



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

MARIA IZABEL DE MELLO BARRETO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DO CLT –  
*CROSS LAMINATED TIMBER*, COMPOSTO DE MADEIRA E  
BAMBU**

---

Londrina  
2018

MARIA IZABEL DE MELLO BARRETO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DO CLT –  
*CROSS LAMINATED TIMBER*, COMPOSTO DE MADEIRA E  
BAMBU**

Defesa apresentada ao Programa Associado de Pós – graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo das Universidades Estaduais de Londrina e Maringá para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Jorge Daniel de Melo Moura

Londrina  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Barreto, Maria Izabel de Mello.

ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DO CLTB – CROSS LAMINATED TIMBER AND BAMBOO, COMPOSTO DE MADEIRA E BAMBU / Maria Izabel de Mello Barreto. - Londrina, 2018.  
127 f. : il.

Orientador: Dr. Jorge Daniel de Melo Moura.

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2018.

Inclui bibliografia.

1. CLTB – Madeira e Bambu Laminado Colado Cruzado - Tese. 2. Dendrocalamus giganteus - Tese. 3. Pinus - Tese. 4. Painéis estruturais - Tese. I. Moura, Dr. Jorge Daniel de Melo . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

MARIA IZABEL DE MELLO BARRETO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO ESTRUTURAL DO CLT – *CROSS*  
*LAMINATED TIMBER*, COMPOSTO DE MADEIRA E BAMBU**

Defesa apresentada ao Programa Associado de Pós – graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo das Universidades Estaduais de Londrina e Maringá para obtenção do título de Mestre.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo  
Moura  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. Ricardo Dias Silva  
Universidade Estadual de Maringá – UEM

---

Profa. Dra. Juliana Cortez Barbosa  
Universidade Estadual Paulista – UNESP

Londrina, 13 de setembro de 2018.

BARRETO, Maria Izabel de Mello. **Análise do Desempenho Estrutural do CLTB – Cross Laminated Timber and Bamboo, Composto de Madeira e Bambu.** 2018. 112 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

## RESUMO

Os concretos, assim como o aço e a madeira, são utilizados em larga escala no Brasil. Contudo, outros materiais estão sendo estudados e explorados por pesquisadores em várias partes do mundo, objetivando diminuir o impacto ambiental que muitos materiais, bem como, a construção civil causam ao meio ambiente. Durante o processo de extração tem – se um gasto energético muito alto e uma considerável degradação ao meio ambiente para sua obtenção. Surge, assim, um pensamento ecológico preocupado com o futuro da construção civil mundial, como uma excelente alternativa para a construção que é o Sistema Construtivo *Cross Laminated Timber* (CLT) Madeira Laminada Cruzada mostrando sua versatilidade no desenvolvimento de materiais. O CLT abre horizontes na engenharia da madeira graças a sua estrutura lamelar o que torna ideal para a construção, devido, a suas propriedades mecânicas. Por meio da metodologia experimental, e da pesquisa bibliográfica pode – se observar que o bambu é um material sustentável com inúmeras vantagens para a construção. O presente trabalho teve como objetivo analisar o desempenho estrutural dos painéis CLTB (*Cross Laminated Timber and Bamboo*) Madeira e Bambu Laminado Colado Cruzado compostos de madeira pinus (*Pinus spp.*) e Bambu (*Dendrocalamus giganteus*). Espera – se que o sistema construtivo de CLTB possa constituir alternativa tecnológica para a construção civil. Ensaio de colagem de pequenos corpos de prova foram realizados com o objetivo de julgar – se a qualidade de três tipos de adesivos que constituíram os painéis CLTB. Dividiu – se em duas etapas, a primeira foi a escolha do melhor adesivo a ser utilizado nos painéis através de testes mecânicos, conforme a norma NBR 7190 (1997). Foram ensaiados 312 corpos de prova representativos de painel CLTB, utilizando os adesivos Melanina Uréia Formaldeído (MUF), Isocianato (EPI) e adesivo à base de óleo de mamona (AGT). Os corpos de prova foram subdivididos em 8 grupos com 13 corpos de prova cada grupo, e colados com orientação paralela e perpendiculares às fibras de bambu e de pinus e posição de material (parte externa com parte externa de bambu, parte interna com parte externa de bambu, parte externa de bambu com pinus e parte interna do bambu com pinus), fazendo 8 tipos de combinações diferentes das espécies bambu e pinus. A análise dos resultados obtidos nos testes de determinação da resistência ao cisalhamento, longitudinal da colagem entre bambu e pinus em mesma direção das fibras e entre as mesmas espécies apontou melhor desempenho para o adesivo MUF, para a combinação de bambu/pinus nas colagens com a mesma direção das fibras, parte externa bambu e pinus. Realizou – se ensaio em laboratório dos painéis de CLTB. Ensaio – se 8 painéis com as seguintes camadas: bambu/pinus/bambu, sendo as camadas externas de bambu e a camada central de pinus. Os valores de rigidez e de ruptura ficaram acima dos especificados pela norma americana ANSI/APA PGR 320 (2012); neste estudo 13310,2 e 64,6 respectivamente mostrando desta forma a viabilidade do uso deste material para uso estrutural.

**Palavras–chave:** CLTB – madeira e bambu laminado colado cruzado. Pinus. *Dendrocalamus giganteus*. Construções de materiais lignocelulósicos. Painéis estruturais.

BARRETO, Maria Izabel de Mello. **Análise do Desempenho Estrutural do CLTB – Cross Laminated Timber and Bamboo, Composto de Madeira e Bambu**. 2018. 112 p. Dissertation (Master's Degree in Architecture and Urbanism) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

## ABSTRACT

Concretes, like steel and wood, are widely used in Brazil. However, other materials are being studied and explored by researchers in various parts of the world, aiming to reduce the environmental impact that many materials as well as civil construction cause to the environment. During the extraction process there is a very high energy expenditure and considerable degradation to the environment to obtain it. Thus, an ecological thinking concerned with the future of the world civil construction, as an excellent alternative for the construction that is the Construction System Cross Laminated Timber (CLT) Cross Laminated Wood showing its versatility in the development of materials. The CLT opens horizons in the engineering of the wood thanks to its lamellar structure which makes it ideal for the construction due to its mechanical properties. Through the experimental methodology, and the bibliographical research it can be observed that bamboo is a sustainable material with numerous advantages for the construction. The aim of the present work was to analyze the structural performance of CLTB (Cross Laminated Timber and Bamboo) and Bamboo Laminated Crossed Composite panels composed of pine wood (*Pinus* spp.) And Bamboo (*Dendrocalamus giganteus*). It is expected that the construction system of CLTB may constitute a technological alternative for civil construction. Bonding tests of small specimens were performed with the objective of judging the quality of three types of adhesives that constituted the CLTB panels. It was divided in two stages, the first one was the choice of the best adhesive to be used in the panels through mechanical tests, according to the norm NBR 7190 (1997). 312 representative specimens of CLTB panels were tested using Melanin Urea Formaldehyde (MUF), Isocyanate (EPI) and castor oil based (AGT) adhesives. The specimens were subdivided into 8 groups with 13 test specimens each group, and glued with parallel orientation and perpendicular to the bamboo and pinus fibers and position of material (external part with bamboo outside, inner part with external part of bamboo, bamboo outside with pinus and inner part of bamboo with pinus), making 8 kinds of different combinations of species bamboo and pine. The analysis of the results obtained in the tests of determination of the shear strength, longitudinal of the bonding between bamboo and pine in the same direction of the fibers and between the same species showed better performance for the adhesive MUF, for the combination of bamboo / pinus in the collages with the same direction of the fibers, outside bamboo and pine. Laboratory testing of the CLTB panels was performed. 8 panels were tested with the following layers: bamboo / pinus / bamboo, the outer layers of bamboo and the central layer of pine. The values of stiffness and rupture were higher than those specified by the American Standard ANSI / APA PGR 320 (2012); in this study 13310.2 and 64.6 respectively, thus showing the feasibility of using this material for structural use.

**Keywords:** CLTB – cross laminated timber and bamboo. *Pinus*. *Dendrocalamus giganteus*. Lignocellulosic material constructions. Structural panels.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	–	Secção de um colmo de bambu e suas denominações .....	25
<b>Figura 2</b>	–	Plantios florestais de Eucailpto e Pinus respectivamente nos estados do Brasil, 2012.....	28
<b>Figura 3</b>	–	Configuração do Painel de CLT30	
<b>Figura 4</b>	–	Exemplo de Secções Transversais do CLT .....	30
<b>Figura 5</b>	–	Encaixe <i>finger joint</i> entre duas tábuas de madeira .....	31
<b>Figura 6</b>	–	Edificação construída em CLT – <i>Single – Family house</i> in Klagenfurt, Áustria (KLH, 2008) .....	35
<b>Figura 7</b>	–	<i>Staudhaus</i> , em Londres, <i>Murray River Grove</i> distrito de habitação do Reino Unido (KLH, 2009).....	35
<b>Figura 8</b>	–	Sede Juwi, Wörrstadt, Alemanha (Binderholz ,2009).....	36
<b>Figura 9</b>	–	Processo de montagem dos painéis de CLT em obra .....	36
<b>Figura 10</b>	–	Construção multifamiliar <i>in Judenburg, Áustria</i> .....	37
<b>Figura 11</b>	–	Construção multifamiliar <i>in Judenburg, Austria</i> .....	37
<b>Figura 12</b>	–	Prefeitura de Shiga – Otsu – Japão .....	38
<b>Figura 13</b>	–	Laje de cobertura construída em CLT.....	38
<b>Figura 14</b>	–	Laje de cobertura construída em CLT.....	39
<b>Figura 15</b>	–	Torres Silva e Hypérion em CLT a serem construídas e concluídas até 2020 .....	39
<b>Figura 16</b>	–	Mobiliário Cafeteria em Campinas –SP40	
<b>Figura 17</b>	–	Inhotim Box, que é Módulo feito para casa cor Minas Gerais 2016.....	40
<b>Figura 18</b>	–	Idealização estrutural. Diagramas de Momento Fletor e Esforço Cortante .....	42
<b>Figura 19</b>	–	Diagrama carga x flecha na flexão.....	43
<b>Figura 20</b>	–	Diagrama de carregamento para determinação da rigidez à flexão .....	44
<b>Figura 21</b>	–	Modo de falha do painel CLT em correspondência de nós (à esquerda) e ao alinhamento de nós (à direita).....	48
<b>Figura 22</b>	–	Disposição das lâminas nos painéis de BLC .....	56
<b>Figura 23</b>	–	Delineamento da pesquisa.....	80
<b>Figura 24</b>	–	Processo Produção Painéis CLT .....	80

<b>Figura 25</b> –	Processo Produção Painéis CLTB .....	80
<b>Figura 26</b> –	Corpo de prova (CP) para a realização do ensaio de cisalhamento da linha de cola (dimensões em mm) .....	85
<b>Figura 27</b> –	Corpo de prova para a realização do ensaio de cisalhamento da linha de cola (dimensões em mm) .....	85
<b>Figura 28</b> –	Adaptação da serra circular para desdobro do bambu .....	86
<b>Figura 29</b> –	Régua de bambu com dimensão de 50mm e espessura de 9mm já lixada .....	87
<b>Figura 30</b> –	Seleção dos corpos de prova.....	87
<b>Figura 31</b> –	Orientação das fibras dos corpos de prova para a realização do ensaio de cisalhamento da linha de cola conforme norma ASTM 905 (2008).....	88
<b>Figura 32</b> –	Prensa criada no laboratório de maquete da UEL com princípio de alavanca para teste de colagem dos corpos de prova .....	89
<b>Figura 33</b> –	Gabarito para colagem de corpo de prova ASTM 905 (2005).....	89
<b>Figura 34</b> –	Teste de cisalhamento na compressão sem o corpo de prova (à esquerda); com corpo de prova (ao centro); prensa manual (à direita) .....	90
<b>Figura 35</b> –	Amostras de bambu e pinus para ensaio de umidade	91
<b>Figura 36</b> –	Medição de ultrassom nas peças de pinus de 320mm e bambu de 900mm respectivamente .....	93
<b>Figura 37</b> –	Disposição das lâminas de bambu e pinus no painel de CLTB.....	93
<b>Figura 38</b> –	Distribuição das lâminas de bambu nas camadas externas do painel CLTB de acordo com a ordem crescente de MOEd feito no ensaio não destrutivo .....	95
<b>Figura 39</b> –	Sentido da distribuição dos valores dos MOEd nas camadas externas do painel CLTB.....	95
<b>Figura 40</b> –	Distribuição das lâminas de bambu conforme o valor de MOEd das camadas externas do painel CLTB, seguindo conforme figura 37 .....	95
<b>Figura 41</b> –	Média da soma dos valores MOEd e desvio padrão de cada painel das camadas externas do painel CLTB.....	95

<b>Figura 42</b> –	Média dos valores do MOEd das camadas externas dos oito painéis de <i>CLTB</i> .....	98
<b>Figura 43</b> –	Distribuição dos valores do MOEd na camada central do painel <i>CLTB</i> .....	98
<b>Figura 44</b> –	Distribuição dos valores do MOEd na camada central do painel <i>CLTB</i> .....	98
<b>Figura 45</b> –	A distribuição dos valores do MOEd para camada central de cada painel.....	100
<b>Figura 46</b> –	Média dos valores do MOEd e Desvio padrão de cada camada central do painel de <i>CLTB</i> .....	100
<b>Figura 47</b> –	Separação das lâminas de bambu e pinus para montagem dos painéis.....	101
<b>Figura 48</b> –	Gabarito para montagem dos painéis e painel montado.....	101
<b>Figura 49</b> –	Montagem dos painéis.....	102
<b>Figura 50</b> –	Preparação dos painéis para transporte .....	102
<b>Figura 51</b> –	Aplicação do adesivo MUF nas camadas dos painéis de <i>CLTB</i> .....	103
<b>Figura 52</b> –	Painéis posicionados nas bandejas e aplicação de pressão .....	104
<b>Figura 53</b> –	Painéis pós prensagem e em repouso.....	104
<b>Figura 54</b> –	Marcação dos painéis para ensaio de flexão .....	105
<b>Figura 55</b> –	Aparato para o apoio do painel em 4 pontos no sentido longitudinal na prensa mecânica.....	105
<b>Figura 56</b> –	Corpo de prova após colagem adesivo MUF, fratura profunda, média e rasa respectivamente mecânica.....	105
<b>Figura 57</b> –	Ensaio de flexão (4 pontos) .....	114
<b>Figura 58</b> –	Ruptura da parte inferior durante ensaio de flexão .....	114
<b>Figura 59</b> –	Detalhe mais próximo da ruptura do painel.....	115

