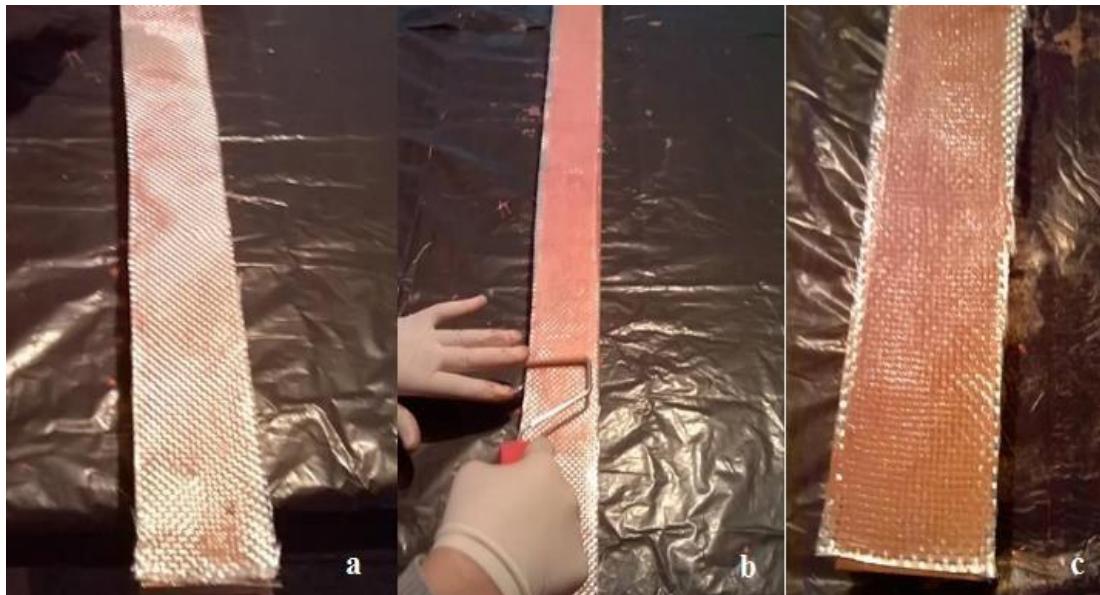


Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

Posteriormente, as lamelas foram aplinadas e passaram por um jato de ar para limpar possíveis resíduos, e então, coladas em até 24h após esse processo. O adesivo utilizado foi a base de resorcinol (RS 216 M), do fabricante Momentive, com gramatura de  $300 \text{ g.cm}^{-3}$  e 20 partes de endurecedor. A pressão de colagem aplicada foi entre 0,7 MPa a 1,4 MPa.

A fibra em forma de tecido foi posicionada na região tracionada da viga na parte inferior, após a colagem das lamelas. Para aplicação do tecido procedeu-se primeiramente a aplicação do adesivo na última lamela de madeira, posicionando em seguida o tecido de fibra de vidro (Figura 11a); em seguida, passou-se um rolo desaerador para evitar possíveis bolhas de ar e melhorar o contato entre madeira/adesivo/tecido (Figura 11b); e ao final, acima do tecido aplicou-se mais uma camada de adesivo, sendo realizado novamente o processo de desaeração (Figura 11c). O mesmo processo de colagem foi realizado para a fibra de carbono.

Figura 11 - Processo de colagem das fibras na viga MLC; posicionamento da fibra sobre a MLC (a), desaeração com rolo (b) e aspecto do tecido de fibra de vidro após a primeira desaeração (c)



Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

As vigas foram contidas lateralmente após a aplicação de adesivo para que não ocorresse deslizamento das lamelas uma em relação à outra. Posteriormente, foram prensadas a frio onde ficaram por 24 h. As vigas foram levadas para a sala de climatização onde ficaram em repouso por 7 dias para término da cura do adesivo. Após esse período as vigas foram aplainadas e destopadas ficando com dimensão final de 115 cm x 4,5 cm x 4,8 cm.

A espessura das fibras e suas porcentagens em relação a seção transversal foram de: 0,15 mm e 0,03% para a fibra de vidro  $110 \text{ g.cm}^{-2}$ ; 0,18 mm e 0,04% para a fibra de vidro  $200 \text{ g.cm}^{-2}$ ; 0,30 mm e 0,06% na fibra de vidro  $330 \text{ g.cm}^{-2}$ ; e 0,40 mm e 0,08% para a fibra de carbono  $200 \text{ g.cm}^{-2}$ .

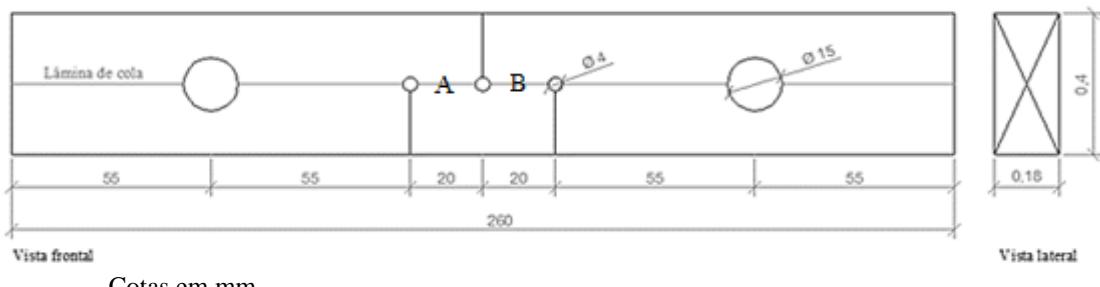
Os Módulos de Elasticidade das fibras foram estimados com base na literatura (FIORELLI, 2002) sendo fibra de vidro  $110 \text{ g.cm}^{-2}$  – 32.784 MPa, fibra de vidro  $200 \text{ g.cm}^{-2}$  – 59.607 MPa, fibra de vidro  $330 \text{ g.cm}^{-2}$  – 98.352 MPa, fibra de carbono  $200 \text{ g.cm}^{-2}$  – 182.857 MPa.

#### 4.2.4 Confecção dos corpos de prova

Para avaliar a resistência da linha de colagem, foram extraídos corpos de prova de cisalhamento de vigas MLCR (Figura 12). Para tanto, foi escolhida a Norma Francesa NF B 5-32 (1942), cuja as dimensões são mais apropriadas para este trabalho, em que a fibra de reforço

fica localizada na região central. Diferentemente do corpo de prova da NBR 7190 (1997), que fica no terço superior, dificultando assim sua extração da viga na proporção adequada. O corpo de prova da NF permite que a ruptura ocorra na região da linha de cola, ocasionando a ruptura na região A ou B do corpo de prova. Para a avaliação da tração normal à linha de colagem e da tração paralela da madeira maciça reforçada com fibras seguiram as especificações de dimensões conforme a NBR 7190/97.

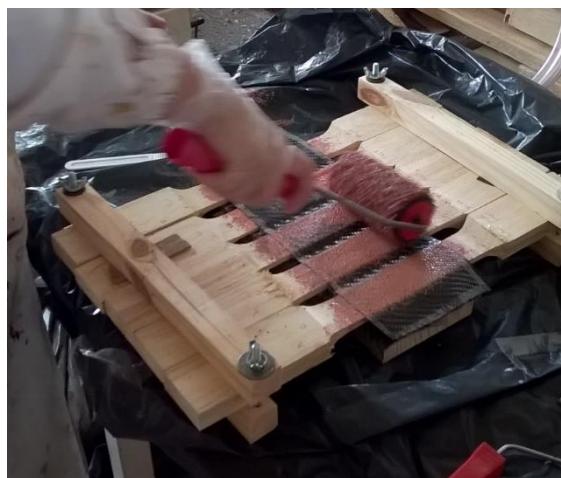
Figura 12 - Corpo de prova de cisalhamento na linha de cola pela Norma Francesa NF B 5-32.



Cotas em mm  
Fonte: Elaborada pela autora, 2016.

Os corpos de prova para avaliar a resistência a tração paralela às fibras em madeira foram confeccionados conforme a NBR 7190/97. As aplicações das fibras foram feitas na região central dos corpos de prova de tração paralela da madeira maciça. As fibras sintéticas foram cortadas com comprimentos de 10 cm (Figura 13) e coladas em ambos os lados do corpo de prova.

Figura 13- Aplicação de cola nas fibras sintéticas dos corpos de prova de tração paralela.



Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

#### 4.2.5 Ensaio de resistência à flexão

O ensaio seguiu as recomendações da Norma Brasileira de Estruturas em Madeira - NBR 7190 (1997). As vigas foram bi-apoiadas (um lado rotulado e outro engastado) no sentido de menor inércia da peça (*flatwise*). O deslocamento vertical foi medido por meio de transdutor de deslocamento, colocado no ponto de simetria da viga (Ponto M) e na altura da Linha Neutra (L.N), sua precisão de leitura é de 0,001 mm (Figura 14).

Figura 14 - Leitura do deslocamento no ponto de simetria da viga, em que (1) é a célula e carga, (2) é o transdutor de deslocamento posicionado no ponto de simetria e fixado na linha neutra (3).



Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

#### 4.2.6 Modos de ruptura

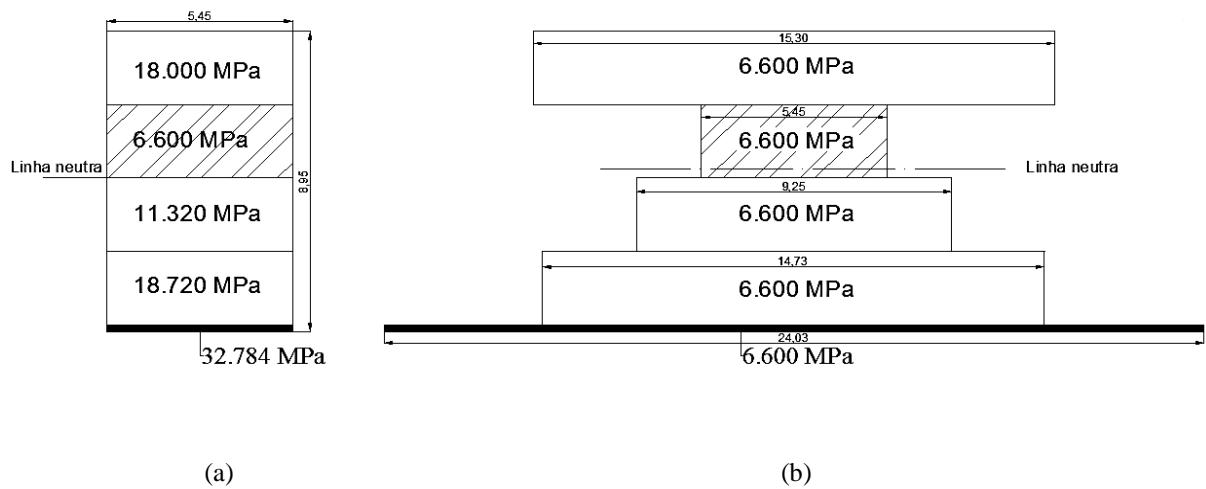
Os modos de ruptura avaliados nas vigas foram determinados conforme a comparação dos esforços por tensões axiais e de cisalhamento no ensaio de linha de cola. Deste modo, a ruptura foi determinada em vigas que apresentaram maiores tensões no ensaio de flexão em

relação as tensões do ensaio da linha de cola. Para complementar, as análises visuais nas vigas foram feitas para observar se ocorreu o rompimento do reforço.

#### 4.2.7 Método de homogeneização da seção

O Método de Homogeneização da Seção (MHS) consiste em substituir a seção transversal de uma peça de material heterogêneo em uma seção equivalente de material homogêneo determinando um  $E_w$  equivalente para toda a viga a partir dos  $E_w$  de cada lamela e da fibra, predizendo assim a flecha que poderá acontecer para uma determinada carga. A figura 15 exemplifica este método.

Figura 15 - Geometria e  $E_w$  dos elementos componentes da viga: a) Seção original; b) Seção transformada. Dimensões em cm.



Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

O cálculo da seção transformada seguiu o estudo realizado por LA ROVERE (1998) para vigas em MLC confeccionada em pinus, na seguinte sequência:

1º) Definição da largura das lâminas da seção transformada, escolhendo como base a lâmina com menor módulo de elasticidade conforme equação (3):

$$b^* = b \frac{E_i}{E_c} \quad (3)$$

Onde:

$b^*$  = nova base para a lâmina (cm);  $b$  = base da lâmina escolhida (cm);  $E_i = E_w$  da lâmina (MPa);  $E_c = E_w$  da lâmina escolhida (MPa).