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b>	–	Relação percentual entre a resistência dos corpos de prova colados e dos corpos de prova de controle.....	65
<b>Gráfico 2</b>	–	Média do MOR do ensaio de colagem com adesivo MUF, EPI e AGT.....	108
<b>Gráfico 3</b>	–	Porcentagem dos tipos de Fraturas observadas.....	110
<b>Gráfico 4</b>	–	Relação da Carga de Ruptura e MOE com 8 painéis .....	112
<b>Gráfico 5</b>	–	Relação da Carga de Ruptura e MOE, sem o painel 8 .....	112
<b>Gráfico 6</b>	–	Relação de Tensão de Cisalhamento com o deslocamento .....	112

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Relatório do ensaio de flexão e ruptura de 8 painéis de CLTB .....	127
--	-----

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b>	– Eficiência das espécies de bambu e do aço (Resistência à tração / Massa Específica).....	22
<b>Quadro 2</b>	– Avaliação da resistência mecânica das espécies de bambu .....	26
<b>Quadro 3</b>	– Força especificada e nos módulos de elasticidade (a, b, c) para CLT (utilização no Canadá) .....	45
<b>Quadro 4</b>	– Número e dimensões das amostras avaliadas .....	47
<b>Quadro 5</b>	– Resultados das propriedades mecânicas e físicas da madeira serrada.....	47
<b>Quadro 6</b>	– Resultados dos ensaios de flexão nos 5 painéis de CLT .....	50
<b>Quadro 7</b>	– Resultado teste flexão.....	51
<b>Quadro 8</b>	– Estudo comparativo dos resultados obtidos por Alencar (2015) com outros autores .....	52
<b>Quadro 9</b>	– Resultados flexão comparados com as normas .....	53
<b>Quadro 10</b>	– Propriedades mecânicas de 7 espécies de bambus.....	55
<b>Quadro 11</b>	– Valores de propriedade física e mecânica em MPa de Bambu Laminado Colado e algumas espécies de referências .....	57
<b>Quadro 12</b>	– Adesivo de madeira categorizados de acordo com seu desempenho estrutural previsto em níveis da exposição ambiental .....	61
<b>Quadro 13</b>	– Resultados para ensaio de cisalhamento direto na linha de cola .....	62
<b>Quadro 14</b>	– Resistência relativa das tensões de Cisalhamento para as 3 espécies de madeira .....	64
<b>Quadro 15</b>	– Tensão de cisalhamento dos BLCs de bambu <i>D. giganteus</i> e de <i>B. vulgaris</i> para adesivos e tratamentos preservativos .....	66
<b>Quadro 16</b>	– Valores de coeficiente de modificação – Kmod3 para coníferas .....	70
<b>Quadro 17</b>	– Condições para Classificação Visual de Peças Estruturais de Madeira tipo pinus.....	71
<b>Quadro 18</b>	– Aspectos a considerar na classificação visual de madeira e bambu .....	73
<b>Quadro 19</b>	– Resultados teor de umidade .....	84

<b>Quadro 20</b>	– Agrupamento dos corpos de prova de acordo com material, posição do material, direção e tipo de adesivo utilizado .....	84
<b>Quadro 21</b>	– Teor de umidade do material de composição dos painéis .....	92
<b>Quadro 22</b>	– Média do Teor de umidade dos painéis após ensaio de o de flexão .....	106
<b>Quadro 23</b>	– Resultado Ensaio de Colagem com adesivo MUF, EPI e AGT.....	107
<b>Quadro 24</b>	– Porcentagem em relação do tipo de fratura no teste de colagem com os adesivos MUF, EPI e AGT em relação aos 312 corpos de prova, com análise visual .....	109
<b>Quadro 25</b>	– Módulo de elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR) em MPa – MOEd (ultrassom).....	111
<b>Quadro 26</b>	– Resumo comparativo dos resultados dos estudos relacionados.....	113

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGT	Adesivo a base de óleo de mamona
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ANS/APA PRG	<i>American National Institute/The Engineered Wood Association</i>
BLCe	Bambu laminado colado retirado da camada externa do colmo bambu
BLCi	Bambu laminado colado retirado da camada externa do colmo bambu
CCB	Borato de cobre cromatado
CLT	Cross Laminated Timber
CLTB	<i>Cross Laminated Timber and Bamboo</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
EPI	Emulsão Polímero Isocianato
FRF	Fenol – resorcinol – formaldeído
FSC	Sistema de Certificação Florestal
ISSO	International Standard Organization
MOE	Módulo de Elasticidade
MOEapp	Módulo de elasticidade aparente
MOEd	Módulo de elasticidade dinâmico
MOR	Módulo de Ruptura
MUF	Melanina – ureia – formaldeído
NBR	Norma Brasileira Registrada
PEFC	Programa para o Mútuo Reconhecimento de Sistemas de Certificação Florestal
PUR	Poliuretano
PVAc	acetato de polivinílico cross
SPIB	Southern Pine Inspection Bureau
UF	Adesivo Ureia – formaldeído

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>24</b>
2.1	O BAMBU .....	24
2.2	A MADEIRA – PINUS SPP .....	28
2.3	CLT – <i>CROSS LAMINATED TIMBER</i> .....	29
2.3.1	Sistema Construtivo <i>Cross Laminated Timber</i> – CLT .....	30
2.3.2	Vantagens e Benefícios do Sistema Construtivo <i>Cross Laminated Timber</i> – CLT.....	31
2.3.3	Processo de Produção dos Painéis dos CLT .....	33
2.3.4	Exemplos de Aplicações do CLT .....	34
2.3.5	Comportamento de estrutura de CLT em situação de incêndio.....	40
2.3.6	Metodologia de ensaio dos Painéis CLT .....	41
2.3.7	Comportamento Mecânico do CLT, uso da madeira de baixa classificação .....	46
2.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BAMBU .....	54
2.5	ADESIVOS .....	59
2.6	CLASSIFICAÇÃO VISUAL .....	68
2.6.1	Classificação Visual da Madeira .....	68
2.6.2	Classificação Visual do Bambu .....	72
2.7	CLASSIFICAÇÃO NÃO DESTRUTIVA POR ULTRASOM.....	73
2.8	A CLASSIFICAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DEVE SER FEITA EM CADA MATERIAL DISTINTO, SEPARADAMENTE .....	73
2.8.1	Classificação não – destrutiva para madeira .....	73
2.8.2	Classificação não – destrutiva do bambu .....	76
2.9	SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	77

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	82
3.1	CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS PEÇAS DE PINUS E BAMBU .....	83
3.2	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ADESÃO EM CORPOS DE PROVA DE CISALHAMENTO .....	84
3.2.1	Determinação do Teor de Umidade.....	84
3.2.2	Elaboração dos Corpos de Prova.....	85
3.2.3	Teste de Cisalhamento no plano de colagem.....	90
3.3	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE NO MATERIAL DE COMPOSIÇÃO DOS PAINÉIS .....	91
3.4	CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA NÃO DESTRUTIVA DAS PEÇAS DE PINUS E BAMBU .....	92
3.4.1	Ensaio de Ultrassom .....	92
3.4.2	Peças componentes .....	93
3.5	ENSAIOS DE FLEXAO .....	105
3.5.1	Ensaio de umidade em corpos de prova retirado do painel após realização do ensaio de flexão .....	106
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	107
4.1	RESULTADO DO TESTE DE COLAGEM ADESIVOS APÓS ENSAIO FLEXÃO.....	107
4.2	ENSAIOS DE FLEXÃO DOS PAINÉIS DE CLTB.....	110
4.3	MODO DE RUPTURA .....	114
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	116
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	119
	<b>APÊNDICE A</b> .....	126
	<b>APÊNDICE B</b> .....	127

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil a grande maioria das obras são feitas com o sistema convencional de alvenaria com tijolos de barro ou blocos de concreto estruturados com pilares e vigas em concreto armado ou em estruturas metálicas. A escolha pelo sistema construtivo convencional está ligada a fatores de cultura, a grande disseminação do conhecimento do sistema construtivo, ao valor econômico destes materiais, bem como, a facilidade de revenda do imóvel. Novos sistemas construtivos desenvolveram-se em todo o mundo. A madeira, de todos os materiais usados na construção civil, é o único material de construção de fonte renovável, cuja produção demanda baixo consumo energético, e sequestra carbono da atmosfera durante o crescimento da árvore (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010).

De acordo com Silva, Branco e Lourenço (2012), o perfil sustentável associado à madeira torna um forte aliado das recentes políticas ambientais que visam a diminuição das emissões de dióxido de carbono, sendo que a indústria da construção é responsável pela emissão de um terço do total das emissões de dióxido de carbono na atmosfera (PEREIRA, 2014). Neste sentido a construção civil tem buscado minimizar os custos de fabricação e redução do impacto ambiental das obras. Atualmente, normas ambientais estão cada vez mais rígidas; reforçando esta tendência para minimizar estes impactos da indústria da construção civil.

A sustentabilidade é requisito normativo em diversos setores, inclusive na construção civil. Busca-se, hoje, materiais renováveis que minimizem os impactos ambientais (NOGUEIRA, 2008) e possam contribuir para o conforto térmico e a redução do consumo de energia

Com o desmatamento e a pressão ambiental sobre as florestas tropicais, mostra-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de insumos renováveis utilizáveis na produção industrial. Busca-se, assim, a criação de soluções adequadas para a atenuação em parte os problemas decorrentes deste processo (NOGUEIRA, 2008). Uma infinidade de alternativas no desenvolvimento industrial obtém-se com a adoção de materiais alternativos, como por exemplo áreas plantadas como o “bambu” e derivados (MOIZES, 2007).

A utilização do bambu, na construção civil, vem crescendo, contribuindo para diminuição do desmatamento de florestas nativas, devido ao seu grande potencial, como planta tropical, perene e de grande desenvolvimento, pois cresce mais rápido, com ciclos mais curtos que a madeira e completa seu crescimento em poucos meses após surgimento do broto, em torno de três a seis meses. A partir do broto que pode atingir a altura máxima de trinta metros no caso das espécies denominada gigantes (Ex: *Dendrocalamus giganteus*) (PEREIRA; BERALDO 2008). Alcança sua altura máxima em trinta dias, espécies de pequeno porte, e cento e oitenta dias das espécies gigante desenvolvendo desde a brotação à fase adulta em pouco mais de três anos. O colmo nasce com o mesmo diâmetro que terá por toda a vida, e seus brotos se alongam continuamente com muita rapidez crescendo um metro por dia. Apresenta elevada produtividade por hectare, em média 8 colmos/touceira/ano, bem como grande capacidade de proteger o solo (PEREIRA; BERALDO, 2008). Além de sequestrar de forma eficientemente o carbono, tem baixo custo de manutenção desde o plantio até à fase adulta. Podem, ainda, revitalizar áreas degradadas e incrementar o sistema de reflorestamento em qualquer parte do Brasil. O clima brasileiro é propício para o desenvolvimento de uma grande quantidade de espécies. (PEREIRA; BERALDO 2008; PADOVAN, 2010). A colheita do bambu pode ser feita anualmente sem modificação do meio ambiente, pois, a paisagem ou a plantação continuará repleta de colmos mais jovens (PEREIRA; BERALDO 2008).

Não existe outra espécie florestal que consiga competir com a velocidade de crescimento do bambu, nem com o aproveitamento por área, além de não exigir replantio. (PEREIRA; BERALDO 2008).

As características físicas, químicas e mecânicas, em relação às suas propriedades estruturais e relações resistência/massa específica, rigidez/massa específica tem valores que superam as madeiras e o concreto, podendo nesse aspecto ser comparado ao aço (JANSSEN, 2000). O quadro 1 compara a resistência à tração média da parede do colmo do bambu com o aço (CARBONARI, G.; *et al*, 2016).

**Quadro 1** - Eficiência das espécies de bambu e do aço (Resistência à tração / Massa Específica)

<b>Material</b>	<b>Resistência a tração - (Mpa)</b>	<b>Massa específica ( g/cm 3 )</b>	<b>Resistência a tração/massa específica</b>
<i>D. giganteus</i>	119	0,75	159
<i>Bambusa oldhamii</i>	106	0,84	126
<i>Bambusa tulda</i>	125	0,78	160
<i>Bambusa nutans</i>	102	0,77	132
Aço	250	7,85	32

Fonte: CARBONARI, G.; *et al* (2016)

A relação entre resistência à tração e sua massa específica resultam em valores muito superior à do aço, de 4 a 5 vezes maior. Por isto pode ser considerado “aço vegetal”.

Em relação a madeira, o maior produtor de madeira de reflorestamento de pinus encontra-se no Paraná, e parte da madeira serrada é absorvida pela fábrica de papel e celulose, porém, uma parte da produção serrada normalmente é subutilizada e transformada através de empresas familiares em matéria prima de baixo valor agregado.

Como alternativa para utilização desta matéria-prima de pinus subutilizada e do bambu com suas potencialidades, encontra-se o sistema construtivo de madeira laminada cruzada – CLT (*Cross Laminated Timber*).

O sistema CLT foi primeiramente desenvolvido na Áustria e Alemanha nos anos de 1990; é composto por painéis estruturais, elaborados a partir da colagem de tábuas dispostas de forma perpendicular umas às outras. Neste sentido o CLT vem obtendo sucesso e ganhando mercado desde seu aparecimento; atualmente é o sistema construtivo em maior ascensão em países europeus. O uso do CLT e o sistema de construção associado a ele estabeleceu-se como uma nova técnica europeia de construção de madeira sólida e está em plena concorrência com o sistema *woodframe* até então mais utilizado e os sistemas tradicionais baseado em tijolos e concreto (BOGENSPERGER, AUGUSTIN e SCHICKHOFER, 2011).

O processo de fabricação do CLT consiste primeiramente em seleção da madeira, em seguida agrupamento da madeira por classe e usinagem, depois aplicação do adesivo e prensagem e, por fim, o corte e os ajustes.