2º) Determinação da nova área para a lâmina e posteriormente para a viga, equação (4):

$$A^* = b_i^* \cdot t \quad (4)$$

Onde:

$A^*$  = nova área para a lâmina ( $\text{cm}^2$ );  $b_i^*$  = nova base da lâmina determinada (cm);  $t$  = altura da lâmina (cm)

3º) Devido à geometria alterada da viga, faz necessário redefinir o centróide da seção transformada, por onde passa a linha neutra, equação (5):

$$y_{ln} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i^* \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n A_i^*} \quad (5)$$

Onde:

$d_i$  = distância entre o centro da lâmina  $i$  e um eixo horizontal arbitrário e  $y_{ln}$  a distância entre o centróide da seção e este eixo arbitrário.

4º) Definição do momento de Inércia ( $I^*$ ) de uma área composta, equação (6):

$$I^* = I + A^* \cdot d^2 \quad (6)$$

Onde:

$I^*$  = momento de Inércia de uma área composta ( $\text{cm}^4$ );  $I$  = momento de inércia de cada lâmina ( $\text{cm}^4$ );  $A^*$  = nova área da lâmina ( $\text{cm}^2$ );  $d$  = distância entre a linha neutra da peça e a linha neutra da lâmina.

5º) Definição do momento estático, equação (7):

$$Q_x^* = \sum A_i^* \cdot y_i \quad (7)$$

Onde:

$Q_x^*$  = momento estático;  $y_i$  = distância entre o centro da lâmina e o centro de gravidade da peça.

7º) Definição do fator de forma ( $\chi^*$ ) para a nova peça, equação (8):

$$\chi^* = \frac{A^*}{(I^*)^2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{b_i^*} \int (Q^*)^2 dy \quad (8)$$

Assim como no trabalho de La Rovere (1998), foi adotado a Regra de Simpson para avaliar numericamente a integral contida na equação (9):

$$\int_{lâmina} (Q^*)^2 dy = \frac{t}{6} [Q^{*2}(y_s) + 4Q^{*2}(y_c) + Q^{*2}(i)] \quad (9)$$

Onde  $y_s$ ,  $y_c$  e  $y_i$  são coordenadas  $y$  superior, central e inferior das lâminas, respectivamente.

8º) Definição do módulo de cisalhamento ( $G_c$ ), equação (10):

$$G_c = \frac{E_c}{20} \quad (10)$$

Onde:

$G_c$  = módulo de cisalhamento;  $E_c$  =  $E_w$  da lâmina escolhida (MPa).

9º) Cálculo da flecha máxima, equação (11):

$$\delta = \frac{Pa}{48E_c I^*} (3l^2 - 4a) + \frac{Pa\chi^*}{2G_c A^*} \quad (11)$$

Onde:

$\delta$  = flecha máxima (mm);  $P$  = carga total - estimada (kN)

#### 4.2.8 Tratamento estatístico

As vigas e corpos de prova foram avaliados pela resistência média dos tratamentos. Para tal, foram calculadas as tensões axiais e de cisalhamento (médias e características), e módulo de elasticidade. Todos os valores foram corrigidos pelo teor de umidade. A determinação dos valores de resistência de ruptura e características, para as vigas e para os corpos de prova de caracterização, seguiram os padrões sugeridos pela atual Norma Brasileira, NBR 7190/97.

O delineamento foi realizado com 6 vigas e 12 corpos de prova para cada ensaio de resistência mecânica (tração paralela, tração normal na linha de cola e cisalhamento na linha de

cola) por tratamento, totalizando 5 (T1 – testemunha - sem reforço de Fibras), T2 (reforço com fibra de vidro e gramatura de  $110 \text{ g.m}^{-2}$ ), T3 (reforço com fibra de vidro e gramatura de  $200 \text{ g.m}^{-2}$ ), T4 (reforço com fibra de vidro e gramatura de  $330 \text{ g.m}^{-2}$ ), T5 (reforço com fibra de carbono e gramatura  $200 \text{ g.m}^{-2}$ ).

A análise estatística foi feita para o delineamento inteiramente casualizado. Foram efetuados os seguintes testes: teste de Shapiro-Wilk para verificar se os dados apresentaram tendência a uma distribuição normal, teste de Bartlett para avaliar a homogeneidade da variância e comparação de média pelo teste de Tukey. Para a comparação dos cálculos analítico e experimental, os  $E_w$  foram estimados a 50% da capacidade de carga individual das vigas, os mesmos foram transformados por Box-Cox, já que os dados não apresentaram tendência homogênea. Todos os testes efetuados foram com 95% de probabilidade.

#### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES DE MLC DE PARICÁ REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO OU CARBONO

##### 4.3.1 Propriedades físicas

O teor de umidade médio do lote de paricá foi 13,87%, esse valor indica que as peças estão com a umidade necessária para a confecção das vigas. Segundo Szücs (1992b) 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 dos lotes de paricá foi de  $0,34 \text{ g.cm}^{-3}$  e a aparente de  $0,41 \text{ g.cm}^{-3}$ . Almeida et al. (2013), obteve valores médios de  $0,37 \text{ g.cm}^{-3}$  para a densidade aparente ao analisar 30 corpos de prova de paricá com 10 anos de idade. Indicando que o paricá deste trabalho apresenta a densidade aparente dentro do intervalo de  $0,4$  a  $0,75 \text{ g.cm}^{-3}$  necessárias para ser utilizado em elementos MLC (SZÜCS, 1992a; TEREZO; SZÜCS, 2010; AJDINAJ; HABIPI, 2015).

##### 4.3.2 Classificação das lamelas e homogeneização dos $E_w$

A Tabela 4 mostra os valores de  $E_w$  obtidos das lamelas, bem como a sua classificação e posição nas vigas conforme cada tratamento (Anexo 4). Pode-se observar um  $E_w$  médio de 11.311,70 MPa, sendo que a lamela com menor valor foi de 7.738,61 MPa e a com maior valor

de 19.855,20 MPa. Resultado similar ao obtido por Córdova (2015) que avaliou o mesmo lote de madeira de paricá e obteve uma variação de 7.373,93 a 18.718,46 MPa no Ew das lamelas.

Tabela 4 - Módulo de elasticidade estimado pelo MHS de vigas nos tratamentos com e sem reforço de fibras de vidro ou carbono, com a comparação estatística pelo teste de média de Tukey.

| <b>Vigas</b>       | <b>Ew Médio (MPa)</b> |                    |                     |                     |                    |
|--------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
|                    | <b>T1</b>             | <b>T2</b>          | <b>T3</b>           | <b>T4</b>           | <b>T5</b>          |
| <b>V1</b>          | 12.924,34*            | 12.2499,25*        | 13.991,99*          | 14.145,79*          | 20.938,14*         |
| <b>V2</b>          | 10.155,44*            | 11.977,29*         | 13.790,63*          | 16.240,05*          | 21.009,64*         |
| <b>V3</b>          | 11.853,34*            | 11.952,52*         | 13.779,66*          | 16.534,01*          | 21.404,22*         |
| <b>V4</b>          | 11.632,25*            | 11.900,94*         | 13.800,85*          | 16.320,94*          | 21.484,69*         |
| <b>V5</b>          | 11.746,12*            | 11.834,81*         | 13.758,09*          | 16.665,38*          | 21.964,24 *        |
| <b>V6</b>          | 11.574,70*            | 11.849,01*         | 13.840,81*          | 16.645,62*          | 22.090,66*         |
| <b>Média Geral</b> | <b>11.647,70 c</b>    | <b>11.960,64 c</b> | <b>13.827,00 bc</b> | <b>16.091,96 ab</b> | <b>21.481,93 a</b> |

\*Módulo de elasticidade da viga homogeneizado pelo método MHS.

É possível observar que há diferenças estatísticas entre os Ew das fibras utilizadas em cada tratamento, ou seja, o uso de fibras com gramaturas distintas possibilita diferentes aumentos do Ew. Observa-se que os valores de Ew compatibilizados pelo MHS no tratamento T5 (média = 21.627,66 MPa) é significativamente maior do que os demais Ew com exceção do tratamento T4. Isto se deu devido ao elevado valor de Ew da fibra de carbono (182.857,00 MPa) descrito por Fiorelli (2002), em relação aos valores médios das lamelas (11.311,70 MPa). Verificou-se também uma diferença significativa entre o tratamento T4 (média = 16.194 MPa) em relação aos tratamentos T1 (média = 11.774,14 MPa) e T2 (média = 12.046,91 MPa).

#### 4.3.3 Vigas de MLC reforçadas com fibras sintéticas

Na tabela 5 são apresentados os valores médios e característicos das resistências e módulo de elasticidade em vigas de paricá com e sem reforço (Anexos 5,6,7,8, e 9). Com o

teste de médias foi possível observar que não houveram diferenças estatísticas entre os tratamentos para as variáveis.

Tabela 5 - Valores médios e característicos das tensões axiais e de cisalhamento e EW obtidos do ensaio de flexão em vigas de MLC sem e com reforço de fibras sintéticas.

| <b>Tratamento</b> | <b>Tensões (MPa)</b> |                     | <b>Ew</b> | <b>Ew %</b> |
|-------------------|----------------------|---------------------|-----------|-------------|
|                   | <b>Axiais</b>        | <b>Cisalhamento</b> | (MPa)     | (MPa)       |
| <b>T1</b>         | Média                | 57,99 a             | 1,44 a    | 11.455,29 a |
|                   | C.V (%)              | 13,37               | 13,55     | 9,40        |
|                   | f <sub>k,12%</sub>   | 51,96               | 1,39      |             |
| <b>T2</b>         | Média                | 62,26 a             | 1,48 a    | 11.422,13 a |
|                   | C.V (%)              | 21,03               | 21,03     | 11,59       |
|                   | f <sub>k,12%</sub>   | 59,40               | 1,27      |             |
| <b>T3</b>         | Média                | 58,64 a             | 1,40 a    | 13.321,31 a |
|                   | C.V (%)              | 13,66               | 13,66     | 18,24       |
|                   | f <sub>k,12%</sub>   | 53,45               | 1,27      |             |
| <b>T4</b>         | Média                | 64,55 a             | 1,54 a    | 12.660,02 a |
|                   | C.V (%)              | 9,69                | 9,69      | 9,14        |
|                   | f <sub>k,12%</sub>   | 61,09               | 1,45      |             |
| <b>T5</b>         | Média                | 59,76 a             | 1,42 a    | 12.142,64 a |
|                   | C.V (%)              | 25,53               | 25,53     | 14,93       |
|                   | f <sub>k</sub>       | 52,16               | 1,24      |             |

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de significância.

C.V (%) = coeficiente de variação. f<sub>k,12%</sub> = resistência característica corrigida para o teor de umidade de 12%.

A resistência axial característica a flexão foi de 51,96 MPa (T1), 53,45 MPa (T3); 59,40 MPa (T2), 52,16 MPa (T5) e 61,09 MPa (T4). Nota-se que o uso do adesivo a base de resorcinol, apresentou resultados maiores para todos os tratamentos com reforços com fibra de vidro. Contudo, quando comparadas as resistências axiais, todos os reforços apresentaram médias superiores aos obtidos por Terezo; Szücs (2010) que tiveram resistência axial característica de 33,04 MPa para vigas coladas com o mesmo adesivo.

Estudando vigas de MLC de *Eucalyptus* – Lyptus, Miotto; Dias (2009) obtiveram Ew médio de 20.433 MPa. Ao avaliarem vigas de MLC com *Pinus taeda*, utilizando a classificação e ordenação das lâminas nas partes superiores e inferiores, Cunha; Matos (2011) obtiveram Ew de 7.897 MPa. Avaliando a madeira serrada de três espécies de *Eucalyptus*, Rodrigues (2002) obteve Ew médios de 19.847 MPa para o *E. grandis*; 19.299 MPa no *E. saligna* e 21.850 para o *E. citriodora*. Ao estudar vigas de MLC compostas por lamelas de *Pinus* spp., classificadas pelo módulo de elasticidade e distribuídas na viga de forma sistemática Andricheto; Szücz

(2006) obtiveram Ew de 12.449 MPa em vigas com ¼ das lâminas de maior qualidade nas camadas externas das vigas. Indicando que vigas de paricá reforçadas com fibras (T3 - 14.068,63 MPa; T5-12.823,84MPa e T4-13.370,25 MPa) apresentaram Ew superior ao *Pinus*, com exceção do reforço T2-12.062,91MPa, porém, todos os reforços ainda são inferiores em relação as vigas de *Eucalyptus*.