Alguns itens são muito importantes no processo de fabricação do CLT

dentre eles estão a qualidade da madeira a ser empregada, a qualidade de colagem, assim como o nível de industrialização, além do manejo dos painéis no canteiro de obra.

De acordo com o contexto, pretende-se esclarecer a questão do desempenho estrutural de madeira de baixa densidade, resistência mecânica, no caso o pinus, unindo e associando as potencialidades do bambu, para a confecção de painéis estruturais.

Objetiva-se com este trabalho em CLT, sendo a partir de agora no texto denominado CLTB – *Cross Laminated Timber and Bamboo*, ou seja, Madeira e Bambu Laminado Colado Cruzado, fazer uma análise do desempenho estrutural dos painéis de CLTB composto com madeira (pinus) e bambu. Ainda como objetivos específicos pretende-se: a) Testar e avaliar a qualidade da colagem da madeira de pinus com bambu com vista na escolha do adesivo em corpo de prova sem defeito; b) Determinar a qualidade da colagem dos painéis; c) Avaliar a resistência à flexão dos painéis, e ver a possibilidade de ser utilizado estruturalmente.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 O BAMBU

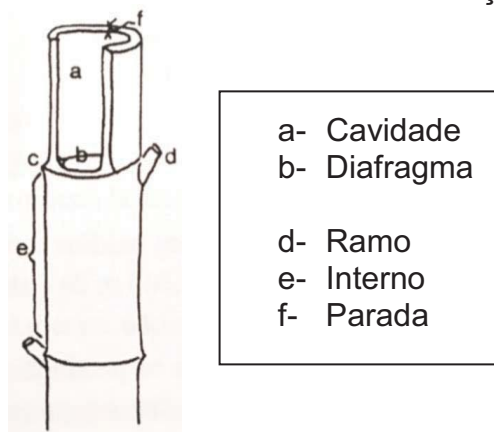
Conforme Nunes (2005), 50 gêneros e 1250 espécies de bambu estão distribuídas naturalmente entre as latitudes 46° Norte e 47° Sul, sendo encontradas em altitudes entre 0 e 4000 metros. Os bambus nativos crescem em todos Continentes, menos na Europa, sendo que 62% das espécies são nativas da Ásia, 34% e das Américas, o restante, 4% crescem na África e Oceania.

Dentre os vários tipos de bambus encontram-se desde espécies pequenas de 10 cm a 30m de altura, com diâmetro de a 0,5 a 5cm até espécies gigantes que podem atingir 30 metros de altura e diâmetros entre 10 a 30 cm.

Conforme Teixeira (2006), as espécies que são mais conhecidas de no Brasil são de origem asiática, trazidas pelos colonizadores. Os gêneros mais comuns encontrados e utilizadas na construção civil são: *Bambusa* e *Dendrocalamus* com crescimento de forma radial em forma de touceira, próximos um do outro e *Phyllostachys*, alastrantes, com crescimento descentralizado, desordenada propagando-se continuamente para os lados (MARÇAL, V.H., 2008). Para uso da construção civil, de edificações em geral utilizam-se os bambus que apresentam maior resistência, de médio a grande porte das espécies *B. tuldooid*, *D. giganteu*, *Phyllostachys sp.* e *Guadua sp.*

De acordo com Pereira e Beraldo (2008), as características do colmo do bambu classificam-no como uma planta lenhosa, monocotiledônea e pertencente à Angiosperma (semente protegida). Assim como as árvores, o bambu é constituído tanto por uma parte aérea e outra subterrânea. A parte aérea chamada de colmo é oca, enquanto a parte subterrânea é constituída de rizomas e raízes. O Colmo tem forma ligeiramente cilíndrica e dispõe de uma sequência de entrenós (internos) ocos separados transversalmente um dos outros por diafragmas que aparecem externamente como nós, de onde saem ramos e folhas (Figura 1). O diafragma fornece maior rigidez e resistência aos colmos, permitindo desta forma suportar a ação do vento e do próprio peso.

**Figura 1** - Secção de um colmo de bambu e suas denominações



Fonte: Pereira, Beraldo (JANSSEN, 1988)

O colmo do bambu nasce com o diâmetro vitalício, maior, perto da base diminuindo em direção a ponta (geometricamente um tronco de cone) (PEREIRA; BERALDO, 2008).

A parte externa do colmo é constituída por duas camadas de células epidérmicas coberta por uma camada cutinizada e com cera. Internamente tem-se uma camada mais espessa altamente lignificada constituída de inúmeras células esclerenquimáticas (feixe de fibras) dificultando qualquer movimentação lateral de líquidos. O colmo de um modo geral é composto de 50% de parênquima (menor resistência mecânica), 40% de fibra (maior resistência mecânica) e 10 % de tecido condutor. As fibras constituem o tecido esclerenquimático que é o responsável pela resistência mecânica dos colmos. A maior concentração das fibras encontra-se na camada externa da parede do colmo. A parte onde está localizada o parênquima apresenta a menor resistência mecânica, ou seja, a parte de maior resistência do bambu encontra-se na parte mais externa onde estão as fibras. Colmos jovens (de um a dois anos) são considerados imaturos com propriedades mecânicas inferiores aos colmos de três ou mais anos (PEREIRA; BERALDO, 2008).

Inúmeras espécies de bambu apresentam variações em relação à altura, diâmetro, espessura das paredes e espaçamento entre nós. Estas características influenciam no comportamento mecânico do bambu, merecem ser observadas antes de serem empregadas na construção (GHAVAMI, 1984).

O gênero *Dendrocalamus* apresenta colmos maiores e com paredes espessas e ótimo comportamento mecânico, ou seja, ótima resistência mecânica

além de um rápido crescimento (GHAVAMI, 1984).

Conforme Nascimento (1990), a espécie *D. giganteus* pode atingir até 36 m de altura, 25 cm de diâmetro com distância de um metro do solo, com fases de crescimento distintos: a primeira fase até chegar 5m de altura, quando o colmo chega a crescer 10cm em até 24 horas, a segunda fase cresce de 5 até 15 m de altura e o crescimento é de 30 cm em até 24 horas e a última fase cresce de 15m a 25m de altura e seu crescimento é de 15 cm em até 24 horas, depois destas fases o crescimento torna-se lento.

As condições atmosféricas, principalmente as chuvas influenciam as espécies. Lin (1968) considera que a espécie *D. giganteus* é uma espécie de grande porte, possui colmos entre 20 e 30 cm, diâmetro entre 20 e 30 cm, comprimento internodal entre 30 e 45cm e a espessura da parede pode variar entre 1 e 3cm. A parede de colmo é muito importante para o processo de manufatura das lâminas. Esta espécie é muito utilizada em construções em laminado colado de bambu, também na fabricação de polpa de papel, utensílios, cosméticos e alimentos.

Segundo Lima (NUNES 2005), compararam características mecânicas e físicas utilizando as espécies *D. giganteus* e *B. vulgaris*. Os valores médios de algumas propriedades físicas e mecânicas são apresentados no Quadro 2.

**Quadro 2 - Avaliação da resistência mecânica das espécies de bambu**

Espécie	Compressão	Tração	Flexão	Tração (MOE)	Inter nós	Diâmetro	Espessura
<i>D. giganteus</i>	77	115	152	11	0,55 - 0,65	0,12- 0,14	0,1-0,12
<i>B.vulgaris</i>	65	115	131	9	0,35 - 0,45	0,07- 0,08	0,06-0,08

Fonte: Lima (Nunes 2005) Os valores são apresentados em MPa para os ensaios de resistência à compressão, tração e flexão; em GPa para o ensaio de tração no módulo de elasticidade. Para os internos, diâmetro e espessura, a unidade usada foi metro.

De acordo com Ghavami (1989), as características mecânicas do bambu são influenciadas por diversos fatores como: espécie, idade, tipo de solo, época de colheita, condições climáticas, teor de umidade das amostras, localização das mesmas em relação ao comprimento do colmo, presença ou ausência de nós

nas amostras testadas e tipo do teste aplicado. Geralmente a região nodal apresenta menos resistência mecânica, comprovado por Lopez (1974) ao descrever que as amostras retiradas de nós de colmos das espécies *Phyllostachys* e *Arundinaria* apresentaram menores valores de resistência à tração em relação à região internodal.

Para uso estrutural ou quando se necessita colmos de maior resistência mecânica deve-se cortá-los com no mínimo três anos, devido ao amadurecimento de seus tecidos constituintes. Colmos maduros encontram-se mais ao centro, enquanto os mais imaturos estão mais na periferia do bambuzal. Colmos imaturos possuem maior teor de umidade do que os maduros, também apresentam umidade mais constante ao longo do colmo. Ao passo que, os colmos maduros apresentam a umidade decrescente em relação à altura. A superfície externa do colmo imaturo apresenta menor dureza do que nos colmos maduros. Colmos imaturos apresentam cor mais acentuada, ou mais forte que os colmos maduros, quase sempre, com manchas (PEREIRA; BERALDO 2008).

O bambu por sua estrutura biológica está sujeito a deterioração, quase sempre pela ação de fungos e insetos podendo ter uma vida útil entre um a três anos quando não tratado e entre dez a quinze anos, ou mais, quando tratado de forma adequada. A presença de amido é comprovadamente o ponto fraco do bambu por estar relacionado à incidência do ataque de carunchos. Quanto maior a presença de amido no bambu maior a probabilidade que o mesmo venha a sofrer o ataque de caruncho (PEREIRA; BERALDO, 2008).

A alta produtividade do bambu o diferencia de imediato de outros materiais vegetais estruturais. Possui resistência mecânica estrutural elevada, dois anos e meio após ter brotado do solo, não havendo nenhum concorrente neste aspecto no reino vegetal. A forma tubular acabada soma-se as características favoráveis que o bambu tem, além de ser estruturalmente estável, possuir uma baixa massa específica, uma geometria circular oca otimizada em termos da relação resistência pela massa do material. O conjunto de todas estas características confere ao material um baixo custo de produção, facilidade de transporte e trabalhabilidade possibilitando desta forma diminuição no custo das construções (GHAVAMI, 1989,1992; MOREIRA e GHAVAMI,1995).

Desta forma, o bambu pode ser uma alternativa como material de construção, substituindo integral ou parcialmente os materiais convencionais,

como a madeira, ou até mesmo ser usado juntamente com a madeira e contribuir para diminuição do desmatamento de florestas nativas (PADOVAN, 2010). Juntamente com a pesquisa pode-se incentivar novas tecnologias de utilização do bambu como material de construção de qualidade por meio de um novo sistema construtivo denominado *Cross Laminated Timber* associado ao bambu, e promover o bem-estar humano em um ambiente com edificações sustentáveis.

## 2.2 A MADEIRA – PINUS SPP

Conforme IBÁ (2014), o plantio arbóreo atingiu 7,6 milhões de hectares, teve um aumento de 2,8% comparado ao ano de 2012. Entre as espécies plantadas estão, a teca e o paricá, além do plantio de árvores para os fins industriais possibilitando maior benefício quanto a sustentabilidade, econômica, social e ambiental através do plantio de florestas com o objetivo de se obter recursos madeireiros, para fins sociais e ambientais como no auxílio ao controle do efeito estufa e recuperação de áreas degradadas. (ABRAF, 2013). Dentre as espécies mais plantadas no Brasil estão o eucalipto com 5.102.030 ha e o pinus com 1.562.782 ha, de acordo com o anuário da ABRAF (2013) e Figura 2.

**Figura 2** - Plantios florestais de Eucalipto e Pinus respectivamente nos estados do Brasil, 2012



Fonte: Associadas individuais e coletivas da ABRAF (2013)

Encontram-se mais de 100 espécies do gênero *Pinus* e, há mais de um século vem sendo plantada no Brasil. A partir dos anos 60 iniciou-se o plantio em escala industrial em sua maioria no Sul e Sudeste do país, sendo utilizado, pelas indústrias de celulose de papel, laminadas, chapas, serrarias e de resinas. (AGUIAR *et al.*, 2014)

De acordo com Moura et al (2013), o Estado do Paraná é um dos principais produtores florestais de *Pinus spp.* do país. O maior centro de produção localiza-se no município de Telêmaco Borba, onde está instalada a fábrica Klabin de papel e celulose, que absorve grande parte da produção local. A matéria subutilizada, é direcionada para a fabricação de componentes, cabos de ferramentas e para construção civil, ou ainda, para a utilização como formas temporárias para estrutura de concreto de vigas, lajes ou até mesmo utilizadas como escoras na construção civil.

A fabricação de componentes, como por exemplo, cabos de ferramentas geralmente é feita por empresas familiares através de processo rudimentar de industrialização, com tecnologia de processamento primário e de baixo rendimento; em consequência boa parte da matéria-prima que entra na linha de produção sai em forma de produto com baixo valor agregado e em forma de rejeito, que são resultantes dos recortes de tábuas ou parte central do tronco.

Esses recortes, peças com comprimento inferior a 120 cm, são geralmente compostos por madeira de alta qualidade originários de toras de seis metros, que por questões de gestão da produção de madeira serrada são destinadas também para lenha (MOURA *et al.*, 2007).

### 2.3 CLT – CROSS LAMINATED TIMBER

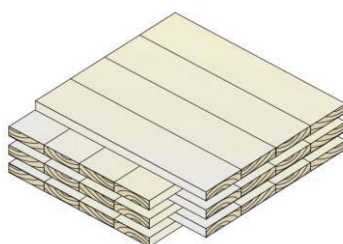
Os *Cross Laminated Timber* – CLT, conhecidos, como madeira laminada cruzada, são painéis produzidos a partir da justaposição de várias camadas transversalmente (em noventa graus) coladas por meio de adesivo estrutural, formando uma placa maciça com características estruturais (FPINNOVATIONS, 2013).

### 2.3.1 SISTEMA CONSTRUTIVO *CROSS LAMINATED TIMBER* – CLT

O *Cross Laminated Timber* é um compósito formado por madeira e um adesivo, que devido a sua característica de cruzamento das camadas apresenta a rigidez semelhante às placas de concreto armado. O sistema construtivo é baseado na utilização de painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada como elemento estrutural principal, tanto para as paredes, quanto para as lajes e pisos e, as conexões entre estes elementos são feitas através de parafusos autoatarraxantes desenvolvido para este tipo de aplicação, o que facilita e reduz o tempo de montagem (PEREIRA, 2014).