Verifica-se ainda que a fibra de carbono (T5 - 59,76 MPa) apenas apresentou resistência axial maior em relação à fibra de vidro com gramatura de 200g.cm<sup>-2</sup>. Porém, esse valor foi superior ao obtido por Rosa García; Cobo Escamilla; González García (2013) que ao estudarem vigas de *Pinus sylvestris* classificadas como C-18 pela EN-338 e reforçadas com fibra de carbono com 210 g.m<sup>-2</sup> e resina epóxi, obtiveram tensão máxima de 42 MPa.

Observou-se que as resistências axiais características tiveram um incremento positivo ao aumentar a gramatura das fibras de vidro. Mas não foram observadas aumento crescente do Ew em relação às gramaturas das fibras de vidro, porém os resultados foram superiores a Gentry (2011) que estudou vigas de *Pinus* com baixa densidade e reforçadas com fibra de vidro na zona de tração e obteve Ew médio de 9.350 MPa. Avaliando vigas rompidas e posteriormente restauradas com fibra de carbono D'Ambrisí; Focacci; Luciano (2014) encontraram Ew de 11.356 MPa, indicando que mesmo o T2 (12.062,91 MPa) apresentou rigidez compatível às médias observadas na literatura.

Na Tabela 6 são apresentadas o aumento de resistência axial, de cisalhamento e Ew dos tratamentos reforçados em relação a testemunha.

Tabela 6 - Incremento em porcentagem de resistências e EW dos tratamentos com vigas reforçadas com fibras sintéticas comparados com vigas não reforçadas.

| Tratamento | Resistência característica (MPa) |                                  | Ew % (MPa)<br>(Incremento - %) |
|------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
|            | Axial<br>(Incremento - %)        | Cisalhamento<br>(Incremento - %) |                                |
|            |                                  |                                  |                                |
| <b>T1</b>  | 51,96 (-)                        | 1,39 (-)                         | 12.097,93 (-)                  |
| <b>T2</b>  | 59,40 (14,32)                    | 1,41 (1,44)                      | 12.062,91 (-0,29)              |
| <b>T3</b>  | 53,45 (2,87)                     | 1,27 (-8,63)                     | 14.068,63 (16,29)              |
| <b>T4</b>  | 61,09 (17,57)                    | 1,45 (4,32)                      | 13.370,25 (10,52)              |
| <b>T5</b>  | 52,16 (0,38)                     | 1,24 (-10,79)                    | 12.823,84 (6,00)               |

Comparando as vigas reforçadas com vigas sem reforço, os maiores incrementos na resistência característica das resistências axiais foram para o T4 (axial 17,57%; cisalhamento

de 4,32%), seguida pelo T2 (axial 14,32%; cisalhamento de 1,44%) e T3 (axial 2,87%). Contudo, nota-se que o T5 ocorreu um decréscimo na resistência característica ao cisalhamento. Este fenômeno não é observado em literatura quando utilizada a resina epóxi e também não foram encontradas referências para o uso de adesivo resorcinólico. Acredita-se que esta perda de resistência se deu devido a ruptura em lamelas com resistência inferior aos dos demais tratamentos, posto que é possível haver uma concentração de tensões maiores na lamela com reforço, principalmente para o reforço com fibra de carbono.

Ao comparar o tratamento com menor Ew (T2) com o Ew das vigas de MLC de *Pinus* (CUNHA; MATOS, 2011), tem-se um incremento de 52,75%. Em relação ao T3, tratamento com maior Ew de todos os reforços com fibras (16,29% a mais do que em vigas sem reforço), apresenta 68,85% da rigidez total de vigas de *Eucalyptus* – Lyptus (MIOTTO; DIAS, 2009). Embora, exista um incremento da resistência em vigas de paricá reforçadas com fibras, esta não é suficiente para se equiparar a vigas de *Eucalyptus*. Contudo, o uso do adesivo a base de resorcina não prejudicou os resultados para as resistências ao ensaio de flexão e rigidez.

#### 4.3.4 Resistência da linha de cola

Os resultados para as resistências a tração e de cisalhamento na linha de cola (Anexo 10, 11 e 12) e no compósito linha de cola + fibras sintéticas podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Resistência da linha de cola para os ensaios de tração paralela e normal às fibras, e cisalhamento.

| Propriedades           | Tratamento                     |         |         |          |         |
|------------------------|--------------------------------|---------|---------|----------|---------|
|                        | T1                             | T2      | T3      | T4       | T5      |
| <b>Tração paralela</b> | <b>Média</b>                   | 36,33 a | 44,69 a | 39,15 a  | 43,76 a |
|                        | <b>C.V (%)</b>                 | 30,64   | 28,97   | 35,40    | 21,12   |
|                        | <b>F<sub>t0,k</sub> (12%)</b>  | 25,81   | 34,02   | 32,37    | 32,40   |
| <b>Tração normal</b>   | <b>Média</b>                   | 1,87 ab | 1,22 c  | 1,64 abc | 1,37 bc |
|                        | <b>C.V (%)</b>                 | 22,59   | 45,07   | 24,83    | 34,83   |
|                        | <b>F<sub>t90,k</sub> (12%)</b> | 1,45    | 0,85    | 1,26     | 0,81    |
| <b>Cisalhamento</b>    | <b>Média</b>                   | 1,85 ab | 1,53 b  | 1,92 ab  | 2,00 ab |
|                        | <b>C.V (%)</b>                 | 24,05   | 21,64   | 29,45    | 15,54   |
|                        | <b>F<sub>v0,k</sub> (12%)</b>  | 1,59    | 1,21    | 1,40     | 1,68    |

C.V – Coeficiente de variação (%); F<sub>t0,k</sub> – resistência característica à tração paralela às fibras; F<sub>t90,k</sub> – resistência característica a tração normal às fibras; F<sub>v0,k</sub> – resistência característica ao cisalhamento da linha de cola.

No ensaio de tração paralela não houveram diferenças estatísticas entre os tratamentos. A similaridade entre médias dos tratamentos pode ser devido a ruptura ter ocorrido acima do reforço, ou seja, na madeira, permanecendo o reforço intacto.

Os valores foram inferiores a resistência a tração em *Eucalyptus grandis* conforme Lobão et al. (2004) que encontram média de 70,2 MPa. Observa-se que a maior resistência característica à tração foi no tratamento T2 com 34,02 MPa, seguido pelo T4 com 32,40 MPa, por T3 com 26,40 MPa e T5 com resistência de 25,73 MPa. Resultados inferiores aos obtidos por Terezo (2010) que avaliou o mesmo lote de paricá e teve média de 46,55 MPa.

Nos ensaios de tração normal e cisalhamento da linha de cola ocorreram diferenças estatísticas. O tratamento T2 apresentou as menores médias (1,22 e 1,53 MPa, respectivamente) e T5 as maiores médias (1,97 e 2,07 MPa, respectivamente). Deste modo, analisando a resistência a tração na linha de cola, o uso de fibras de vidro com gramatura 110 g.cm<sup>-2</sup> para reforço não seria viável, uma vez que os valores característicos foram estatisticamente inferiores ao da madeira sem reforço. Este comportamento pôde ter ocorrido devido à baixa porcentagem de fibras de vidro (0,03%), sendo insuficiente para aumentar a resistência à tração normal em relação a MLC sem reforço.

As médias da resistência a tração na linha de cola de todos os tratamentos foram inferiores a Terezo; Szücs (2010) que obtiveram um valor de 3,47 MPa. Isto se deve ao fato de que os pesquisadores utilizaram somente madeiras de árvores adultas (19 e 28 anos).

Os valores característicos de cisalhamento foram todos inferiores a Cavalheiro (2014) que obteve 3,4 MPa e Terezo; Szücs (2010) com 2,02 MPa. A diferença pode ter ocorrido devido à idade (12 anos) da madeira utilizada por Cavalheiro et al. (2016) e procedência do material.

Os baixos valores de resistência podem ser devido a trama do tecido das fibras ser bidirecional, podendo esta dificultar a impregnação do adesivo e consequentemente diminuir a capacidade de resistência.

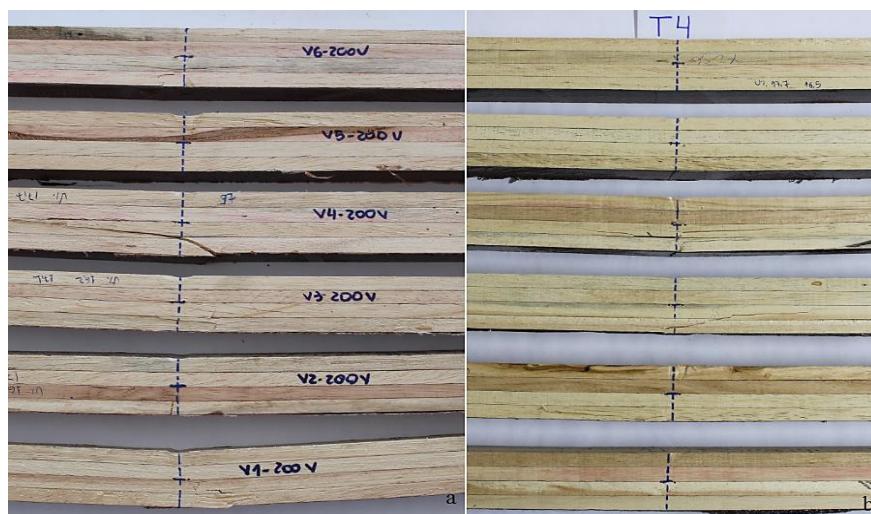
#### **4.3.5 Modos de ruptura**

Comparando-se os valores de cisalhamento da Tabela 4 com os valores característicos de cisalhamento na linha de cola da Tabela 6 foi possível averiguar quais as resistências que ocasionaram a ruptura das vigas. Observa-se que as vigas não romperam por tensões de

cisalhamento, uma vez que as mesmas tiveram os valores de ruptura abaixo do valor característico de resistência ao cisalhamento na linha de cola. Podendo-se afirmar que o uso de adesivo resorcinol para a colagem das fibras sintéticas teve desempenho satisfatório.

As tensões axiais das vigas ensaiadas em todos os tratamentos foram comparadas com Terezo (2010) que estudou o mesmo lote de madeira serrada de paricá e obteve resistência características a compressão de 21,61 MPa e a tração de 46,55 MPa. Indicando que apenas os tratamentos T2 e T5 romperam por tensões de compressão (Figura 16).

Figura 16 - Vigas do tratamento T3 rompidas por tensões de tração (a) e vigas do tratamento T5 rompidas por tensões de compressão (b).



Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

Foi observado que a ruptura das vigas reforçadas teve a primeira fissura na região de madeira sólida tracionada. O compósito de fibra + adesivo + madeira só fraturou após ocorrer o colapso na madeira. O mesmo comportamento foi averiguado por Khelifa et al. (2015) e explicado por Rosa García; Cobo Escamilla; González Garcia (2013), que a ruptura das vigas reforçadas em geral ocorre por tração, e a ruptura na área tracionada ocorre primeiro devido à falha da madeira quando esta atinge a deformação final pela força de tração.

#### 4.3.6 Cálculo teórico para $E_w$ e flecha

Na Tabela 8 estão apresentadas a deformação ( $\delta_{exp.}$ ) obtida pelo ensaio experimental de flexão estática em vigas reforçadas com fibras sintéticas e a deformação calculada ( $\delta_{teo.}$ ) pelo método MHS (a 50% da carga total).

Tabela 8 - Diferenças de deformação entre o cálculo teórico e o experimental em vigas de MLC de paricá com e sem reforço de fibra de vidro ou carbono.

| Tratamento | Viga | $\delta$ (teo.)<br>(cm) | $\delta$ (exp.)<br>(cm) | Dif.<br>Abs<br>(cm) | Dif. Rel.<br>(%) | Média |
|------------|------|-------------------------|-------------------------|---------------------|------------------|-------|
| <b>T1</b>  | V1   | 0,81                    | 0,99                    | 0,18                | 18,37            |       |
|            | V2   | 1,18                    | 1,11                    | -0,07               | -6,64            |       |
|            | V3   | 1,04                    | 0,97                    | -0,07               | -7,05            |       |
|            | V4   | 0,95                    | 0,97                    | 0,03                | 2,84             | -2,79 |
|            | V5   | 0,66                    | 0,63                    | -0,04               | -5,99            |       |
|            | V6   | 0,88                    | 0,74                    | -0,14               | -18,24           |       |
| <b>T2</b>  | V1   | 0,92                    | 0,92                    | 0,00                | 0,00             |       |
|            | V2   | 0,92                    | 0,95                    | 0,03                | 2,76             |       |
|            | V3   | 0,59                    | 0,68                    | 0,09                | 13,38            |       |
|            | V4   | 0,88                    | 0,93                    | 0,05                | 5,37             | 0,12  |
|            | V5   | 1,04                    | 0,95                    | -0,09               | -9,22            |       |
|            | V6   | 0,98                    | 0,88                    | -0,10               | -11,59           |       |
| <b>T3</b>  | V1   | 0,84                    | 0,82                    | -0,02               | -1,84            |       |
|            | V2   | 0,59                    | 0,49                    | -0,11               | -21,82           |       |
|            | V3   | 0,68                    | 0,78                    | 0,10                | 13,36            |       |
|            | V4   | 0,71                    | 0,97                    | 0,27                | 27,43            | 3,30  |
|            | V5   | 0,87                    | 0,81                    | -0,06               | -7,07            |       |
|            | V6   | 0,81                    | 0,90                    | 0,09                | 9,72             |       |
| <b>T4</b>  | V1   | 0,70                    | 0,73                    | 0,03                | 4,03             |       |
|            | V2   | 0,70                    | 0,78                    | 0,07                | 9,40             |       |
|            | V3   | 0,63                    | 0,91                    | 0,28                | 31,05            |       |
|            | V4   | 0,75                    | 0,98                    | 0,23                | 23,37            | 16,95 |
|            | V5   | 0,60                    | 0,75                    | 0,16                | 20,64            |       |
|            | V6   | 0,73                    | 0,84                    | 0,11                | 13,18            |       |
| <b>T5</b>  | V1   | 0,29                    | 0,52                    | 0,24                | 45,29            |       |
|            | V2   | 0,48                    | 0,81                    | 0,34                | 41,42            |       |
|            | V3   | 0,46                    | 0,91                    | 0,45                | 49,96            |       |
|            | V4   | 0,60                    | 0,94                    | 0,34                | 36,17            | 40,23 |
|            | V5   | 0,53                    | 0,83                    | 0,30                | 36,01            |       |
|            | V6   | 0,55                    | 0,81                    | 0,26                | 32,54            |       |

$\delta$  (teo.) = Deformação à 50% da carga total teórica.  $\delta$  (exp.)= Deformação à 50% da carga total experimental. Dif. Abs= Diferença absoluta da deformação. Dif. Rel.= Erro relativo.

Nas vigas de MLC sem reforço o cálculo estima um deslocamento em média levemente superior ao observado experimentalmente, com diferença relativa de -2,79%. Para as vigas reforçadas o cálculo prevê um deslocamento inferior ao deslocamento real em vigas reforçadas. Observa-se que em vigas do tratamento T3 houve diferença relativa média de 3,30%; 0,12% T2; e 16,95% T4. Devido ao alto E<sub>w</sub> da fibra de carbono, no tratamento T5, a diferença média entre o deslocamento teórico e experimental foi de 40,23%. Deste modo, pode-se observar que ao aumentar a gramatura da fibra e consequentemente seu E<sub>w</sub>, o cálculo teórico prevê um menor deslocamento, devido ao alto E<sub>w</sub> das fibras sintéticas, já que este é inversamente proporcional ao deslocamento.

Comparando os E<sub>w</sub> pelo teste de médias, observa-se na Tabela 9 que foram encontradas diferenças significativas entre o cálculo teórico e o experimental.

Tabela 9 - Comparação dos E<sub>w</sub> médios calculados pelo ensaio à flexão estática (experimental) e por cálculo teórico - MHS.

|            | E <sub>w</sub> (MPa) |              |
|------------|----------------------|--------------|
| Tratamento | Analítico            | Experimental |
| <b>T1</b>  | 11.774,14 a          | 11.917,70 a  |
| <b>T2</b>  | 12.046,91 a          | 11.938,97 a  |
| <b>T3</b>  | 13.921,88 a          | 13.371,72 a  |
| <b>T4</b>  | 16.194,90 a          | 13.213,11 a  |
| <b>T5</b>  | 21.627,66 a          | 12.857,40 b  |

Médias não diferem entre linhas a 5% de significância pelo teste de Tukey

Deste modo, nota-se que a diferença entre o E<sub>w</sub> no tratamento de vigas reforçadas com carbono foi diferente, provavelmente devido à alta rigidez das fibras segundo a literatura (FIORELLI, 2005; MIOTTO; DIAS, 2015). Uma vez que o método leva em conta a rigidez do material aplicado.

Embora não seja um aumento significativo estatisticamente, as vigas em MLC reforçadas apresentaram médias superiores às sem reforço. Notou-se que a fibra de carbono não teve resultados superiores às fibras de vidro ao serem coladas com adesivo a base de resorcinol em testes de flexão.

#### 4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS DE MLC DE PARICÁ REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO OU CARBONO

Analisando-se qualitativamente os valores de resistência característica de flexão e  $E_w$ , obteve-se os melhores percentuais de incremento para os tratamentos T4 (17,57% e 10,52%, respectivamente) e T3 (2,87% e 16,29%, respectivamente). O reforço do tratamento T2 apresentou aumento de 14,32% na resistência a tração, mas não forma observados incrementos no  $E_w$ . Revelando um melhor desempenho para o uso de fibras de vidro com gramatura acima de 200 g.m<sup>-2</sup>.

A análise da ruptura indicou que as vigas não romperam por cisalhamento, assim, o uso do adesivo a base de resorcinol apresenta resultados satisfatórios para a utilização nos reforços em vigas de MLC com fibras de vidro ou fibras de carbono.

O uso do cálculo teórico indicou deformações maiores que o observado experimentalmente com estimativa de 40,63% em vigas reforçadas com carbono e 17,48% no tratamento T4. Estes valores superiores se devem ao fato de que as referidas fibras possuem um elevado valor de  $E_w$  (182.857 MPa e 98.352 MPa, respectivamente) em relação à madeira de paricá (11.311,70 MPa).

Recomenda-se maiores estudos relativos ao número de camadas de fibras e sua relação com a espessura e densidade das lamelas, seja para esta espécie, como para outras em potencial para uso em MLC. Ressalta-se também a necessidade de pesquisas sobre modelagem da concentração de tensões na região de interação entre fibra e madeira.

## 5. CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

Para a avaliação dos métodos não destrutivos com objetivo de se classificar e ordenar as lamelas para produção de MLC de paricá, conclui-se: o método visual de determinação do Ew e classificação das lamelas diferenciou-se do método por transdutor de deslocamento, superestimando os valores em até 24,36% em média. Neste sentido, recomenda-se uma classificação das lamelas, não só pelo Ew, mas também pela sua densidade. Sendo que para as idades e sítios pesquisados pode ser empregada a seguinte equação ( $y = 67,75x^2 - 280,60x + 6209$ ; sendo  $x$  = densidade) para a determinação do Ew com valores aproximados dos determinados com transdutores de deslocamento.

Em relação a resistência à flexão de vigas em MLC de paricá sob diferentes tipos de reforços com fibras sintéticas conclui-se que houve um incremento de resistência à flexão na ordem de 17,57% para vigas reforçadas com fibra de vidro com gramatura de  $330\text{ g.cm}^{-2}$ . Neste caso, em termos qualitativos e percentuais, a interação adesivo + madeira + fibra de vidro resultaram em desempenho mais satisfatório do que a interação com a fibra de carbono. Entretanto, não houveram diferenças estatísticas entre os desempenhos das vigas sem e com reforços de fibras, portanto, os valores não são significativos dentro da dispersão das lamelas classificadas e ordenadas pelo Ew, com idades variando de 6, 10, 19 a 28 anos da madeira de paricá.

Na tensão de cisalhamento houve um incremento de 4,32% (T4) e de 1,44% (T2), já para os demais tratamentos houve um decréscimo de resistência. Esta perda de resistência no cisalhamento pode ter sido causada pela eleva concentração de tensões na interação madeira + adesivo + fibra.

Já o Ew apresentou incrementos nos tratamentos de 16,29% (T3), seguido de 10,52% (T4) e 6,00% (T5), em relação às vigas sem reforço (T1). Deste modo, os melhores desempenhos percentuais foram para os tratamentos com fibras de vidro com a gramatura acima de  $200\text{ g.m}^{-2}$ .

Ao analisar o desempenho do método numérico de homogeneização da seção em relação ao ensaio destrutivo, observou-se um superestimava do Ew em relação ao obtido experimentalmente, sendo que para T5 houve aumento de 40,23%; 16,95% para T4; 3,35% para

T3; e 0,12% em T2. Assim, quanto maior o Ew das fibras sintéticas, maior é Ew estimado pelo método MHS em vigas reforçadas.

Ao se comparar o desempenho de vigas MLC de paricá reforçadas desta pesquisa com vigas MLC de *Pinus* e de *Eucalyptus* da literatura, observou-se que o menor Ew das vigas reforçadas (T2) teve um incremento de 52,75% em relação ao Ew de vigas de MLC de *Pinus*. O tratamento de vigas reforçadas com maior Ew (T3) somente representa cerca de 68,85% dos Ew de vigas de *Eucalyptus* - Lyptus. Indicando que embora exista um incremento da resistência em vigas de paricá reforçadas com fibras, essa ainda não é suficiente para se equiparar ao Ew de vigas de *Eucalyptus* - Lyptus.

Para trabalhos futuros sugere-se estudar os Ew de lamelas com diferentes espécies, idades, densidades e provenientes de diversos sítios para aumentar a confiabilidade e precisão da equação de correlação entre o Ew e a densidade.

Recomenda-se maiores estudos inerentes ao uso de reforços com fibras em multicamadas e sua relação com a espessura e densidade das lamelas, seja para esta espécie, como para outras em potencial para uso em MLC. Ressalta-se também a necessidade de pesquisas sobre modelagem da concentração de tensões na região de interação entre fibra e madeira, bem como análises da interação compósito madeira + adesivo + fibra, com microscopia de varredura.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRANTES, C.A. **Determinação da carga crítica de instabilidade lateral no regime linear elástico, em vigas de madeira laminada colada (MLC)**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais, Piracicaba, 219p, 2012.
- ABRUZZI, R.C.; et al. Relação das propriedades mecânicas e densidade de postes de madeira de eucalipto com seu estado de deteriorização. **Revista Árvore**, Viçosa- MG, v.36, n.6, p.1171-1181, 2012.
- AFN - ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION. NF B 5-32: **Essai de cisaillement**. Paris: AFN, 1942.
- ALHAYED, H; SVECOVA, D. Flexural stiffness and strength of GFRP-reinforced timber beams. **Journal of composites for construction**, v. 16(3), p. 245-252, 2012.
- AJDINAJ, D.; HABIPI, B. Wood Finger-Joint Strength as Function of Finger Length and Slope Positioning of Tips. **International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)**, v. 2., Issue 12, 2015.
- ALMEIDA, D.H. et al. Combinação madeira-adesivo-impermeabilizante em MLC. **Madeira**, v.12, n.31, 2011a.
- ALMEIDA, D. H. et al. Madeira laminada colada (MLC) da espécie paricá. **Madeira**, v.12, n.30. 2011b.
- ALMEIDA, D. H. de; et al. Caracterização completa da madeira da espécie amazônica paricá (*Schizolobium amazonicum* HERB) em peças de dimensões estruturais. **Árvore**, v. 37, n.6, p. 11751181, 2013.
- ALMSTALDEN, R.A.S. et al. Produção de aglomerados com resíduos de Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*). **Madeira**, v. 14, n.34, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3737. **Standard Test Method for Establishing stresses for Structural glue laminated timber (Glulam)**. 1996.
- [ASTM D4761 – Mechanical properties of Lumber and Wood-Base Structural Material](#). Philadelphia, PA, 2002.
- ANDRÉ, A.; KLIGER, R.; OLSOON, R. Compression failure mechanism in small-scale wood specimens reinforced with CFRP: an experimental study. **Construction and Building materials**, 41, p. 790-800. 2013.
- ANDRIGHETO, R; SZÜCS, C.A. Estudo comparativo entre madeira laminada colada e madeira laminada colada multi-colada. In: Encontro Brasileiro em madeiras e em Estruturas de Madeira, 10., 2006, São Pedro (SP) **Anais...** São Carlos (SP): IBRAMEN – Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira, 2006, CD-ROM.
- ARRIAGA, F.; INIGUES-GONZALES, G.; ESTEBAN, M. Bonding shear strength in timber and GFRP glued with epoxy adhesives. **Wood Research**. 56(3):297-310. 2011.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira.** Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_; Projeto de Norma 02:126.10: **Projetos de Estruturas em Madeira.** 2011.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF.** **Anuário da ABRAF**, 2013, ano base 2012. Brasília, 145p.2013.