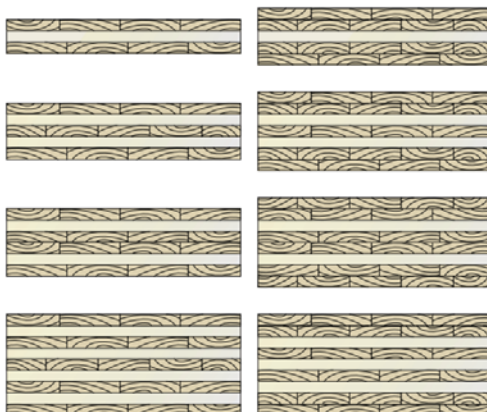
De acordo com *FPIinnovations* (2013), uma secção transversal de um painel de CLT deve ter no mínimo três camadas coladas, alternando a orientação para as camadas adjacentes. Os painéis de CLT são produzidos em camadas ímpares e pares com mínimo de três camadas (Figura 3) e (Figura 4).

**Figura 3** - Configuração do Painel de CLT



Fonte: *FPIinnovations* (2013) *CLT Handbook*

**Figura 4** - Exemplo de Secções Transversais do CLT



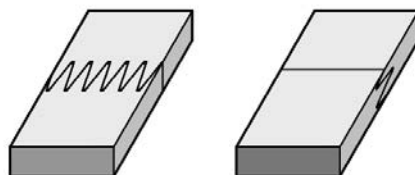
Fonte: *FPIinnovations* (2013) *CLT Handbook*

De acordo com *FPIinnovations* (2013), as espessuras das peças de

madeiras serradas individuais podem variar de 5/8 polegada para 2,0 polegadas (16 mm a 51 mm) e, a largura pode variar de cerca de 2,4 polegadas para 9,5 polegadas (60 mm a 240 mm), ou seja, não pode ser inferior a 16mm e não superior a 51mm. A variação da espessura das peças deve ficar entre 0,2mm a 0,3mm para garantir qualidade da linha de cola.

As dimensões dos painéis são apenas limitadas por regulamentos de transporte. As larguras dos painéis de CLT variam em geral de 600 a 3000 mm. Para compor painéis com dimensões maiores ao do comprimento das tábuas, deve-se fazer emendas de topo do tipo *finger joint* (Figura 5), tipo de encaixe entre dois elementos de madeira (FPINOVATIONS, 2013).

**Figura 5** - Encaixe *finger joint* entre duas tábuas de madeira



Fonte: Brander (2012)

### 2.3.2 VANTAGENS E BENEFÍCIOS DO SISTEMA CONSTRUTIVO CROSS LAMINATED TIMBER – CLT

De acordo *FPInnovations* (2013), as excelentes propriedades de resistência do CLT estão relacionadas à sua composição interna maciça composta por camadas sobrepostas, sendo esta, a característica principal dos painéis de CLT, garantia de um bom desempenho em todas as direções, sendo considerado um elemento isotrópico estrutural, permitindo desta forma uma distribuição de carga de forma bidirecional e, possibilitando o uso tanto em elementos estruturais (piso e cobertura) quanto em vedações verticais, além de promover uma maior estabilidade dimensional (RIVERA, 2012). A elevada capacidade de carga do painel de CLT, em conjunto com o reduzido peso próprio permite elementos de elevada *esbeltez*, mesmo para vãos de grandes dimensões. Comparado a outros sistemas construtivos, o CLT oferece novas possibilidades de transferência de carga bidirecional, diferente dos sistemas de pórticos em que as transferências de carga são unidirecionais; possibilita-se com

este sistema criar grandes vãos com maior rigidez e estabilidade dimensional como já foi descrito anteriormente.

O CLT confere algumas vantagens de acordo com da fabricante de CLT *Crosslam*:

- Quanto ao tempo de montagem: as grandes dimensões (painéis de até 12m de comprimento por 3m de largura) reduzem tempo de montagem e consequentemente custos de construção.

- Quanto à estrutura: O CLT é utilizado para painéis de lajes e paredes permitindo a construção de edifícios de múltiplos pavimentos. Também pode ser combinado com outros materiais. O CLT pode ser utilizado de forma exclusiva como estrutura e vedação ou associado a outros elementos como concreto e aço no caso de prédios de mais de dois elementos (ALENCAR, 2015). Os painéis de CLT formam um sistema de construção robusto, estruturalmente rígido e forte equiparando-se a qualquer outro material à base de concreto, aço ou alvenaria tradicional, apresentando desta forma baixo peso em relação ao aço e ao concreto, requerem fundações menos robustas comparadas às construções convencionais, além de prevê também estabilidade dimensional superior com resistência ao cisalhamento maior em comparação a outros materiais estruturais.

Quanto ao processo produtivo (cortado, fresado e usinado) é feito por um poderoso pórtico CNC (*Computer Numeric Control*), em regime CAD/CAM, o que possibilita maior precisão da indústria mecânica para o novo ambiente da arquitetura e engenharia, permitindo muito a compatibilização das várias camadas do projeto

- Quanto ao meio ambiente: O sistema construtivo de CLT confere uma redução expressiva de resíduos na produção nos canteiros e menores utilização de água, possibilitando uma construção seca, portanto menos poluente quando comparados a outros materiais. Além disto a madeira é o material na construção estrutural totalmente de fonte renovável, com baixo consumo de energia para sua produção quando comparado a outros materiais na construção. Sendo benéfica para o meio ambiente pois, sequestra CO<sub>2</sub> na fase de crescimento da árvore, auxiliando, desta forma, no combate ao efeito estufa. Por outro lado, ajudam na preservação das florestas tropicais nativas com os programas de certificação de terceiros, tais como PEFC ou FSC, no sentido de verificar se os

produtos são provenientes de áreas agrícolas, reflorestadas. Como resultado consegue-se a conservação da diversidade biológica, manutenção dos solos, recursos hídricos e manutenção da capacidade produtiva dos ecossistemas florestais.

Quanto ao isolamento térmico: O CLT é usado em construções energeticamente eficientes, devido a madeira apresentar bom desempenho quanto ao isolamento térmico, acústico e um bom comportamento face ação do fogo

Conforme *FPIInnovations* (2013), o desenvolvimento do CLT iniciou em Lausanne e Zurique no início da década de 90. Durante vários anos o progresso foi lento, mas a partir do ano de 2000, construções com CLT aumentaram drasticamente, acionado pelo movimento “prédio verde” com melhor eficiência, comercialização e canais de distribuição. Os países líderes na utilização da CLT são: Áustria, Alemanha, Suíça, Suécia, Noruega e o Reino Unido.

O CLT é amplamente difundido na Europa Central onde sua produção de 1996 até 2008 teve um crescimento de 860% na Europa, sendo 63% da produção concentrada na Áustria (PASSARELLI, 2013). Na Europa central a produção de CLT é a segunda mais importante dentre os produtos beneficiados de madeira

### 2.3.3 Processo de Produção dos Painéis dos CLT

Conforme Silva (2016), o processo de produção dos painéis de CLT consiste, primeiramente em escolher cuidadosamente a madeira, respeitando os requisitos técnicos de secagem exigidos pelas normas e, em seguida passa por um tratamento preservativo, contra organismos *xilófagos*. Os painéis são fabricados com madeira seca de acordo com a norma ANSI/APA PRG 320 (2012), em torno de 12% de umidade com variação de mais ou menos 2%, para evitar o ataque de fungos e retração e expansão da madeira, ou seja, variações dimensionais. Na produção de painéis, são aceitos diferentes tipos de madeiras, desde que, as características estejam de acordo como os limites normativos exigidos para as características mecânicas. Em seguida realiza-se a classificação visual eliminando nós, trincas, arqueamento, curvatura, torção da

peça e etc. que podem afetar o poder de colagem das peças e a resistência na linha de cola. Promove-se, também, a classificação mecânica não destrutiva; em seguida, as peças são aparelhadas e aplainadas removendo-se uma fina camada para a abertura dos poros para receber o adesivo de forma mais adequada. A colagem é feita com a utilização de resina preferencialmente isenta de solventes orgânicos voláteis e formaldeído evitando a produção de odor, para não causar risco à saúde. Após este processo o painel é prensado. O tempo de prensagem decorre em função do tipo de adesivo utilizado, atendendo às normas do fabricante (SILVA, 2016).

O tipo de prensa depende do tipo de adesivo utilizado, e pode ser de dois tipos: prensa a vácuo ou prensa hidráulica com pressão de 1MPa. A prensa a quente tem como finalidade acelerar o processo de secagem do adesivo e diminuir o tempo de produção.

Após a prensagem o painel passa pelo processo de acabamento com plainas e lixas para posteriormente passar pela usinagem para definir cortes nos tamanhos exatos desejável, através de serras controladas numericamente por computador (CNC) para garantir qualidade e precisão do produto final.

Segundo a norma ANSI/APA PRG 320 (2012), é permitida a combinação de diferentes espécies de madeira num mesmo painel, cada camada do painel de CLT deve ser composta por uma única espécie de madeira para evitar diferenças quanto às propriedades físicas e mecânicas.

De acordo com *FPInnovations* (2013), a qualidade da madeira determina o bom desempenho do painel, além do controle dos parâmetros que impactam na qualidade da linha de cola.

#### 2.3.4 Exemplos de Aplicações do CLT

Alguns exemplos construtivos com CLT. O primeiro exemplo é uma residência unifamiliar, construída para uma família na Áustria (Figura 6).

**Figura 6** - Edificação construída em CLT – *Single-Family house* in Klagenfurt, Áustria (KLH, 2008)



Fonte: *FPIinnovations (2013) CLT Handbook*

Outro exemplo de construção integral em CLT (Figura 7) é o edifício *Murray Groove Stadthaus*, (2009) em Londres, que foi construído com 9 pavimentos, em 28 dias com apenas 4 carpinteiros e um operador de guindaste (PASSARELLI, 2012).

**Figura 7** - *Staudhaus*, em Londres, *Murray River Grove* distrito de habitação do Reino Unido (KLH, 2009)



Fonte: *Trada Technology (2009)* (esquerda) e *FPIinnovations (2013) CLT Handbook* (direita)

A sede Juwi na Alemanha também foi construída com CLT (Figura 8). Segundo *FPIinnovations (2013)* os painéis de CLT podem ser utilizados tanto internamente como externamente. Para utilização destes painéis de forma aparente, as tábuas que vão na composição destes painéis devem apresentar menos nós possível para ter uma qualidade estética, porém para uso externo os painéis devem ser tratados com protetores contra a umidade.

**Figura 8** - Sede Juwi, Wörrstadt, Alemanha (Binderholz ,2009)



Fonte: *FPInnovations (2013) CLT Handbook*

A montagem de paredes, lajes por encaixe reduz a possibilidade de erros durante o processo de montagem dos painéis, (Figura 9). Por ser feito praticamente a “seco” permite quase que simultâneo, a instalação de outros sistemas técnicos e aplicação de revestimentos interiores e exteriores, tornando o processo mais rápido e eficiente. Pode-se notar, ainda, a exigência de área mínima de estaleiro, necessitando de equipamentos com pouco ruídos, de pouca produção de pó, minimizando o impacto negativo da construção, perante as comunidades vizinhas.

**Figura 9** - Processo de montagem dos painéis de CLT em obra



Fonte: *FPInnovations (2013) CLT Handbook*

**Figura 10** - Construção multifamiliar in Judenburg, Áustria



Fonte: *FPIinnovations (2013) CLT Handbook*

**Figura 11** - Construção multifamiliar in Judenburg, Austria

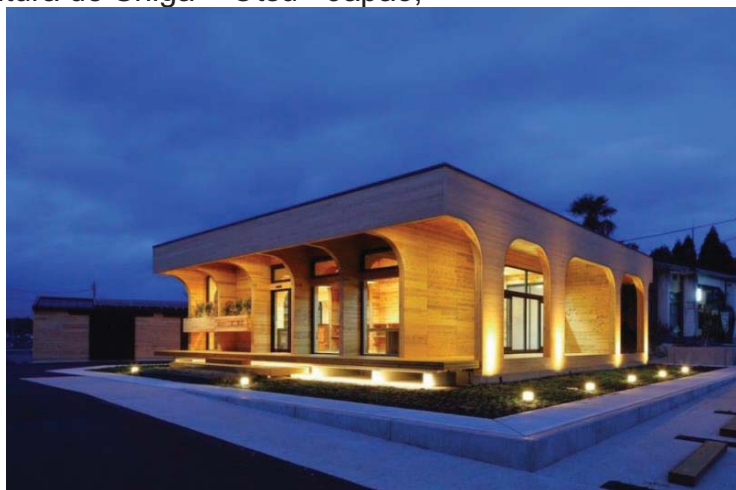


Fonte: *FPIinnovations (2013) CLT Handbook*

De acordo com Silva (2016) todo sistema construtivo tem suas vantagens e desvantagens, porém o sistema construtivo com painéis de CLT, é hoje, uma alternativa das mais vantajosas devido suas características de industrialização rápida, alta produtividade, eficiência e sustentabilidade.

Prefeitura de Shiga, no Japão, edifício de escritórios de quase 140 metros quadrados abriga espaços de trabalho aconchegantes e acolhedores com aberturas em arco construída em CLT.

**Figura12** – Prefeitura de Shiga – Otsu - Japão,



Fonte: <https://inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2017/03/Santo-CLT-Office-by-Junichi-Kato-Associates-4-1020x610.jpg>

**Figura13** – Laje de cobertura construída em CLT



Fonte: *FPIinnovations* (2011) *CLT Handbook*.

Pavilhão em CLT construído para a Expo Milão de 2015 pelo escritório Equilibrium (FIGURA 14).

**Figura14** – Laje de cobertura construída em CLT



Fonte: <https://www.arcoweb.com.br/noticias/noticias/segunda-edicao-do-evento-arranha-ceu-em-madeira-sera-no-iab>

Duas torres batizadas de “Silva” e “Hyperion” serão os primeiros edifícios de grande altura, executados em CLT, construídos na França. Com 50 e 57 metros de altura, respectivamente, ficarão localizados na zona de Belvedere, em Bordeaux. As duas torres, serão construídas pela *Eiffage* e *Kaufman & Broad*, com previsão de término em 2020.

**Figura15** – Torres Silva e Hypérion em CLT a serem construídas e concluídas até 2020



Fonte: <http://maisumaengenharia.blogspot.com/2016/03/avanca-construcao-dos-primeiros.html>

O CLT também pode ser utilizado para confecção de mobiliário, conforme figura 16.

**Figura16** - Mobiliário Cafeteria em Campinas -SP



Fonte: <http://www.crosslam.com.br/home/?q=content/mobili%C3%A1rio-para-cafeteria> (2018)

Outra aplicação do CLT são criação de Stands, criados para Casa cor de Minas Gerais em 2016 conforme figura 17.

**Figura 17** - Inhotim Box, que é Módulo feito para casa cor Minas Gerais 2016



Fonte: <http://www.crosslam.com.br/home/?q=content/inhotim-box> (2018)

### 2.3.5 Comportamento de estrutura de CLT em situação de incêndio

Pelo fato das madeiras serem combustíveis, muitas pessoas acham

erroneamente que edifícios de madeira se comportam mal em incêndio. Peças de madeiras de grandes dimensões têm a capacidade inerente de proporcionar resistência ao fogo, devido às propriedades de carbonização da madeira. Queima lentamente e forma uma camada de carvão. Os painéis de CLT podem proporcionar excelente resistência ao fogo (CLT *Handbook*, 2013)

Uma estrutura de CLT pode ser projetada para resistir a chama intensa por 120 min sem o seu comprometimento estrutural, por se tratar de um elemento de muita massa, cria uma camada de carbono que trabalha como uma barreira ao oxigênio, impedindo assim a continuidade da combustão de acordo com fabricante Crosslam. Desta forma, conjunto de CLT pode proporcionar excelente resistência ao fogo. (CLT *Handbook*, 2013).

### 2.3.6 Metodologia de ensaio dos Painéis CLT

A norma americana ANSI/APA PRG 320 (2012), fornece requisitos e métodos de ensaio para a qualificação e garantia de qualidade do CLT que é fabricado a partir de madeira serrada ou composto estrutural. Esta norma estabelece valores mínimos de esforços para a capacidade estrutural do CLT, que são obtidos através de testes mecânicos em corpos de prova. Os testes são de rigidez, de resistência à flexão, de cisalhamento, compressão e tração.

O ensaio de flexão permite obter o Módulo de elasticidade aparente  $MOE_{app}$ , de acordo com ASTM 198 (2015) através da seguinte equação, para *third point loading*.

$$MOE_{app} = \frac{23 PL^3}{108 bh^3 \Delta}$$

Onde:

$MOE_{app}$  – módulo de elasticidade aparente (MPa)

P – carga em (N)

L – vão livre (mm)

$\Delta$  – deslocamento ou flecha final (mm)

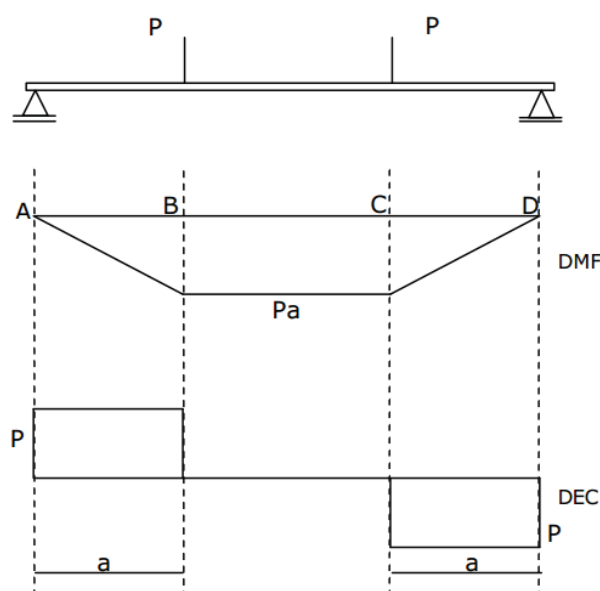
b – largura da secção transversal (mm)

h – altura da secção transversal (mm)

O ensaio de flexão é realizado para determinar a resistência e rigidez do painel.

A norma NBR 7190 (1997) fornece também requisitos e métodos para o ensaio para determinação da resistência à flexão, o carregamento deverá ser monotônico crescente, com uma taxa de 10 MPa/min. Aumenta-se o carregamento até que atinja um valor que rompa o corpo de prova, permitindo desta forma, em uma mesma peça, a flexão pura (sem a presença do cisalhamento no trecho BC e da flexão (com a presença do cisalhamento) nos trechos AB e CD, (CONSORTE ,2012). (Figura 18)

**Figura 18** - Idealização estrutural. Diagramas de Momento Fletor e Esforço Cortante



Fonte: Consorte ( 2012)

A resistência da madeira à flexão ( $f_{wM}$  ou  $f_M$ ) é um valor convencional, dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova no ensaio de flexão simples, calculado com a hipótese de a madeira ser um material elástico, sendo dado por:

$$f_M = \frac{M_{\text{máx}}}{W_e}$$

onde:

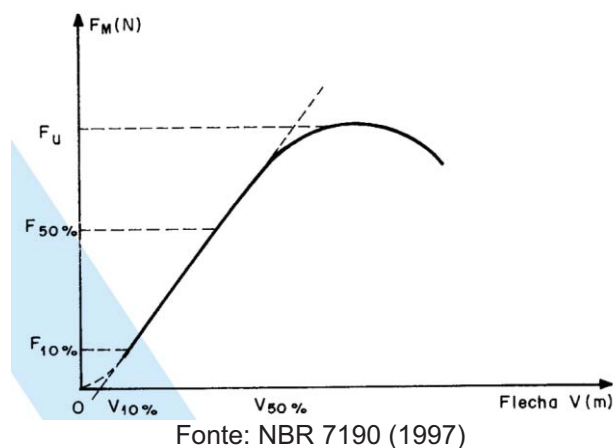
$f_{M,K}$  é o valor característico da resistência convencional à flexão

$M_{\text{máx}}$  é o máximo momento aplicado ao corpo-de-prova, em newtons-metro;

$W_e$  é o módulo de resistência elástica da seção transversal do corpo-de-prova, dado por  $bh^2/6$ , em metros cúbicos.

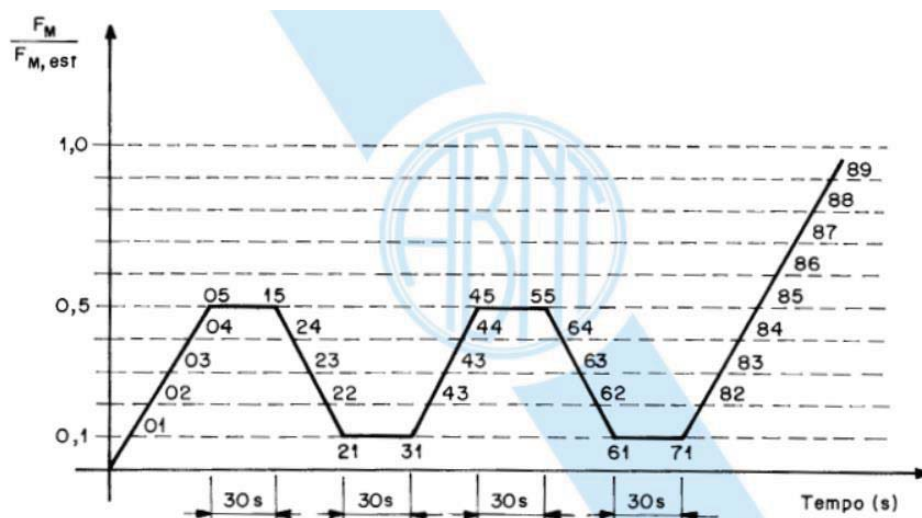
A rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado no trecho linear do diagrama carga x deslocamento, indicado na figura 19.

**Figura 19** - Diagrama carga x flecha na flexão



A rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade estático determinado no trecho linear do diagrama carga x deslocamento, indicado na figura 20. Para esta finalidade o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga x deslocamento no meio do vão, definida pelos pontos  $(F_{10\%}; v_{10\%})$  e  $(F_{50\%}; v_{50\%})$  correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da carga máxima de ensaio estimada por meio de um corpo-de-prova gêmeo, sendo dado por:

Figura 20 - Diagrama de carregamento para determinação da rigidez à flexão



Geralmente, determina-se o módulo de ruptura, utilizando o momento de flexão que provoca a ruptura. Nesta norma, o módulo de ruptura é calculado utilizando o máximo de momento fletor em carga máxima  $P_{max}$ , suportadas pelo modelo, apesar da ruptura não ocorrer sempre em carga máxima e não necessariamente na zona de momento máximo (especialmente sob carga de madeira) no ponto central.

O módulo de ruptura - MOR segundo ASTM 198 (2015), é a medida da capacidade de transporte de carga máxima de uma peça em flexão, para *third point loading*.

$$MOR = \frac{P_{max} L}{bh^2}$$

Onde:

MOR – Módulo de ruptura  
 $P_{max}$  – força máxima aplicada  
 L – vão livre  
 b – base  
 h – altura

A partir deste ensaio, obter-se-á o MOE e o MOR em cada painel. Estes valores serão colocados em um quadro para análise e comparado com valores estipulados pela norma Internacional para análise se estes painéis de CLTB

poderão ser utilizados com estrutura.

A norma ANSI/APA PRG 320 (2012) estipula os valores para módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) para painéis com espécies de madeira americana e canadense (*Spruce-pine-fir*, *Douglas-fir-Larch* e *Eastern Softwoods*). E estas espécies foram avaliadas através de classificação visual (V) e classificadas de forma visual e mecânica não destrutiva (E), obtendo-se assim, os valores de compressão e cisalhamento, nas duas direções das fibras, perpendicular e paralela ao eixo principal. Os valores mínimos para Módulo de elasticidade e Módulo de ruptura para painéis CLT estão mencionados na Quadro 3 a seguir. Estes valores são referentes aos esforços de cargas aplicadas no sentido longitudinal do painel

**Quadro 3** - Força especificada e nos módulos de elasticidade (a, b, c) para CLT (utilização no Canadá)

<b>Sentido de força – eixo maior</b>						
<b>CLT grades</b>	<b>MOR<sub>b,0</sub> (MPa)</b>	<b>MOE<sub>0</sub> (MPa)</b>	<b>MOR<sub>t,0</sub> (MPa)</b>	<b>MOR<sub>c,0</sub> (MPa)</b>	<b>MOR<sub>v,0</sub> (MPa)</b>	<b>MOR<sub>s,0</sub> (MPa)</b>
<b>E<sub>1</sub></b>	28.2	11,700	15.4	19.3	1.5	0.50
<b>E<sub>2</sub></b>	23.9	10,300	11.4	18.1	1.9	0.63
<b>E<sub>3</sub></b>	17.4	8,300	6.7	15.1	1.3	0.43
<b>V<sub>1</sub></b>	10.0	11,000	5.8	14.0	1.9	0.63
<b>V<sub>2</sub></b>	11.8	9,500	5.5	11.5	1.5	0.50
<b>Sentido de força – eixo menor</b>						
<b>CLT grades</b>	<b>MOR<sub>b9,0</sub> (MPa)</b>	<b>MOE<sub>90</sub> (MPa)</b>	<b>MOR<sub>t,0</sub> (MPa)</b>	<b>MOR<sub>c,0</sub> (MPa)</b>	<b>MOR<sub>v,0</sub> (MPa)</b>	<b>MOR<sub>s,0</sub> (MPa)</b>
<b>E<sub>1</sub></b>	7.0	9,000	3.2	9.0	1.5	0.50
<b>E<sub>2</sub></b>	4.6	10,000	2.1	7.3	1.9	0.63
<b>E<sub>3</sub></b>	4.5	6,500	2.0	5.2	1.3	0.43
<b>V<sub>1</sub></b>	4.6	10,000	2.1	7.3	1.9	0.63
<b>V<sub>2</sub></b>	7.0	9,000	3.2	9.0	1.5	0.50

Fonte: *FPIInnovations (2013) CLT Handbook*

Para SI: 1 MPa = 145 psi, onde: CLT grades – espécie de madeira *Spruce-pine-fir*, *Douglas-fir-Larch* e *Eastern Softwoods*, E – classificação visual e mecânica não destrutiva, V – classificação visual,  $f_{b0}$  - Módulo de Ruptura,  $E_0$  - Módulo de Elasticidade

Note-se que na Quadro 3 há uma diferença bem expressiva entre o módulo de ruptura e as peças classificadas visualmente V1 = 10MPa e peças classificadas de forma visual e mecânica não destrutiva E1 = 28,2 MPa para a mesma espécie, o que já não ocorre em relação ao módulo de elasticidade, para V1 = 11,000 MPa e E1 = 11,700 MPa (ALENCAR, 2015).

No trabalho, as normas utilizadas ASTM 198 (2015) que determinam metodologia para o teste de flexão, que determina valores mínimos de MOR e MOE para painéis constituídos de madeira de pinus; a NBR 7190 (1997); o manual de Classificação desenvolvido por (MOURA *et al* 2012); a norma ASTM D 245 (1993) para a classificação visual das peças de madeira, norma AITC 405 especifica adesivos que devem ser utilizados para painéis de CLT.

### 2.3.7 Comportamento Mecânico do CLT, uso da madeira de baixa classificação

O estudo desenvolvido por Baño *et al* (2016) propôs uma primeira avaliação das propriedades dos painéis CLT fabricados com pinho local do Uruguai (*Pinus taeda e elliottii*), usando madeira de desbaste que normalmente apresentam baixas propriedades mecânicas. Os painéis foram mecanicamente testados, determinando-se assim, as propriedades mecânicas.

Por não haver uma indústria especializada na fabricação dos painéis de CLT no Uruguai, adotou-se uma metodologia de acordo com critérios não normatizados.