BALLARIN, A.W.; NOGUEIRA, M. Caracterização elástica da Madeira de *Eucalyptus citriodora*. **Cerne**, v.9, n.1, p.066-080, 2003.

BALLARIN, A.W.; PALMA, H.A.L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa- MG, v.27, n.3, p.371-380, 2003.

BERTOLINE, C.A.A. **Estudos teórico de vigas de madeira laminada colada reforçadas por fibras sintéticas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 145p. 2015.

BERTOLINE, C.A.A. et al. Analysis of fibre reinforced laminated timber beams. **Key Engineering Materials.** V. 668, p. 100-109; 2015

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites.** Krieger Publishing. ISBN 089464-777-6. Nova York, 1993, 712p.

BISCAIA, H.C.; CRUZ, D.; CHASTRE, C. Analysis of the debonding process at CFRP-to-timber interfaces. **Construction and Building Materials** 113, p. 96-112. 2016.

CABRAL, P. **Erros e incertezas nas medições.** Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto: 2004. 116p. Disponível em: <http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf>. Acesso em: outubro, 2016.

CADEMARTORI, P.H.G. de; et al. Prediction of the Modulus of Elasticity of *Eucalyptus grandis* through two nondestructive techniques. **Floresta e Ambiente**, 21 (3), p. 369-375, 2014.

CALIL NETO, C. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie – adesivo – tratamento químico.** São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 120 p. 2011.

CALIL NETO, C. et al. Avaliação da resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.24, n.4, p. 989-996, out.-dez., 2014.

CARREIRA, M.R.; et al. Bending stiffness evaluation of Teca and Guajará lumber through tests of transverse and longitudinal vibration. **Acta Scientiarum.** v. 34, n.1, p. 27-32, Jan-mar, 2012.

CARRASCO, E.V.M.; PEREIRA, N.C.S.; ALVES, R.C.; Estimativa da densidade aparente, resistência à compressão e módulo de elasticidade da madeira por meio do resistógrafo. **Construindo**, Belo Horizonte, v.5,n.1, jan/jun. 2013.

**CAVALHEIRO, R.S. Madeira Laminada Colada de *Schizolobium amazonicum* Herb (paricá): combinação adesivo/tratamento preservante.** – Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 103p. 2014.

CAVALHEIRO, R.S.; et al. Mechanical Properties of Paricá Wood Using Structural Members and Clear Specimens. **Internacional Journal of Materials engeneering**, 6(2): 56-59, 2016.

CARVALHO,J.G. DE; VIÉGAS, I. DE J.M. Caracterização de sintomas de deficiências de nutrientes em parica (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). Embrapa. **Circular Técnica**, n.37, Belém, 2004. 6p.

CHEW, A.A.; et al. Compression strength of composite glulam timber reinforced between first and second, thrid and fourth lamina. **Jounal Teknologi**.78:5-4, 49-55. 2016.

CÓRDOVA, F. O. de. **Desempenho tecnológico de vigas em madeira laminada colada de paricá (*Schizolobium amazonicum*) tratadas quimicamente.** Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages – SC, 128p. 2015.

CUNHA, A.B.; MATOS, J.I.M.; Rigidez e resistência de vigas estruturais de madeira laminada colada e com perfil I compostas por diferentes adesivos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.20, n. 2, p. 345-356, abr.-jun. 2010a.

CUNHA, A.B.; MATOS, J.I.M.; Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo (“Stress wave timer”). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.2, p. 345-354, 2010b.

CUNHA, A.B.; MATOS, J.I.M.; Avaliação da rigidez de vigas estruturais de madeira laminada colada unidas por adesivo poliuretano. **Cerne**, Lavras, v.17, n.4, p.593-600, out./dez., 2011.

D'AMBRISI, A.; FOCACCI, F.; LUCIANO, R. Experimental investigation on flexural behavior of timber beams repaired with CFRP plates. **Composite Structures**, v. 108, p. 720-728. 2014.

DEGIOVANI, A.S.E.; SEGUNDINHO, P.G. de A.; CALIL JUNIOR, C. Comportamento da linha de cola em madeira laminada colada (MLC) sob altas temperaturas. **Madeira**, v.12, n.30, jul.-set., 2011.

DIAS, F.M.; LAHR, F.A.R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, n.65, p.102-113, jun. 2004.

DONG, X.H.; HAI, W.L.; Comparative study on four diferente methods for measuring the dynamic modulus of elasticity of Acer mono wood. **Advanced Materials Research**. V. 160-162 (2011) p. 384388. 2011.

**FIORELLI, J. Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira.** São Carlos, 2002. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2002.

**FIORELLI, J. Estudo teórico experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro.** São Carlos, 2005. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2005.

FOREST PRODUCTS LABORATORY - FPL. **Wood handbook**: wood as na engineering material. General technical report FPL-GTR-190. Madison, WI:U.S. Department of Agriculture, Forest Produts Laboratory, 508p. 2010

FREIRE, E. et al. (1994). Propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibra de vidro. In. Polímeros: **Ciência e Tecnologia**. v.4, n.3, p.25-32. 1994.

FREITAS, R. R.; CALIL JUNIOR, C. Classificação de de Peças Estruturais de Pinus spp. pela MSR (Machine Stress Rate). **Revista Minerva**, v. 2, p. 119-129, 2005.

GENTRY, T.R. Performance of glued-laminated timbers with FRP shear and flexural reinforcement. **Journal of composites for construction**, v15, p. 861-870. 2011.

GLIŠOVIĆ, I.; STEVANOVIĆ, B.; PETROVIĆ, M. Bending behaviou of glulam beams reinforced. **Journal of civil engineering and management**. v.21 (7), p. 923-932. 2015.

GLIŠOVIĆ, I; STEVANOVIĆ, B.; TODOROVIĆ, M. Flexural reinforcement of glulam beams with CFRP plates. **Materials and Structures**. v.49 (7), p. 2841-2855. Jul. 2015.

HIBBEKER, R. **Mecánica de materiales**. 8ed. Ciudad de México : Pearson Educación 2011.

HOMMA, A.K.O. **Floresta urgente**. *Agroanalysis*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 32-33, abr. 2003.

\_\_\_\_\_. **Madeira na Amazônica**: extração, manejo ou reflorestamento? Amazônia: *Ci. & Desenv.*; Belém, v.7, n.13, jul/dez. 2011.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Amazônia Legal**. (Ed. 44, ano 5, 2008). Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com\\_content&id=2154:catid=28&Itemid=23](http://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&id=2154:catid=28&Itemid=23)>. Acesso em: 16/08/2016.

JESUS, A.M.P. de; PINTO, J.M.T.; MORAIS, J.J.L.; Analysis of solid wood beams strengthened with CFRP laminates of distinct lengths. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 817-828, 2012.

JUVANDES, L.F.P.; BARBOSA, R.M.T. Bond analysis of timber structures strengthened with FRP systems, **Strain**, 48: 124-135, 2012.

KHELIFA, M. et al. Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with carbono fibre-reinforced polymers. **Engineering Structures**, 101, p. 364-375, 2015.

KLIGER, I.R. et al. Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems. **European Journal of Wood and Wood Products**. V.74 (3), p. 319-330. may. 2016.

LA ROVERE, H. Aplicações do método de homogeneização da seção a viga de madeira laminada colada. **Anais...** VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira – EBRAOMEM. Florianópolis, julho, 1998.

LIU, H.;et al. Effects of Moisture Content and Fiber Proportion on Stres Wave velocity in Cathay Poplar (*Populus cathayana*) wood. **BioResources**, 9(2), 2214-2225. 2014.

LOBÃO, M.S. et al. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.6, p. 889-894, 2004.

Lobão, M.S. **Dendrocronologia, fenologia, atividade cambial e qualidade no lenho de árvores de Cedrela odorata L.; Cedrella fissilis Vell. e Schizolobium parahyba var. amazonicum Hub ex Ducke, no Estado do Acre, Brasil.** 2011. 215p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2011.

MARQUES, L. C. T.; YARED, J. A. G.; SIVIERO, M. A. **A evolução do conhecimento sobre Paricá para o reflorestamento no estado do Pará.** Belém: Embrapa Pará, 2006. 5p.

MASCIA, N.T.; MAYER, R.M.; MORAES, R.W. Analysis of wood laminated beams reinforced with sisal fibres. **Key Engineering Materials**, v.600 (2014) pp. 97-104

MELO, R.R de; MENEZZI, C.H.S.D.; Estimativas das Propriedades Físico-mecânicas de compostos LVL confeccionados com parica por meio de ultrassom. **Ciência Florestal**, v.26, n.1; p. 263-272, jan/mar, 2016.

MIOTO, J.L.; DIAS, A.A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica**, Ed. Especial ENTECA 2009, p. 35-45, 2009.

MIOTO, J.L.; DIAS, A.A. Structural efficiency of full-scale timber-concrete composite beams strengthened with fiberglass reinforced polymer. **Composite Structures**, v. 128, p. 145-154, set. 2015.

MISSIO, A.L.; et al. Ultrasonic method for estimation of modulus of elasticity of *Eucalyptus grandis* wood. **Rev. Bras. Ciência. Agrária**. Recife, v.8, n.1, p. 102-107, 2013.

MISSIO, A.L.; et al. Propriedades mecânicas da madeira resinada de *Pinus elliotti*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.45, n 8, p. 1432-1428, 2015.

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**, 112, p. 547555. 2016.

OLIVEIRA, M. et al. Análise comparativa do desempenho de ultrassons da avaliação não destrutiva da madeira de Castanho. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, v.II, n.14,p. 31-43 jan 2015.

PAPPALARDO JUNIOR, A. Estudo numérico-experimental sobre a flambagem lateral de vigas de madeira laminada colada. **Revista Mackenzie de engenharia e computação**, São Paulo, v.13, n.1, p. 42-60, out. 2013.

QING, C.; JIAN, W.P. Experimental study on bending behavior of timber beams reinforced with CFRP/AFRP hybrid FRP sheets. **Advanced Materials Research**, v.255-260, p. 728-732, 2011.

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

RAFTERY, G.M.; WHELAN, C. Low-grade glued laminated timber beams reinforced usign improved arrangements of bonded-in GFRP rods. **Construction and Building Materials**, v 52, p. 209220, 2014.

REDELEASER. Disponível em: < <http://www.redelease.com.br/lojavirtual/> >. Acesso em: 20/01/2017.

RIBEIRO, E.S. et al. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não destrutivos. **Nativa**, v.4, n.2, p. 103-106, mar/abr. 2016.

REDE METROLÓGIA (RS) - RM – 68 – **Incerteza de medição**: Guia prático do avaliador de laboratórios, 2013. 32p.

RODRIGUES, R.A.D. **Viabilidade de propriedades físico-mecânicas em lotes de madeira serrada de eucalipto para a construção civil**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Piracicaba – 2002. 76p.

ROMANI, M.; BLAß, H.J. Design model for FRP reinforced glulam beams. **IN:** International council for research and innovation in building and construction, Venice, Italy, 2001.

RONDON, E. V. Produção de biomassa e crescimento de árvores de *Schizolobium amazonicum* (Huber) Ducke sob diferentes espaçamentos na região de mata. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n.5, p. 573-576, 2002.