No pátio de uma serraria localizada no norte do Uruguai, as placas foram obtidas a partir de desbaste de pinus, sem a utilização da técnica *finger joint* e foram classificadas segundo critérios não normalizados de classificação de madeira segundo os autores Baño. V. *et al*, 2016. As tábuas foram fixadas pelas arestas com adesivo não estrutural para facilitar a fabricação. O adesivo não estrutural foi aplicado entre as camadas antes da prensagem. Foram fabricados quatro painéis de 2,4m de comprimento e 1,2m de largura, combinando diferentes número de camadas (3 e 5) e a espessura da camada (33mm e 45mm), variando a espessura total entre 99mm e 177mm. (Quadro 4). A partir da classificação visual de 24 espécies (não especificadas) com secção transversal

média de 37x127mm e 2,4 m de comprimento, com umidade entre 10,5 e 13,2% foram testadas em flexão de acordo com a norma CSN EN 408 (2016).

**Quadro 4** - Número e dimensões das amostras avaliadas

	Quantidade	Dimensões
Madeira serrada	24	37x127x2400mm <sup>3</sup>
Painel de CLT	1	99x360x2400mm <sup>3</sup>
	2	165x360x2400mm <sup>3</sup>
	1	177x360x2400mm <sup>3</sup>

Fonte: Baño V. *et al* (2016)

Os resultados que estes autores obtiveram nos ensaios de flexão e ruptura realizados nos painéis de CLT (Quadro 5), foram:

**Quadro 5** - Resultados das propriedades mecânicas e físicas da madeira serrada

Propriedades	Valor médio
MOE <sub>0</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	6328
MOR <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	25,80
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	440
Percentil 5	
MOR <sub>05</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	12,80

Fonte: Baño (2016) MOE<sub>0</sub> - módulo de elasticidade; MOR<sub>m</sub> força de ruptura; ρ densidade

O Módulo de elasticidade da madeira serrada utilizada nos Painéis CLT comerciais internacionais varia entre 8000 e 12000 MPa, enquanto que a madeira serrada no Uruguai atinge um valor médio próximo de 6.000 MPa (Quadro 5), bem abaixo dos parâmetros indicados na norma. Isso ocorre porque a madeira do desbaste normalmente contém uma grande porcentagem de madeira juvenil. A resistência à flexão característica do pinheiro uruguaio ficou próximo dos 13 N/mm<sup>2</sup>, inferior à resistência mínima Classe (C14) definida na CSN EN 408 (2016). O tipo de madeira selecionada para fabricar um painel de CLT, a sua maturidade e classificação é de extrema importância para alcançar padrões definidos pela norma ANSI/APA PRG 320 (2012).

No estudo desenvolvido por Concu *et al* (2014), foram fabricados 15 painéis de CLT com 5 camadas. Nas 3 camadas longitudinais foram utilizadas peças com melhores valores de classificação (classificação visual e não destrutiva) de Pinus comum na região da Itália, já nas 2 camadas no sentido

transversal foram utilizadas peças com menores valores de classificação não destrutiva e com maior número de nós. O resultado médio do Módulo de elasticidade dinâmico foi de 8,380 MPa, com densidade de 0,49g/cm<sup>3</sup>. Os resultados obtidos através dos ensaios de flexão e ruptura realizados com os painéis de CLT foram: quanto ao MOE foi de 7,91 MPa e para o módulo de ruptura o valor foi de 26,1 MPa. De acordo com os autores estes valores seriam maiores se não houvessem a incidência de nós nas tábuas (Figura 21) pois, notou-se a ruptura dos painéis no alinhamento dos nós.

**Figura 21** - Modo de falha do painel CLT em correspondência de nós (à esquerda) e ao alinhamento de nós (à direita).



Fonte: Concu *et al* (2013)

Sigrist *et al* (2014) desenvolveram um estudo com recortes e peças de madeira com baixa classificação mecânica (não destrutiva) e visual da espécie australiana *Pinus radiata*, na composição de 70 painéis de CLT em diferentes posicionamentos de camadas, com objetivo de tentar igualar aos requisitos de resistência e de rigidez do CLT europeu, para uso estrutural de acordo com as normas europeias.

Determinaram 4 grupos diferentes para elaboração destes painéis para a espécie *Pinus radiata* proveniente de diferentes regiões do tronco e selecionadas através de classificação visual e não destrutiva. Os dois primeiros grupos foram elaborados com peças não estruturais. Primeiro grupo: peças sem classificação com valores médios de MOE de 7700 MPa, segundo grupo: classificados visualmente para eliminação de maior número de nós e rachaduras, com MOE médios de 12000 MPa. Os outros 2 grupos restantes com peças provenientes de regiões mais densas do tronco denominada de MGP12; o terceiro grupo com peças classificadas visualmente e mecanicamente apresentou valores médios de MOE de 35000 MPa e o quarto grupo apresentou

MOE médio em torno de 27000 MPa para peças não classificadas. Foram elaborados painéis com 3,5, e 7 camadas.

Painéis com 3 camadas compostos por peças não estruturais de *Pinus radiata* obtiveram o MOR de 25,5 MPa e MOE de 6251 MPa. Com a utilização destas mesmas peças classificadas visualmente obtiveram o valor do MOR de 55,4 MPa e MOE de 8066 MPa.

Através deste estudo observou-se que os melhores resultados foram com peças de madeira classificadas visualmente e mecanicamente denominadas de MGP12, com o MOR de 53,1 MPa e MOE de 12567 MPa. Os autores concluíram assim, que peças provenientes de regiões menos densas e sem um processo de classificação podem ser utilizadas somente em camadas transversais dos painéis, que são as camadas menos solicitadas mecanicamente.

O estudo desenvolvido por Wang *et al* (2014) avaliaram 5 tipos de combinações de painéis de CLT desenvolvidos com 3 camadas e com 3 tipos de espécies diferentes: *Populus euroamericana*, *Pinus radiata* e *Douglas fir*, e, com densidades de 0,41, 0,45 0,47, g/cm<sup>3</sup> respectivamente e colados com adesivo poliuretano (PUR) com as dimensões de 2,1m de comprimento por 1 m de largura. Os defeitos encontrados nas peças da espécie *Populus euroamericana* e na *Douglas fir* foram retirados para que ficassem com o comprimento final desejado, após a retirada dos defeitos, estas peças foram unidas através de *finger joint*.

Dos 5 tipos de painéis, três foram fabricados utilizando a espécie *Populus euroamericana* nas camadas transversais e dois tipos foram com as espécies *Pinus radiata* e *Douglas fir* nas camadas longitudinais e uma camada intermediária com esta a espécie *Douglas fir*. As outras combinações foram inteiramente elaboradas utilizadas com as espécies *Pinus radiata* e *Douglas fir*. Os resultados deste estudo mostram que os valores de MOR e MOE mais expressivos foram para a espécie *Pinus radiata* e *Douglas fir* respectivamente (Quadro 6).

**Quadro 6** - Resultados dos ensaios de flexão nos 5 painéis de CLT

Qtde painéis	Espécies	MOR (MPa)	MOE (MPa)
3	<i>Populus euroamericana</i> (camada transversal, menos denso) + <i>Douglas fir</i> (camada longitudinal)	31,5	8070
1	<i>Pinus radiata</i>	44,5	6350
1	<i>Populus euroamericana</i> (menos denso) + <i>Pinus</i> <i>radiata</i>	41,23	6210
1	<i>Douglas fir</i>	34,7	8690

Fonte: Wang (2014)

Observou-se, assim, que, a espécie menos densa (*Populus euroamericana*), composta na camada central, torna o painel menos resistente e menos rígido, notou-se também que as falhas ocorreram nas peças longitudinais que continham finger joint, concluindo que este tipo de ligação diminui a resistência dos painéis.

Flaig *et al* (2014) realizaram estudo em vigas de CLT com a espécie *Picea abies* (abetos da Noruega) com e sem *finger joint* com adesivo melanina ureia formaldeído – MUF fizeram, ainda, uma simulação computadorizada com 6 diferentes vigas de CLT com variação das camadas e largura das tábuas. Nas vigas formadas por peças unidas com *finger joint* observaram falhas nestas ligações em 21% dos testes realizados com madeira mais densa, já nas vigas menos densas a falha na ligação *finger joint* foi de 7%.

Na simulação computadorizada das 362 vigas CLT produzidas com *finger joint*, 264 obtiveram falhas nestas ligações, ou seja 72,93%. Assim, através da simulação computadorizada, a resistência e a flexão não dependem somente do número de camadas longitudinais, mas também da largura das tábuas que compõe cada camada.

Foram simuladas vigas de CLT com 2 a 4 camadas longitudinais e largura das tábuas de 75mm a 150mm. Os resultados observados mostraram que quanto menor a largura das tábuas, e conseqüentemente maior o número de peças nas camadas, maior é a resistência a flexão. Portanto vigas de 4 camadas longitudinais com 8 tábuas de largura de 75mm, o MOR obtido foi de

31,7 Mpa. Nesta mesma configuração, com tábuas de 150mm, o valor do MOR obtido foi de 28,2 MPa.

#### Quadro 7 - Resultado teste flexão

Madeira sem finger joint	MOR (MPa)	MOE (MPa)
Madeira mais densa (0,45g/cm <sup>3</sup> )	40	12.800
Madeira menos densa (0,40g/cm <sup>3</sup> )	32	10.000

Fonte: Autor (2018)

Observou-se, através deste estudo, que a densidade tem papel preponderantemente no comportamento mecânico do painel.

No estudo desenvolvido por Steiger *et al* (2011) foram realizados testes de flexão não destrutivo em 42 painéis de CLT e comparou com a norma ANSI/APA 320 (2012). O estudo consistiu em retirar amostras de tiras de 30cm de 42 painéis de CLT com 3 camadas coladas cada um com adesivo MUF. Foram utilizadas classe de 2 tipos de madeira, nas camadas externas utilizaram madeira com classe C24 e densidade 0,42g/cm<sup>3</sup> e na camada interna madeira de classe C20 com densidade de 0,39 g/cm<sup>3</sup>. Após a comparação dos resultados do teste de flexão não destrutivo, os valores obtidos ficaram entre 12000 MPa a 14000MPa.

Estudo feito pelos autores Zhou e Chui (2014) foram realizados teste de flexão em painéis de 5,5m x 2,15m x 0,103m e CLT com 3 camadas com peças com densidade de 0,52g/cm<sup>3</sup>. O resultado médio obtido do MOE foi de 10500 MPa.

O estudo desenvolvido por Alencar (2015) teve como objetivo analisar a qualidade e o desempenho estrutural dos painéis CLT, elaborados com as espécies de *Pinus ssp* e medula de *Eucalyptus grandis*, previamente classificados visual e mecanicamente. Foram ensaiados no teste de flexão, 16 painéis agrupados em quatro tipos: um somente com pinus, outro com eucalipto e dois grupos combinando as duas espécies, um com pinus na camada interna e outro com eucalipto na camada interna. Através de teste de flexão fez-se uma comparação aos resultados encontrados na revisão bibliográfica. Os resultados

observados nos testes de resistência e rigidez e, a flexão executada nos painéis CLT apontaram para uma maior flexibilidade e resistência para os painéis elaborados com pinus, assim como uma alta rigidez e baixa resistência para os painéis contendo eucalipto. Estes resultados foram comparados com os valores mínimos indicados pelas normas e pela literatura consultada mostrando que os valores alcançados neste trabalho foram similares; como demonstrado no Quadro 8, comprova-se, assim, que existe a possibilidade do uso desta madeira de baixo valor agregado para a produção de painéis CLT.

**Quadro 8** - Estudo comparativo dos resultados obtidos por Alencar (2015) com outros autores.

<b>Autores</b>	<b>Espécie de madeira</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>MOE(MPa)</b>	<b>MOR</b>
<b>CONCU et al (2014)</b>	Pinus	0,49	7.913	26,1
<b>SIGRIST et al (2014)</b>	<i>Pinus radiata</i> (Sem classificação)	Não informado	6.251	25,5
	<i>Pinus radiata</i> (Classificado visualmente)	Não informado	8.066	35,4
	<i>Pinus radiata</i> (classificação MGP12)	Não informado	12.567	53,1
<b>WANG et al (2014)</b>	<i>Pinus radiata</i>	0,45	6.350	44,5
	<i>Douglas fir</i> (sem defeito Com finger joint)	0,47	8.690	34,7
	<i>Populus euroamericana</i> (Sem defeito com finger joint)	0,41	5.970	41,6
<b>FLAIG et al (2014)</b>	Vigas CLT Sem finger joint ( <i>Picea abies</i> )	0,45	12.800	40
		0,40	10.000	32
<b>STEIGER et al (2011)</b>	C24/C20	0,42 (camada externa) 0,39 (camada interna)	12.000/14.000	-
<b>ZHOU e CHUI (2014)</b>	<i>Spruce-pine-fir</i>	0,52	10.500	-
<b>ALENCAR (2015)</b>	EEE	0,51	10.270	24
	EPE	0,51/0,53	10.144	24
	PPP	0,53	8111	32
	PEP	0,53/0,51	7240	39

Fonte: Alencar (2015) E – Eucalipto, P- Pinus Fonte: Alencar, 2015, camada dos painéis:

EEE- bn c eucalipto, eucalipto, eucalipto; PPP- Pinus, Pinus, Pinus; PEP – Pinus, Eucalipto, Pinus.

O estudo desenvolvido por Alencar (2015) mostrou os resultados dos ensaios de flexão nos 16 painéis CLT semelhantes aos publicados por outros autores, porém, acima dos valores mínimos editados pelos padrões da Norma ANSI/APA PRG 320 (2012), (valor mínimo de MOE 8600 MPa e MOR 10 MPa. Mostrou assim que existe viabilidade técnica na utilização deste matéria de eucalipto com baixo valor agregado na elaboração de painéis estruturais CLT de eucalipto, pinus, eucalipto.

Nos estudos desenvolvidos por Pereira (2014), em que criou uma metodologia de ensaios para a caracterização estrutural de painéis de MLCC (Madeira Laminada Cruzada Colada) através do estudo da rigidez de um painel modelo de MLCC, contribuindo desta forma para a normatização do produto no Brasil. Foram confeccionados painéis com 5 *camadas*, 33 tábuas de 130x16x2130mm para a formação da camada superior, inferior e central; 32 tábuas com 130x16x1500mm para a formação das duas camadas intermediárias.

O painel foi fabricado com dimensões estruturais utilizando madeira de *Pinus elliotti* e adesivo estrutural à base de melamina-urea formaldeído. Os ensaios mecânicos realizados foram adequados para caracterização estrutural de painéis de CLT. Os resultados dos ensaios dos painéis seguem na Quadro 9.

**Quadro 9** - Resultados flexão comparados com as normas

Parâmetro	MLCC laboratório (MPa)	ETA 06/0138(MPa)	ANSI/APA PGR 320 (MPa)
<b>MOE<sub>0</sub> (maior comp.)</b>	4383,58	12000	11032
<b>MOE<sub>0</sub> (menor comp.)</b>	1433,56	-	9653
<b>G<sub>xy</sub></b>	1242,50	500	1103*
<b>G<sub>90</sub></b>	144,34	50	69
<b>F<sub>c0,k</sub></b>	20,81	24	19
<b>F<sub>c90,k</sub></b>	5,20	2,7	-

MOE<sub>0</sub> módulo de elasticidade na flexão paralela ao sentido de maior força, G<sub>90</sub> módulo de rigidez do rolling Shear, G<sub>0</sub> módulo de rigidez paralelo ao sentido de maior força; F força de resistência ao cisalhamento aplicado ao corpo de prova

\* valores obtidos pela relação  $G_0 = E_0/10$  e  $G_{90} = G_0/16$

Os resultados (Quadro 9) mostram que os valores dos MOE na

longitudinal e na transversal do painel foram os resultados que mais se distanciaram dos valores de referência Norma ANSI/APA PRG 320 (2012), valores mínimos (MOR 10 MPa e MOE 8600 MPa), sendo cerca de um terço menor para a maior direção e um sexto para a menor direção. O que pode estar relacionado com a classe da madeira do *Pinus elliottii*; devido ao crescimento rápido no Brasil, suas propriedades mecânicas são reduzidas frente às coníferas utilizadas na Europa e América do Norte.

Os valores de rigidez para o painel avaliado apresentaram MOE abaixo dos especificados pela norma americana ANSI/APA PGR 320 (2012) e pela especificação técnica europeia ETA 06/0138 (2017).

Os resultados dos testes realizados não atingiram, em alguns itens, os requisitos mínimos exigidos pelas duas normas de referência, a norma Americana ANSI/APA PGR 320 (2012) e a Aprovação Técnica Europeia ETA 06/0138 (2017), no entanto, pode-se concluir que os ensaios estão adequados e equivalentes ao modelo de testes que são realizados no exterior. Apesar disso o painel fabricado apresentou uma boa interação entre a espécie de madeira utilizada *Pinus elliot* e o adesivo a base de *melamina urea formaldeido*, demonstrada pelos bons resultados nos testes de delaminação.

## 2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BAMBU

ACMA (2017), realiza estudo com o objetivo de avaliar algumas propriedades mecânicas de 7 espécies de bambu (Quadro 10). Estas espécies foram plantadas dentro do Campus da Universidade de Mindanao Central, Philippines; *Dendrocalamus merrillanus*, Elmer; *Gigantochloa atter*, Hassk; *Bambusa vulgaris* Var. Schrad; *Dendrocalamaus seguro*, Schultes. F; *Dendrocalamus latiflorus*, Rehm. *Bambusa vulgaris* Schrad. e *Bambusa blumeana*, Schultes. Estas espécies foram submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos, teste de compressão paralela ao grão e teste de cisalhamento paralela ao grão. Os dados foram tomados a partir da região basal, mediana e apical dos bambus.

**Quadro 10** - Propriedades mecânicas de 7 espécies de bambus

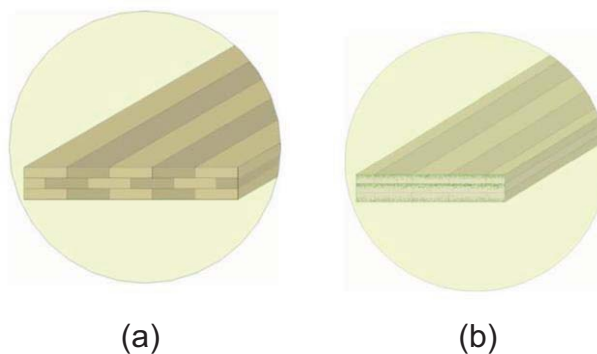
Material	Resistência à compressão paralelo ao grão (MPa)	Cisalhamento paralelo ao grão (MPa)	Força de ruptura em flexão (MPa)
<i>Dendrocalamus latiflorus</i> , Rehm.	72.91	12.65	130,7
<i>Bambusa vulgaris</i> Schrad.	66.08	10,96	105.40
<i>Dendrocalamus merrilanus</i> , Elme	73.07	10.09	188.39
<i>Bambusa blumeana</i> , Schultes	55.98	8,65	53,55
<i>Dendrocalamus seguro</i> , Schult. F	104.02	-	39,1
<i>Gigantochloa atter</i> , Hassk	51.86	-	39.24
<i>Bambusa vulgaris</i> Var. Schrad	43.57	-	34,43

Fonte: Acma (2017)

A espécie *D. merrilanus*, tem a maior resistência de flexão com valor médio de 188.39 MPa; e, as sete espécies de bambu testados são 2 a 6 vezes mais forte do que a de 80% das espécies classificadas *Vitex stress Parviflora Juss* (espécie de madeira) com resistência de compressão 1,7- 4,4 vezes mais forte na força de cisalhamento e 1,4 - 7,85 vezes mais forte em resistência de flexão.

Nogueira (2008), desenvolveu-se um estudo onde se avaliou as propriedades físico-mecânicas de 2 tipos de painéis à base de bambu, denominado BLCe - Bambu Laminado Colado com lâminas que foram retiradas da camada externa da parede do colmo e BLCi - Bambu laminado colado com lâminas retiradas da camada interna da parede do colmo da espécie *D. giganteus* e comparou-os entre si e com outras madeiras. Os painéis foram fabricados de forma que as lâminas se desencontrassem umas das outras e, não formassem uma linha vertical contínua, de adesivo ao longo das 3 camadas, (Figura 22 a). Outro procedimento foi a orientação das fibras dispostas de maneira que as superfícies das lâminas ficassem voltadas com as cascas voltada para superfície, para face externa do painel (Figura 22 b).

**Figura 22** - Disposição das lâminas nos painéis de BLC



Fonte: Nogueira (2008)

Os painéis foram colados com dois tipos de adesivos PVA e Adespec (a base de elastômero de alto desempenho). E para a avaliação das características física e mecânica de cada painel, foi necessário a adaptação dos corpos de prova devido à inexistência de uma norma específica para ensaios físicos e mecânicos de painéis laminados colados. Houve uma variabilidade das propriedades do BLCe e do BLCi que foram explicadas através de micrografia obtidas em microscópios estereoscópio e eletrônico de varredura.

Os resultados comprovaram que a resistência no plano de cola foi a propriedade crítica neste estudo e responsável pelo baixo MOR na flexão estática do BLC produzido. Isto significa melhor adesão entre lâminas acarreta uma melhora imediata na flecha pois, a ruptura ocorreu por cisalhamento do plano de cola e não por cisalhamento do plano central fibroso do painel onde as tensões de cisalhamento são críticas. O MOE é impactado com a melhoria da adesão. O BLC mostrou resultados superiores a madeira de *pinus spp* e inferiores ao eucalipto e nativas (Quadro 11). Que podem ser equiparadas à *Aspidosperma polyneuron* (peroba) em termos do seu módulo de elasticidade. As falhas de colagem observadas aumentaram com a largura do painel.

**Quadro 11** - Valores de propriedade física e mecânica em MPa de Bambu Laminado Colado e algumas espécies de referências.

Propriedade				Madeira maciça U=15%	BLC U=12 %	BLC literatura
	Peroba Rosa ( <i>Aspidosperma peroba</i> )	Ipê roxo ( <i>Tecoma impetiginosa</i> )	Pinus ( <i>Pinus eliotti</i> )	Eucalipto ( <i>Eucalyptus saligna</i> )	<i>D. giganteus</i>	
Resist. Cisalhamento (MPa)	12,0	14,5	5,9	9,4	10,58/ 15,56 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup>
Resist. Cisalhamento no plano de cola	-	-	-	-	2,28/ 6,85 <sup>6</sup>	8,11 <sup>4</sup>
MOR flexão estática (MPa)	106,4	163,2	71	103,6	78,40	99 <sup>4</sup>
MOE flexão estática (MPa)	9950 <sup>1</sup>	16500 <sup>1</sup>	6590	12110 <sup>1</sup>	9556	13600 <sup>4</sup>
Dureza (MPa)	71,4	88,5	19,7	46,2	35,78	35,2 <sup>5</sup>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	0,80	0,96	0,48	0,69	0,75	0,79

Fonte: IPT (1956); (NOGUEIRA, 2008)

1 condição verde, 2 inchamento em aglomerado de bambu com 5% de resina (BERALDO, 2007), 3 inchamento da lâmina (BERALDO, 2007), 4 BERALDO, 2007, 5 GONÇALVES *et al.* (2000), 6 Relatório interno do Laboratório de Engenharia da Madeira da ESALQ/USP

O valor do MOE observado neste estudo foi de 9556 MPa, refere-se a painéis de 1,5 cm x 8,0 cm de seção transversal e o valor 13600 MPa foi obtido de vigas 5,0cm x 5,0cm. Já os valores quanto à resistência ao cisalhamento foram de 10,58 e 15,56 MPa, observados do BLC neste estudo e de uma viga laminada colada de 2,0cm x 6,0cm de seção transversal, respectivamente.

Assim, os painéis produzidos com lâminas da camada mais externa do colmo apresentaram desempenho mecânico apenas ligeiramente superior aos painéis produzidos com lâminas da camada mais interna. Desta forma o BLC

possui boas características superficiais e estruturais.

Pereira, Beraldo (2007), desenvolveram estudo com bambu laminado colado utilizando a espécie *D. giganteus* de 3,5 anos. O autor relatou os resultados obtidos nos testes; a) massa específica aparente apresentou valor médio de 0,79g/cm<sup>3</sup>, b) resistência à compressão paralela às fibras o valor médio foi de 65,5 MPa. O MOR na flexão estática apresentou valor médio de 99 MPa e o MOE apresentou-se o valor médio de 13,6 GPa.

O estudo desenvolvido por Carbonari *et al* (2016), teve como objetivo analisar propriedades mecânicas de nove espécies de bambu localizados no IAPAR/Londrina, Instituto Agrônômico do Paraná que foram: *Bambusa nutans*, *Bambusa beecheyana*, *Bambusa vulgaris*, *Bambusa oldhamiia*, *Bambusa tulda*, *Guadua angustifolia*, *Dendrocalamus asper*, *D. giganteus*, *Arundinaria amabilis*, cada colmo foi dividido em duas partes de aproximadamente seis metros, devidamente identificados na superfície externa, para que fosse possível reconhecer os colmos da mesma espécie. Por falta de normatização específica, neste trabalho adotaram-se para os ensaios os preceitos da norma internacional ISO/TC165 N314 (1999). Os ensaios foram de resistência à compressão, à tração, resistência à flexão, módulo de elasticidade no ensaio à compressão. No caso do teste para cálculo de resistência à flexão, não se utilizou a recomendação da ISO/TC165 N314 (1999), onde o colmo de bambu está sujeito a duas cargas concentradas, com apoios nas extremidades. A metodologia utilizada foi o colmo engastado em uma extremidade e, livre na outra, sujeito a uma carga concentrada na extremidade livre, permitindo desta forma um ensaio simplificado e preciso para a obtenção do módulo de elasticidade à flexão do bamboo no caso as espécies *Bambusa nutans* / *D. giganteus*. No teste de flexão notou-se que a espécie de bambu *D. giganteus* rompe com uma carga de 2,34 kN/m<sup>2</sup> ou seja 238,61 kgf/cm<sup>2</sup>, provocando uma tensão de ruptura de 58,5 MPa ou seja 596,5 kgf/cm<sup>2</sup> e módulo de elasticidade de 5,3 GPa, foram obtidos com resultado do teste de resistência à flexão valores relativamente baixos dos módulos de elasticidade à flexão de 3,4 GPa a 5,3 GPa o que comprovam a alta flexibilidade do bambu, compatível com o comportamento resistente e flexível que possui o bambuzal quando sujeito à ação do vento. Os módulos de elasticidade obtidos no ensaio de compressão das espécies estudadas ficaram entre 20 GPa a 25 GPa, sendo superiores aos das madeiras de florestas

plantadas, e próximos ao do concreto convencional. Comprovou-se através deste estudo que o bambu é um material extremamente eficiente, com baixo peso e altas resistências, tanto à tração quanto à compressão, porém com uma deficiência natural em seu módulo de elasticidade à flexão. Notou-se, ainda, que o bambu *D. giganteus* possui uma alta resistência juntamente com uma alta flexibilidade. Estas características se devem a natureza do bambu cujos colmos de aproximadamente 25m resistem a ação do vento.

## 2.5 ADESIVOS

Outro fator que altera a resistência do painel de CLT, é o tipo de adesivo usado na colagem dos painéis.

A norma ANSI/APA PRG 320 (2012) requer que o adesivo utilizado para fabricação de CLT seja atendido pela norma ANSI 405 (2013) somente para condições de uso interno ou seco.

A ANSI/APA PRG 320 (2012) recomenda que se utilize para a fabricação de painéis de CLT, os seguintes adesivos:

- Fenol-resorcinol-formaldeído; (FRF)
- Emulsão Polímero Isocianato (EPI);
- Poliuretano (PUR),

Porém, estes adesivos possuem um valor elevado de mercado. Assim, o adesivo como Melamina-urea-formaldeído (MUF) é mais acessível economicamente e responde bem para a fabricação com painéis de CLT. Os adesivos à base de formol e Isocianato poluem o meio ambiente, já o adesivo a base de óleo de mamona tem alguns diferenciais em relação aos demais, é um polímero biodegradável, de fonte renovável, consiste numa opção para redução do impacto ambiental (MARQUES, MARTINS, 2009).

Araújo (1998), descreve que pesquisas com poliuretanos derivados tornou-se um tema atual, abrindo novas perspectivas para o seu desenvolvimento devido a procura por materiais biodegradáveis, não poluentes e derivados de biomassa.