ROSA GARCÍA, P. de la; ESCAMILLA, A.C.; GARCÍA, M.N.G. Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. **Composite: Part B**, 55, p. 528536. 2013.

SALES, A.; CANDIAN, M.; CANDIAN, V de S. Evaluation of the mechanical properties of Brazilian lumber (*Gouplia glabra*) by nondestructive techniques. **Construction and Building Materials** 25 (2011) p. 1450-1454.

SEGUNDINHO, P.G. de A. Avaliação de vigas de Madeira Laminada Colada de cedinho (*Erisma uncinatum* Warm.). **Cerne**, Lavras, v.19, n.3, p.441-449, jul./set. 2013a.

SEGUNDINHO, P.G. de A.; et al; Avaliação do módulo de elasticidade de peças de madeira laminada colada (MLC) obtido por meio do ensaio de vibração transversal. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.13, n.2, p.7-14, abr./jun. 2013b.

SILVA, M.G.; ***Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (HUBER EX DUCKE) BARNEBY (parica) na amazônia oriental**: caracterização anatômica e modelagem de crescimento. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG. 2014. 139p.

SILVA, S.; LEÃO, N. V. M. **Árvores da Amazônia**. Empresa das Artes. São Paulo, 2006. 243 p.

SILVEIRA, R. **Avaliação econômica da produção de madeira de parica (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) sob diferentes espaçamentos de plantio**. 2014. 80p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Moneteiro, 2014.

SOUZA, D. B.; CARVALHO, G. S.; RAMOS, E. J. A. Paricá *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke. **Informativo Técnico**, Rede Sementes do Amazônia, n. 13, 2005.

SZUCS, C. A. Influência da Variação da Densidade da Madeira sobre o seu Módulo de Elasticidade. In: IV EBRALEM, 1992, São Carlos / SP. Anais do IV EBRALEM. São Carlos / SP: IBRALEM, 1992. v. 01. p. 13-18. 1992 a.

SZÜCS, C.A. **Aplicação estrutural da madeira sob a técnica do laminado-colado.** Florianópolis: UFSC Departamento de Engenharia Civil, 1992. Não paginado. Apostila, 1992 b.

TELES, R.F. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro vermelho.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília. Brasília, 118p. 2009.

TEREZO, R.F. **Avaliação tecnológica do Paricá e seu uso em estruturas de madeira laminada colada.** 2010. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

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, set.2010.

TEREZO, R.F. et al. Propriedades da Madeira de parica em diferentes idades para uso estrutural. **Ciência da Madeira**, Belo Horizonte –MG. V.6. n.3,p. 244-253, 2015.

VIDAURRE, G.B.; **Caracterização anatômica, Química e físico-mecânica da madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum*) para produção de energia e polpa celulósica.** Tese – Universidade Federal de Viçosa – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Viçosa – MG, 2010 89p.

VIDAURRE, G.B.; et al. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.2, p. 365-371, 2012.

VIVIAN, M.A. et al. Estimativa da resistência e rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* por meio de onda ultrassonora. **Pesq. Flor. Bras.**; Colombo, v.32, n.69, p.109-113, jan/mar. 2012.

YANG, B.Z.. et al. Bending properties of a novel engineered composite from Southern pine lumber. **Eur. J. Wood Prod.**72, p. 601-607, 2014.

## ANEXOS

Anexo 1. Ajustes de correlação dos Ew (Y) pelos métodos visual e com transdutor com a densidade aparente (X) com suas respectivas equações e coeficientes de determinação ( $r^2$ ).

|    | CLASSE                       | VISUAL                             |               | TRANSDUTOR                        |               |
|----|------------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|
|    |                              | Equação                            | $r^2$         | Equação                           | $r^2$         |
| C1 | <b>Exponencial</b>           | $y = 4E+07e^{-29,72x}$             | 0,7881        | $y = 1,8635e^{27,688x}$           | 0,5364        |
|    | <b>Linear</b>                | $y = -250301x + 79489$             | 0,7998        | $y = 113272x - 27080$             | 0,4373        |
|    | <b>Logarítmica</b>           | $y = -70423\ln(x) - 80277$         | 0,7975        | $y = 32168\ln(x) + 45598$         | 0,4443        |
|    | <b>Polinomial (2ª ordem)</b> | $y = -3E+06x^2 + 1E+06x - 148559$  | <b>0,8065</b> | $y = -8E+06x^2 + 5E+06x - 656456$ | <b>0,5746</b> |
|    | <b>Potência</b>              | $y = 0,2166x^{-8,356}$             | 0,7847        | $y = 1E+08x^{7,8592}$             | 0,5444        |
| C2 | <b>Exponencial</b>           | $y = 2344,2e^{3,6649x}$            | 0,0167        | $y = 42,943e^{15,258x}$           | 0,152         |
|    | <b>Linear</b>                | $y = 4346,4x + 6327,4$             | 0,0004        | $y = 81987x - 20301$              | 0,1287        |
|    | <b>Logarítmica</b>           | $y = 1604,7\ln(x) + 9548,6$        | 0,0006        | $y = 25828\ln(x) + 35370$         | 0,1283        |
|    | <b>Polinomial (2ª ordem)</b> | $y = -9E+06x^2 + 5E+06x - 843453$  | <b>0,0864</b> | $y = 2E+06x^2 - 935259x + 140139$ | 0,1314        |
|    | <b>Potência</b>              | $y = 29435x^{1,1909}$              | 0,0177        | $y = 1E+06x^{4,8125}$             | <b>0,1519</b> |
| C3 | <b>Exponencial</b>           | $y = 7889,6e^{0,0334x}$            | 5E-06         | $y = 3987e^{1,279x}$              | 0,0008        |
|    | <b>Linear</b>                | $y = -132,47x + 8106,2$            | 1E-06         | $y = 28381x - 3014,9$             | 0,0063        |
|    | <b>Logarítmica</b>           | $y = -125,8\ln(x) + 7926,8$        | 9E-06         | $y = 9736,7\ln(x) + 17142$        | 0,0062        |
|    | <b>Polinomial (2ª ordem)</b> | $y = 3E+06x^2 - 2E+06x + 318105$   | <b>0,0269</b> | $y = 1E+06x^2 - 940220x + 163810$ | <b>0,0072</b> |
|    | <b>Potência</b>              | $y = 7987x^{0,0007}$               | 2E-08         | $y = 9708,4x^{0,4214}$            | 0,0007        |
| C4 | <b>Exponencial</b>           | $y = 55401e^{-5,178x}$             | 0,0521        | $y = 140280e^{-8,193x}$           | 0,1200        |
|    | <b>Linear</b>                | $y = -41107x + 23598$              | 0,0634        | $y = -54348x + 27138$             | 0,0977        |
|    | <b>Logarítmica</b>           | $y = -15337\ln(x) - 6866,3$        | 0,063         | $y = -20420\ln(x) - 13280$        | 0,0984        |
|    | <b>Polinomial (2ª ordem)</b> | $y = -3E+06x^2 + 2E+06x - 352472$  | <b>0,0734</b> | $y = 4E+06x^2 - 3E+06x + 629257$  | <b>0,12</b>   |
|    | <b>Potência</b>              | $y = 1194,9x^{-1,931}$             | 0,0517        | $y = 317,18x^{-3,077}$            | 0,1075        |
| C5 | <b>Exponencial</b>           | $y = 49,489e^{12,722x}$            | 0,1378        | $y = 10,128e^{16,318x}$           | 0,1333        |
|    | <b>Linear</b>                | $y = 92282x - 28599$               | 0,0952        | $y = 131075x - 45240$             | 0,1406        |
|    | <b>Logarítmica</b>           | $y = 37721\ln(x) + 42876$          | 0,0969        | $y = 52691\ln(x) + 55478$         | 0,1383        |
|    | <b>Polinomial (2ª ordem)</b> | $y = -9E+06x^2 + 8E+06x - 2E+06$   | <b>0,1642</b> | $y = 1E+07x^2 - 1E+07x + 2E+06$   | <b>0,2282</b> |
|    | <b>Potência</b>              | $y = 936612x^{5,1943}$             | 0,1399        | $y = 3E+06x^{6,5664}$             | 0,1314        |
| C6 | <b>Exponencial</b>           | $y = 9210e^{-0,08x}$               | 2E-05         | $y = 6,3214e^{16,309x}$           | 0,2415        |
|    | <b>Linear</b>                | $y = 1456,2x + 8407,4$             | 7E-05         | $y = 136633x - 51380$             | 0,2441        |
|    | <b>Logarítmica</b>           | $y = 785,98\ln(x) + 9695,7$        | 0,0001        | $y = 59526\ln(x) + 57622$         | 0,2449        |
|    | <b>Polinomial (2ª ordem)</b> | $y = -7E+06x^2 + 6E+06x - 1E+06$   | <b>0,0768</b> | $y = -5E+06x^2 + 4E+06x - 948989$ | <b>0,2568</b> |
|    | <b>Potência</b>              | $y = 8735x^{-0,022}$               | 8E-06         | $y = 3E+06x^{7,1067}$             | 0,2424        |
| C7 | <b>Exponencial</b>           | $y = 5003,1e^{1,3398x}$            | 0,0015        | $y = 186,69e^{7,701x}$            | 0,033         |
|    | <b>Linear</b>                | $y = 1552,1x + 8923,2$             | 3E-05         | $y = 54608x - 18315$              | 0,0312        |
|    | <b>Logarítmica</b>           | $y = 705,46\ln(x) + 10185$         | 3E-05         | $y = 25342\ln(x) + 26486$         | 0,0312        |
|    | <b>Polinomial (2ª ordem)</b> | $y = 697553x^2 - 646225x + 159269$ | <b>0,0003</b> | $y = 241832x^2 - 169967x + 33808$ | 0,0312        |
|    | <b>Potência</b>              | $y = 14919x^{0,6131}$              | 0,0015        | $y = 103181x^{3,5696}$            | <b>0,0329</b> |

|                              |  |               |                                  |               |
|------------------------------|--|---------------|----------------------------------|---------------|
| <b>Exponencial</b>           | $y = 2173e^{3,3153x}$                        | 0,03          | $y = 478,21e^{5,9173x}$          | 0,0118        |
| <b>Linear</b>                | $y = 40595x - 8707$                          | 0,0368        | $y = 70078x - 24473$             | 0,0136        |
| <b>Logarítmica</b>           | $y = 19680\ln(x) + 25232$                    | 0,0351        | $y = 35273\ln(x) + 35024$        | 0,014         |
| <b>Polinomial (2ª ordem)</b> | <b>C8</b><br>$y = 1E+07x^2 - 1E+07x + 3E+06$ | <b>0,3056</b> | $y = -1E+07x^2 + 1E+07x - 3E+06$ | <b>0,0484</b> |
| <b>Potêncial</b>             | $y = 34672x^{1,6044}$                        | 0,0286        | $y = 72120x^{2,9673}$            | 0,012         |

Equações em negrito foram escolhidas pela melhor correlação.

Anexo 2. Composição vigas pelo Ew no método visual

| Viga | Ew das lamelas<br>(MPa) | Viga | Ew das lamelas<br>(MPa) | Viga | Ew das lamelas<br>(MPa) |
|------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|
| 1    | 8.702,53                | 2    | 8.730,43                | 3    | 8.731,64                |
|      | 4.110,40                |      | 4.283,63                |      | 4.399,58                |
|      | 7.522,82                |      | 7.565,07                |      | 7.584,99                |
|      | 14.891,38               |      | 14.377,05               |      | 14.368,77               |
| 4    | 8.768,57                | 5    | 8.815,44                | 6    | 8.931,11                |
|      | 5.066,00                |      | 5.417,41                |      | 5.513,57                |
|      | 7.598,74                |      | 7.676,79                |      | 7.735,54                |
|      | 13.703,38               |      | 13.595,50               |      | 12.971,53               |
| 7    | 8.961,82                | 8    | 8.974,09                | 9    | 8.991,00                |
|      | 5.612,54                |      | 5.661,74                |      | 5.850,32                |
|      | 7.764,72                |      | 7.781,60                |      | 7.791,40                |
|      | 12.696,92               |      | 12.525,76               |      | 12.448,90               |
| 10   | 9.021,12                | 11   | 9.048,46                | 12   | 9.084,78                |
|      | 5.889,32                |      | 6.290,87                |      | 6.318,42                |
|      | 7.823,09                |      | 7.894,00                |      | 7.919,58                |
|      | 12.290,60               |      | 12.254,46               |      | 11.872,75               |
| 13   | 9.128,88                | 14   | 9.146,76                | 15   | 9.160,65                |
|      | 6.356,77                |      | 6.411,41                |      | 6.418,03                |
|      | 7.952,05                |      | 7.956,95                |      | 8.081,39                |
|      | 11.781,6                |      | 11.745,42               |      | 11.524,79               |
| 16   | 9.167,11                | 17   | 9.171,67                | 18   | 9.236,70                |
|      | 6.570,64                |      | 6.585,73                |      | 6.604,92                |
|      | 8.084,97                |      | 8.123,70                |      | 8.149,18                |
|      | 11.396,83               |      | 11.112,47               |      | 10.922,87               |
| 19   | 9.244,25                | 20   | 9.351,39                | 21   | 9.390,57                |
|      | 6.669,79                |      | 6.693,81                |      | 6.711,95                |
|      | 8.179,37                |      | 8.181,45                |      | 8.203,18                |
|      | 10.879,53               |      | 10.862,35               |      | 10.849,48               |
| 22   | 9.452,50                | 23   | 9.485,42                | 24   | 9.494,36                |
|      | 6.717,62                |      | 6.771,28                |      | 6.950,60                |
|      | 8.212,46                |      | 8.229,30                |      | 8.236,53                |
|      | 10.658,70               |      | 10.530,47               |      | 10.528,97               |
| 25   | 9.795,13                | 26   | 9.768,08                | 27   | 9.727,90                |
|      | 6.982,96                |      | 7.074,69                |      | 7.136,44                |
|      | 8.252,39                |      | 8.397,07                |      | 8.418,89                |
|      | 10.418,88               |      | 10.398,58               |      | 10.271,14               |
| 28   | 9.723,67                | 29   | 9.665,97                | 30   | 9.528,54                |
|      | 7.145,25                |      | 7.166,86                |      | 7.294,98                |
|      | 8.480,97                |      | 8.579,77                |      | 8.605,33                |
|      | 10.181,00               |      | 10.108,68               |      | 10.064,93               |
| 31   | 9.840,58                | 32   | 9.799,10                |      |                         |
|      | 7.458,73                |      | 7.473,08                |      |                         |
|      | 8.618,00                |      | 8.678,84                |      |                         |
|      | 9.977,17                |      | 9.957,91                |      |                         |

Anexo 3. Composição vigas pelo Ew no método por transdutor de deslocamento

| Viga      | Ew das lamelas | Viga      | Ew das lamelas | Viga      | Ew das lamelas |
|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
| <b>1</b>  | 6.471,15       | <b>2</b>  | 6.667,74       | <b>3</b>  | 6.701,90       |
|           | 2.852,51       |           | 3.075,15       |           | 3.309,75       |
|           | 5.216,32       |           | 5.257,34       |           | 5.272,90       |
|           | 25.271,93      |           | 16.223,47      |           | 15.841,52      |
| <b>4</b>  | 6.724,46       | <b>5</b>  | 6.724,51       | <b>6</b>  | 6.725,33       |
|           | 3.644,21       |           | 3.699,90       |           | 3.711,98       |
|           | 5.274,06       |           | 5.304,99       |           | 5.353,20       |
|           | 14.812,19      |           | 14.635,15      |           | 14.166,01      |
| <b>7</b>  | 6.754,42       | <b>8</b>  | 6.778,71       | <b>9</b>  | 6.804,51       |
|           | 3.914,57       |           | 3.963,53       |           | 3.969,45       |
|           | 5.365,61       |           | 5.405,85       |           | 5.412,54       |
|           | 12.425,94      |           | 12.315,63      |           | 12.222,58      |
| <b>10</b> | 7.049,95       | <b>11</b> | 7.069,78       | <b>12</b> | 7.108,94       |
|           | 4.046,73       |           | 4.175,45       |           | 4.263,34       |
|           | 5.421,25       |           | 5.437,39       |           | 5.582,47       |
|           | 12.150,98      |           | 12.065,10      |           | 11.868,37      |
| <b>13</b> | 7.147,54       | <b>14</b> | 7.236,88       | <b>15</b> | 7.391,78       |
|           | 4.322,07       |           | 4.353,01       |           | 4.361,11       |
|           | 5.590,62       |           | 5.592,39       |           | 5.604,20       |
|           | 11.740,55      |           | 11.566,94      |           | 11.368,30      |
| <b>16</b> | 7.549,02       | <b>17</b> | 7.624,27       | <b>18</b> | 7.714,48       |
|           | 4.388,42       |           | 4.390,95       |           | 4.475,49       |
|           | 5.660,78       |           | 5.673,07       |           | 5.698,81       |
|           | 11.214,85      |           | 11.084,81      |           | 11.049,03      |
| <b>19</b> | 7.770,72       | <b>20</b> | 7.772,39       | <b>21</b> | 7.935,45       |
|           | 4.484,71       |           | 4.518,83       |           | 4.639,53       |
|           | 5.776,20       |           | 5.803,98       |           | 5.807,00       |
|           | 10.197,52      |           | 10.064,03      |           | 9.886,52       |
| <b>22</b> | 8.095,79       | <b>23</b> | 8.115,75       | <b>24</b> | 8.252,25       |
|           | 4.688,31       |           | 4.700,04       |           | 4.750,23       |
|           | 5.893,16       |           | 5.920,07       |           | 5.927,11       |
|           | 9.436,50       |           | 9.064,77       |           | 9.048,72       |
| <b>25</b> | 8.691,59       | <b>26</b> | 8.685,81       | <b>27</b> | 8.611,24       |
|           | 4.767,15       |           | 4.843,61       |           | 4.897,97       |
|           | 5.983,86       |           | 5.991,58       |           | 5.992,38       |
|           | 8.956,66       |           | 8.911,20       |           | 8.862,81       |
| <b>28</b> | 8.440,27       | <b>29</b> | 8.361,58       | <b>30</b> | 8.308,45       |
|           | 5.009,26       |           | 5.046,65       |           | 5.062,12       |
|           | 5.998,26       |           | 6.051,53       |           | 6.058,66       |
|           | 8.842,99       |           | 8.835,71       |           | 8.829,79       |
| <b>31</b> | 8.746,36       | <b>32</b> | 8.710,10       |           |                |
|           | 5.130,11       |           | 5.199,89       |           |                |
|           | 6.093,56       |           | 6.129,89       |           |                |
|           | 8.801,27       |           | 8.794,43       |           |                |

Anexo 4. Composição vigas pelo Ew com sua distribuição das lamelas de paricá nas vigas dos tratamentos conforme seus valores de Ew e comparação estatística pelo teste de média de Tukey de seus respectivos Ew homogeneizados pelo MHS.

|                    | <b>T1SF</b>        | <b>T2V200</b>       | <b>T3V110</b>      | <b>T4C200</b>      | <b>T5V330</b>       |
|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| <b>Vigas</b>       |                    |                     | <b>Ew (MPa)</b>    |                    |                     |
| <b>V1</b>          | 10.685,10          | 10.716,51           | 10.768,91          | 10.811,34          | 9.428,29            |
|                    | 8.130,80           | 8.155,93            | 8.203,49           | 8.268,83           | 7.738,61            |
|                    | 9.627,78           | 9.624,96            | 9.617,72           | 9.541,41           | 8.361,00            |
|                    | 19.855,17          | 18.800,76           | 18.789,93          | 18.127,34          | 17.129,23           |
| <b>Reforço</b>     | -                  | 59.607,00           | 32.784,00          | 182.857,00         | 98.253,00           |
| <b>Ew médio</b>    | <b>12.924,34*</b>  | <b>13.991,99*</b>   | <b>12.2499,25*</b> | <b>20.938,14*</b>  | <b>14.145,79*</b>   |
| <b>L.N** (cm)</b>  | 2,40               | 2,30                | 2,35               | 2,50               | 2,45                |
| <b>V2</b>          | 9.643,15           | 11.041,20           | 10.955,66          | 10.944,72          | 10.900,93           |
|                    | 7.804,49           | 8.577,56            | 8.510,70           | 8.437,35           | 8.413,27            |
|                    | 8.589,71           | 9.652,25            | 9.668,97           | 9.701,40           | 9.730,00            |
|                    | 15.708,73          | 15.871,15           | 16.214,41          | 16.279,33          | 16.711,52           |
| <b>Reforço</b>     | -                  | 59.607,00           | 32.784,00          | 182.857,00         | 98.253,00           |
| <b>Ew médio</b>    | <b>10.155,44*</b>  | <b>13.790,63*</b>   | <b>11.977,29*</b>  | <b>21.009,64*</b>  | <b>16.240,05*</b>   |
| <b>L.N</b>         | 2,50               | 2,30                | 2,50               | 2,45               | 2,35                |
| <b>V3</b>          | 11.153,04          | 11.219,62           | 11.450,55          | 11.496,60          | 11.498,63           |
|                    | 8.652,13           | 8.676,27            | 8.680,16           | 8.751,91           | 8.753,97            |
|                    | 10.058,25          | 10.022,96           | 9.961,78           | 9.784,86           | 9.739,82            |
|                    | 15.318,07          | 15.179,91           | 15.070,88          | 14.911,62          | 14.840,94           |
| <b>Reforço</b>     | -                  | 59.607,00           | 32.784,00          | 182.857,00         | 98.253,00           |
| <b>Ew médio</b>    | <b>11.853,34*</b>  | <b>13.779,66*</b>   | <b>11.952,52*</b>  | <b>21.404,22*</b>  | <b>16.534,01*</b>   |
| <b>L.N</b>         | 2,55               | 2,35                | 2,50               | 2,45               | 2,15                |
| <b>V4</b>          | 11.608,87          | 11.580,76           | 11.553,05          | 11.522,94          | 11.500,59           |
|                    | 8.925,62           | 8.921,42            | 8.777,23           | 8.773,47           | 8.754,30            |
|                    | 10.171,54          | 10.220,38           | 10.245,59          | 10.250,18          | 10.280,89           |
|                    | 14.040,63          | 14.355,51           | 14.587,43          | 14.745,1           | 14.748,72           |
| <b>Reforço</b>     | -                  | 59.607,00           | 32.784,00          | 182.857,00         | 98.253,00           |
| <b>Ew médio</b>    | <b>11.632,25*</b>  | <b>13.800,85*</b>   | <b>11.900,94*</b>  | <b>21.484,69*</b>  | <b>16.320,94*</b>   |
| <b>L.N</b>         | 2,65               | 2,55                | 2,45               | 2,40               | 2,50                |
| <b>V5</b>          | 11.770,55          | 11.785,05           | 11.982,99          | 12.194,32          | 12.210,10           |
|                    | 8.980,33           | 9.058,84            | 9.089,97           | 9.174,34           | 9.228,57            |
|                    | 10.494,57          | 10.476,82           | 10.424,19          | 10.341,10          | 10.290,02           |
|                    | 13.883,18          | 13.611,72           | 13.478,24          | 13.468,98          | 13.402,30           |
| <b>Reforço</b>     | -                  | 59.607,00           | 32.784,00          | 182.857,00         | 98.253,00           |
| <b>Ew médio</b>    | <b>11.746,12*</b>  | <b>13.758,09*</b>   | <b>11.834,81*</b>  | <b>21.964,24 *</b> | <b>16.665,38*</b>   |
| <b>L.N</b>         | 2,35               | 2,60                | 2,25               | 2,40               | 2,40                |
| <b>V6</b>          | 12.332,28          | 12.301,58           | 12.300,95          | 12.300,73          | 12.260,46           |
|                    | 9.428,07           | 9.385,67            | 9.277,39           | 9.272,18           | 9.269,954           |
|                    | 10.582,70          | 10.589,31           | 10.591,24          | 10.610,24          | 10.636,42           |
|                    | 12.688,93          | 12.751,89           | 12.890,46          | 13.023,60          | 13.034,83           |
| <b>Reforço</b>     | -                  | 59.607,00           | 32.784,00          | 182.857,00         | 98.253,00           |
| <b>Ew médio</b>    | <b>11.574,70*</b>  | <b>13.840,81*</b>   | <b>11.849,01*</b>  | <b>22.090,66*</b>  | <b>16.645,62*</b>   |
| <b>L.N</b>         | 2,35               | 2,65                | 2,25               | 2,35               | 2,40                |
| <b>Média Geral</b> | <b>11.647,70 c</b> | <b>13.827,00 bc</b> | <b>11.960,64 c</b> | <b>21.481,93 a</b> | <b>16.091,96 ab</b> |

\*Módulo de elasticidade da viga homogeneizado pelo método MHS. \*\*L.N – Linha neutra (cm)

Anexo 5. Propriedades mecânicas das vigas do Tratamento T1 (sem reforço de fibras)

| <b>Tratamento<br/>T1</b> | <b>Tensão (MPa)</b> |                     | <b>Ew (MPa)</b> |
|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
|                          | <b>Axial</b>        | <b>Cisalhamento</b> |                 |
| <b>V1</b>                | 60,32               | 1,44                | 9.743,971       |
| <b>V2</b>                | 67,15               | 1,60                | 10.736,22       |
| <b>V3</b>                | 62,91               | 1,66                | 12.097,79       |
| <b>V4</b>                | 51,54               | 1,45                | 11.459,61       |
| <b>V5</b>                | 46,08               | 1,10                | 11.927,13       |
| <b>V6</b>                | 59,95               | 1,43                | 12.767,00       |
| <b>Média</b>             | 57,99               | 1,44                | 11.455,29       |
| <b>D.P.</b>              | 7,76                | 0,20                | 1.077,19        |
| <b>CV(%)</b>             | 13,37               | 13,55               | 9,40            |
| <b>ft90,k (12%)</b>      | 55,06               |                     |                 |
| <b>fvo,k (12%)</b>       | 1,47                |                     |                 |

$E_w$  – Módulo de Elasticidade; D.P. – Desvio-padrão da média; CV – coeficiente de variação em porcentagem

Anexo 6. Propriedades mecânicas das vigas do Tratamento T2 (reforço com fibra de vidro 110 g.cm<sup>-3</sup>).

| <b>Tratamento<br/>T2</b> | <b>Tensão (MPa)</b> |                     | <b>Ew (MPa)</b> |
|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
|                          | <b>Axial</b>        | <b>Cisalhamento</b> |                 |
| <b>V1</b>                | 68,15               | 1,62                | 12.704,43       |
| <b>V2</b>                | 58,02               | 1,38                | 9.987,967       |
| <b>V3</b>                | 39,02               | 0,93                | 9.756,739       |
| <b>V4</b>                | 61,26               | 1,46                | 11.151,55       |
| <b>V5</b>                | 75,58               | 1,80                | 12.332,01       |
| <b>V6</b>                | 71,54               | 1,70                | 12.600,07       |
| <b>Média</b>             | 62,26               | 1,48                | 11.422,13       |
| <b>D.P.</b>              | 13,10               | 0,31                | 1.323,88        |
| <b>CV(%)</b>             | 21,03               | 21,03               | 11,59           |
| <b>ft90,k (12%)</b>      | 46,35               |                     |                 |
| <b>fvo,k (12%)</b>       | 1,10                |                     |                 |

Anexo 7. Propriedades mecânicas das vigas do Tratamento T3 (reforço com fibra de vidro 200 g.cm<sup>-3</sup>).

| <b>Tratamento<br/>T3</b> | <b>Tensão (MPa)</b> |                     | <b>Ew (MPa)</b> |
|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
|                          | <b>Axial</b>        | <b>Cisalhamento</b> |                 |
| <b>V1</b>                | 70,91               | 1,69                | 13.490,75       |
| <b>V2</b>                | 49,15               | 1,17                | 16.159,52       |
| <b>V3</b>                | 55,11               | 1,31                | 10.768,6        |
| <b>V4</b>                | 53,07               | 1,26                | 10.221,93       |
| <b>V5</b>                | 64,70               | 1,54                | 13.689,31       |
| <b>V6</b>                | 58,88               | 1,40                | 15.597,73       |
| <b>Média</b>             | 58,64               | 1,40                | 13.321,31       |
| <b>D.P.</b>              | 8,01                | 0,19                | 2.429,99        |
| <b>CV(%)</b>             | 13,66               | 13,66               | 18,24           |
| <b>ft90,k (12%)</b>      | 58,47               |                     |                 |
| <b>fvo,k (12%)</b>       | 1,39                |                     |                 |

Anexo 8. Propriedades mecânicas das vigas do Tratamento T4 (reforço com fibra de carbono 330 g.cm<sup>-3</sup>).

| <b>Tratamento<br/>T4</b> | <b>Tensão (MPa)</b> |                     | <b>Ew (MPa)</b> |
|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
|                          | <b>Axial</b>        | <b>Cisalhamento</b> |                 |
| <b>V1</b>                | 55,75               | 1,33                | 12.555,95       |
| <b>V2</b>                | 67,50               | 1,61                | 13.611,66       |
| <b>V3</b>                | 66,73               | 1,59                | 11.090,65       |
| <b>V4</b>                | 68,97               | 1,64                | 12.431,18       |
| <b>V5</b>                | 57,64               | 1,37                | 11.949,11       |
| <b>V6</b>                | 70,68               | 1,68                | 14.321,56       |
| <b>Média</b>             | 64,55               | 1,54                | 12.660,02       |
| <b>D.P.</b>              | 6,26                | 0,15                | 1.157,40        |
| <b>CV(%)</b>             | 9,69                | 9,69                | 9,14            |
| <b>ft90,k (12%)</b>      | 67,35               |                     |                 |
| <b>fvo,k (12%)</b>       | 1,60                |                     |                 |

Anexo 9. Propriedades mecânicas das vigas do Tratamento T5 (reforço com fibra de carbono 200 g.cm<sup>-3</sup>).

| <b>Tratamento<br/>T5</b> | <b>Tensão (MPa)</b> |                     | <b>Ew (MPa)</b> |
|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
|                          | <b>Axial</b>        | <b>Cisalhamento</b> |                 |
| <b>V1</b>                | 33,12               | 0,79                | 10.053,86       |
| <b>V2</b>                | 56,74               | 1,35                | 11.371,67       |
| <b>V3</b>                | 55,19               | 1,31                | 10.393,02       |
| <b>V4</b>                | 75,17               | 1,79                | 13.289,76       |
| <b>V5</b>                | 67,03               | 1,60                | 13.127,22       |
| <b>V6</b>                | 71,33               | 1,70                | 14.620,28       |
| <b>Média</b>             | 59,76               | 1,42                | 12.142,64       |
| <b>D.P.</b>              | 15,26               | 0,36                | 1.813,43        |
| <b>CV(%)</b>             | 25,53               | 25,53               | 14,93           |
| <b>ft90,k (12%)</b>      | 36,73               |                     |                 |
| <b>fvo,k (12%)</b>       | 0,87                |                     |                 |

Anexo 10. Resistências à tração paralela para madeira de paricá reforçadas com diferentes fibras sintéticas

| <b>Tração<br/>paralela</b> | <b>Tratamento</b> |           |           |           |           |
|----------------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                            | <b>T1</b>         | <b>T2</b> | <b>T3</b> | <b>T4</b> | <b>T5</b> |
| 1                          | 18,52             | 41,48     | 37,81     | 37,14     | 32,55     |
| 2                          | 52,69             | 63,06     | 29,57     | 51,48     | 44,44     |
| 3                          | 20,02             | 31,22     | 46,91     | 49,83     | 26,30     |
| 4                          | 31,44             | 75,26     | 73,96     | 45,50     | 51,75     |
| 5                          | 38,46             | 44,21     | 21,21     | 56,94     | 40,27     |
| 6                          | 38,69             | 43,08     | 33,53     | 26,89     | 30,65     |
| 7                          | 54,00             | 44,73     | 37,52     | 42,04     | 28,29     |
| 8                          | 32,08             | 42,02     | 29,81     | 50,15     | 27,86     |
| 9                          | 35,01             | 46,63     | 54,04     | 28,49     | 45,22     |
| 10                         | 33,58             | 32,46     | 35,88     | 41,04     | 33,41     |
| 11                         | 47,78             | 30,20     | 30,71     | 44,57     | 21,01     |
| 12                         | 33,66             | 41,98     | 38,78     | 51,05     | 50,52     |
| <b>Média</b>               | 36,33             | 44,69     | 39,14     | 43,76     | 36,02     |
| <b>Desvio<br/>Padrão</b>   | 11,13             | 12,95     | 13,86     | 9,24      | 10,11     |
| <b>CV (%)</b>              | 30,64             | 28,97     | 35,40     | 21,12     | 28,08     |
| <b>Ft0,k (12%)</b>         | 23,57             | 34,02     | 26,40     | 32,40     | 25,73     |

Anexo 11. Resistência da linha de cola ao cisalhamento

| <b>Cisalhamento</b>  | <b>Tratamento</b> |           |           |           |           |
|----------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | <b>T1</b>         | <b>T2</b> | <b>T3</b> | <b>T4</b> | <b>T5</b> |
| 1                    | 2,17              | 1,47      | 2,63      | 2,19      | 1,94      |
| 2                    | 1,61              | 1,59      | 1,58      | 1,54      | 2,15      |
| 3                    | 1,37              | 1,32      | 1,85      | 2,17      | 2,32      |
| 4                    | 1,79              | 1,98      | 1,48      | 1,99      | 1,60      |
| 5                    | 1,44              | 1,03      | 1,23      | 1,58      | 2,52      |
| 6                    | 2,11              | 0,97      | 2,03      | 1,95      | 2,18      |
| 7                    | 1,33              | 1,54      | 1,54      | 2,05      | 1,53      |
| 8                    | 1,83              | 1,51      | 2,34      | 2,31      | 2,64      |
| 9                    | 2,02              | 2,07      | 1,40      | 1,63      | 1,47      |
| 10                   | 1,73              | 1,44      | 1,52      | 1,81      | 1,54      |
| 11                   | 1,88              | 1,59      | 2,40      | 2,55      | 1,91      |
| 12                   | 2,97              | 1,82      | 3,02      | 2,18      | 2,99      |
| <b>Média</b>         | 1,85              | 1,53      | 1,92      | 2,00      | 2,07      |
| <b>Desvio Padrão</b> | 0,45              | 0,33      | 0,57      | 0,31      | 0,49      |
| <b>CV (%)</b>        | 24,05             | 21,64     | 29,45     | 15,54     | 23,77     |
| <b>Fv0,k (12%)</b>   | 15,90             | 1,21      | 4,20      | 1,68      | 1,37      |

Anexo 12. Resistência da linha de cola à tração normal

| <b>Tração normal</b> | <b>Tratamento</b> |           |           |           |           |
|----------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                      | <b>T1</b>         | <b>T2</b> | <b>T3</b> | <b>T4</b> | <b>T5</b> |
| 1                    | 1,66              | 2,06      | 1,23      | 1,69      | 2,28      |
| 2                    | 1,93              | 0,94      | 2,07      | 2,45      | 1,91      |
| 3                    | 1,43              | 0,91      | 1,84      | 1,15      | 1,89      |
| 4                    | 1,74              | 2,28      | 1,42      | 0,82      | 1,21      |
| 5                    | 2,25              | 1,82      | 1,67      | 1,33      | 1,54      |
| 6                    | 1,90              | 1,06      | 1,25      | 1,84      | 2,00      |
| 7                    | 1,47              | 0,90      | 2,64      | 1,18      | 1,80      |
| 8                    | 2,92              | 0,73      | 1,21      | 1,39      | 2,05      |
| 9                    | 2,09              | 0,66      | 1,43      | 1,67      | 2,46      |
| 10                   | 1,76              | 0,94      | 1,64      | 1,14      | 2,37      |
| 11                   | 1,97              | 0,87      | 1,57      | 0,76      | 1,81      |
| 12                   | 1,38              | 1,53      | 1,72      | 1,03      | 2,26      |
| <b>Média</b>         | 1,87              | 1,22      | 1,64      | 1,37      | 1,97      |
| <b>Desvio Padrão</b> | 0,42              | 0,55      | 0,41      | 0,48      | 0,36      |
| <b>CV (%)</b>        | 22,59             | 45,07     | 24,83     | 34,83     | 18,25     |
| <b>Ft90,k (12%)</b>  | 1,45              | 0,85      | 1,23      | 0,81      | 1,62      |