O óleo de mamona é proveniente da planta *Ricinus communis*, encontrado em regiões tropicais e subtropicais, muito abundante no Brasil e tem

uma importante propriedade que é a versatilidade quanto à variação de suas estruturas, que está relacionada ao tipo de prensagem da semente, do condicionamento prévio do óleo, dos métodos de purificação de óleo prensado (ARAÚJO, 1992).

De acordo com Wilczak (2014), que avaliou o comportamento mecânico do adesivo de poliuretano à base do óleo de mamona, e pode concluir que o comportamento mecânico do adesivo, através de ensaios de flexão estática e cisalhamento na linha de cola, foi relevante para a substituição dos adesivos comerciais à base de formaldeído, sendo viável para uso interno e externo.

As plantas oleaginosas tem sido uma boa alternativa para diminuição de poluentes na atmosfera. O óleo de mamona, extraído do fruto mamona (*Ricinus communis L.*), arbusto popular em quase todo o mundo é muito encontrado nas regiões tropicais, é utilizado na obtenção de um polímero com boas propriedades conhecido como Poliuretano. Este material ganhou reconhecimento internacional e passou a ser conhecido como biomaterial por apresentar compatibilidade com tecidos vivos, ser biodegradável e tem sido utilizado como adesivo (MARTINS,2009). Usada em substituição às resinas sintéticas, por serem estas mais agressivas ao meio ambiente (GRYCZAK, 2016).

De acordo com Vital *et al* (2006), existem várias teorias que procuram explicar o fenômeno da adesão, mas nenhuma é capaz de explicar todos os aspectos da aderência. Com relação à madeira as teorias mais importantes são enganchamento mecânico e teoria da adsorção. A teoria do enganchamento é a penetração do adesivo num substrato poroso que leva a formação de ganchos e o entrelaçamento mecânico que se prendem às camadas superficiais da madeira após a cura e endurecimento do adesivo. Já a teoria da absorção diz que a adesão é resultado do contato molecular entre dois materiais que desenvolvem forças de atração superficiais. Para que ocorra um contato íntimo e contínuo entre o substrato e o adesivo, é necessário que o adesivo umidifique a madeira, ocorrendo desta forma a migração do adesivo para dentro da estrutura submicroscópica da parede celular expulsando o ar, água e outros componentes estranhos à superfície de contato da madeira. O umedecimento depende da natureza molecular do adesivo, da qualidade da superfície a ser aplicada o adesivo, da mobilidade molecular do adesivo, da pressão de prensagem do

adesivo e tempo disponível até o endurecimento do adesivo (VITAL *et al*, 2006).

Alguns elementos interferem no processo de colagem como: densidade, porosidade entre os lenhos iniciais e lenhos tardios, cerne e alborno, além da presença de extrativos nas cavidades dos elementos anatômicos (Ex: resina) (VITAL *et al*, 2006).

Conforme Santos (2010), alguns tipos de adesivos são mais recomendados para uso estrutural. Os adesivos chamados de estruturais são aqueles que mantêm sua resistência e rigidez sob saturação de água e secagem cíclica mais severa. Já os adesivos não estruturais são aqueles adesivos rígidos que perdem sua habilidade de transferir mais rapidamente a carga que a madeira em condições de serviço em relação a umidade. E os adesivos semiestruturais são aqueles que mantêm a resistência e a rigidez na água em curto prazo. No entanto, deterioram mais rapidamente que a madeira e podem ser usados externamente, porém protegidos da umidade. Conforme quadro 12, alguns exemplos de adesivo como: melanina ureia formaldeído, isocianato e poliuretano que são recomendados para uso externo USDA (SANTOS, 2008).

**Quadro 12** - Adesivo de madeira categorizados de acordo com seu desempenho estrutural previsto em níveis da exposição ambiental.

<b>Tipos de adesivos</b>	<b>Local de uso</b>	<b>Adesivo utilizados</b>
<b>Estrutural</b>	Uso exterior sem restrição	Fenol-formaldeído
		Resorcinol-formaldeído
		Fenol-resorcinol-formaldeído
		Polímero de emulsão/isocianato
		Melamina-formaldeído
	Uso exterior com restrição	Melamina-Ureia-formaldeído
		Isocianato
		Epóxi
	Interior	Ureia-formaldeído
Caseína		
<b>Semi- estrutural</b>	Uso exterior, com limitações	Polivinil acetato
		Poliuretanos
<b>Não estrutural</b>	Interior	Polivinil acetato
		Animal
		Elastômero de construção
		Elastômero de contato
		Hot-melt

Fonte: Santos (2008)

A densidade da madeira indica a quantidade de espaços vazios disponíveis para o adesivo. Por exemplo, quanto menor for a densidade, maior

será a permeabilidade de sua estrutura e, mais forte será ligações interfacial formada entre adesivo e madeira, porém quanto menor for a densidade da madeira, menor será a sua resistência mecânica (VITAL *et al*, 2006).

A seguir apresentam-se alguns dados de análise coletados de estudos feitos por alguns autores sobre a utilização de outros adesivos:

O estudo desenvolvido por Alencar, (2015) teve foco na qualidade e desempenho de colagem através de testes em corpos de provas, utilizando-se madeira de reflorestamento, *Pinus spp* e *Eucalipto grandis*, para futura utilização em painéis estruturais em CLT. Foram testados mecanicamente, conforme a norma NBR 7190 (1997), 72 corpos de provas representativos de painéis CLT, sendo 36 utilizando os adesivos estruturais melamina urea formaldeído (MUF) e 36 utilizando adesivo urea-formaldeido (UF). Os resultados obtidos através de testes de determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal da colagem entre pinus e eucalipto, entre as mesmas espécies comprovou melhor desempenho para o adesivo MUF, nas colagens no sentido perpendicular as fibras sempre nas combinações pins/pinus.

O estudo desenvolvido por Pereira (2014), em que desenvolveu uma metodologia de ensaios para a caracterização estrutural de painéis de CLT com a espécie *Pinus elliottii*, visando a contribuição para a normatização do produto no Brasil e o estudo da rigidez de um painel modelo de CLT. Foram fabricados 6 corpos de prova com 5 camadas e colados com adesivo MUF. O resultado dos ensaios cisalhamento direto na linha de cola estão na Quadro 13.

**Quadro 13** - Resultados para ensaio de cisalhamento direto na linha de cola

Corpo de prova (CP)	Área cisalhamento(mm <sup>2</sup> )	Carga de ruptura (kgf)	F <sub>gv</sub> (MPa)
CP1	3912	870	2,1
CP2	3778	2020	5,2
CP3	4086	1670	4,0
CP4	4474	1200	2,6
CP5	4128	1470	3,4
CP6	4029	1490	3,6

Fonte: Pereira (2014) F<sub>g,v</sub> resistência ao cisalhamento na linha de cola

No ensaio de cisalhamento na linha de cola, os resultados revelaram

boa resistência até a ruptura e a análise visual após a ruptura mostra boa quantidade de fibra de madeira rompida, ou seja, a aderência foi suficiente para que houvesse a ruptura nas fibras e não somente na região de colagem. O resultado da resistência ao cisalhamento na linha de cola ( $f_{gv,k}$ ) médio foi de 2,47 MPa.

O estudo desenvolvido por Segundinho *et al* (2015) avaliou a resistência ao cisalhamento na linha de cola da madeira laminada colada (MLC), foram fabricados os corpos de prova com três espécies de madeira *Tectona grandis*, *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus sp.* Todas as vigas de MLC tinham comprimento de 200 cm e seção transversal de 9 cm x 9 cm para a madeira de *Tectona grandis* e *Pinus oocarpa* e 9 cm x 5,5 cm para a madeira de *Eucalyptus sp.* Foram feitas 10 vigas de MLC com 9 cm de altura cada, mantendo-se a pressão com 1,0 MPa durante o tempo de cura do adesivo, que variou entre 10 horas a 20°C e 3 horas a 30°C, máximo e mínimo respectivamente. A largura das vigas de MLC foi tomada de acordo com a disponibilidade das dimensões das peças de madeira. As colagens foram realizadas com lâminas sem qualquer tratamento químico preservativo, utilizando-se o adesivo bi componente de melamina uréia formaldeído (MUF) (Akzonobel, MUF 1242/2542), em seguida foram feitos ensaios de resistência ao cisalhamento na linha de cola para madeira. O ensaio de cisalhamento ( $f_v0$ ) também foi realizado em corpos de prova estruturais cujas dimensões são as da seção transversal das vigas de MLC. Os resultados obtidos a partir de resistência ao cisalhamento na linha de cola na condição seca e os ensaios de delaminação apontam que a espécie *Pinus oocarpa* apresentou melhor desempenho. Conclui-se que há potencialidade dessa espécie para produção de Madeira Laminada colada utilizando o adesivo MUF.

No quadro 14, o resultado da resistência relativas das tensões de Cisalhamento para as 3 espécies de madeira. A resistência relativa foi calculada dividindo o valor médio das resistências das amostras de MLC pelo valor médio das resistências das amostras da madeira sólida.

**Quadro 14** - Resistência relativa das tensões de Cisalhamento para as 3 espécies de madeira.

Ensaio	<i>Tectona grandis</i>	<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Eucalyptus sp.</i>
[II]/ [I]	0,86	0,95	0,74
[III]/ [I]	0,61	0,65	0,56
[IV]/ [I]	0,46	0,36	0,44

Fonte: Segundinho *et al* (2015)

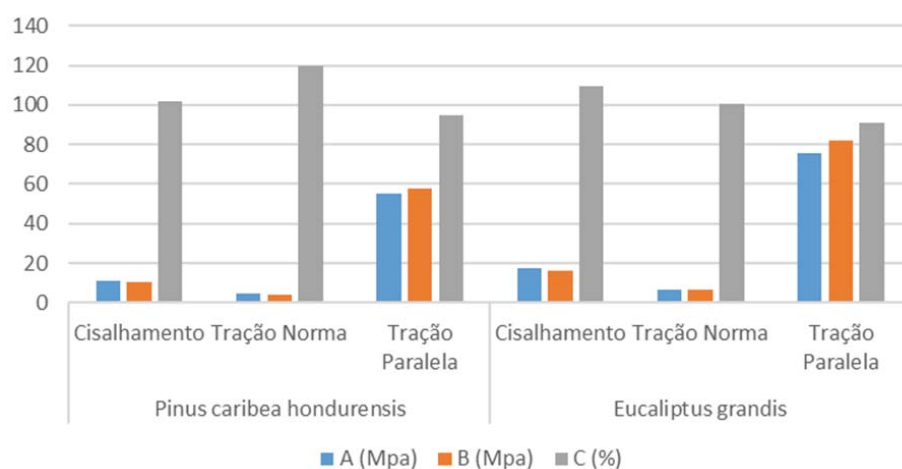
[I] corpo de prova de madeira sólida segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997); [II] corpos de prova de MLC segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997); [III] e [IV] corpos de prova estrutural de MLC, seco e úmido, respectivamente, conforme Frangi, Fontana e Mischler (2004).

Na espécie *Pinus oocarpa* pode-se observar melhor desempenho na condição seca, relação [II]/[I], e pior desempenho na condição úmida, relação [IV]/[I]. Ocorreu a ruptura na madeira para o corpo de prova estrutural na condição seca e úmida para as três espécies; porém o modo de ruptura não ocorreu no plano de cisalhamento, portanto o adesivo não teve um desempenho tão bom em situação de umidade. As evidências mostraram que a ruptura foi provocada pela abertura inferior da lâmina central do corpo de prova estrutural, ou seja, não ocorreu cisalhamento puro e simples, havendo outro tipo de tensão, pela presença de um momento fletor ou outro tipo de solicitação que levasse à abertura na parte inferior do corpo de prova. Consequentemente a tensão de ruptura do corpo de prova diminuiu conforme foi observado nos ensaios. Sugere que os próximos estudos para uso estrutural dos elementos de MLC, utilize adesivo bicomponente de aplicação estrutural à base de melamina urea formaldeído, respeitando as seções transversais e comprimento da viga, ensaios de tração na linha de cola e de emenda para que a indicação deste adesivo se confirme.

Jesus (2000) desenvolveu um estudo para analisar o comportamento do adesivo poliuretano à base de mamona para o emprego em Madeira Laminada Colada (MLC). Foi avaliada a eficiência do adesivo através da resistência dos seguintes ensaios mecânicos: cisalhamento, tração normal e tração paralela às fibras de acordo com a norma NBR 7190 (1997). Foram utilizadas espécies de madeira: o *Pinus caribea hondurensis* e o *Eucalyptus grandis*, empregadas em reflorestamento nas regiões Sudeste e Sul do Brasil, onde estão localizadas as indústrias de MLC. Os adesivos do estudo são bicomponente, o polioli B1640 e o

prepolímero A249, adesivo natural e renovável, de cura a frio, não agressivo ao meio ambiente e nem ao ser humano, sendo uma tecnologia nacional. Os resultados mostraram (Gráfico 1) que o adesivo, é uma boa alternativa para a utilização em Madeira Laminada Colada em estruturas com espécies de reflorestamento.

**Gráfico 1** - Relação percentual entre a resistência dos corpos de prova colados e dos corpos de prova de controle



Fonte: Jesus (2000)

A – Resistência dos corpos de prova colado

B – Resistência dos corpos de prova maciço de controle

C – Porcentagem de B em relação a A

O estudo desenvolvido por Rosa (2014), avaliou as propriedades físicas e mecânicas dos Bambus Laminados Colados (BLC), com as espécies dos bambus *D. giganteus* e *Bambusa vulgaris*, com idade superior a três anos.

Produziu-se ripas originárias de bambus das espécies *D. giganteus* e *Bambusa vulgaris*, com idade superior a três anos. Uma parte das ripas foi imersa em água e a outra em solução de *octaborato de dissódio tetrahidratado* (solução conhecida por Timbor, sendo constituída pela reação do ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) com o borato de sódio ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$  - Bórax) na proporção de 1:1,54 respectivamente), a 2%, ambos os tratamentos foram feitos durante 15 dias. Depois de tratadas e secas ao ar livre, as ripas foram transformadas em lâminas com dimensões de 5 x 30 x 470 mm (espessura x largura x comprimento) e empregadas na confecção dos BLCs. Os adesivos utilizados foram à base de emulsão de isocianato polimérico (EPI); melamina urea

formaldeído (MUF); acetato de polivinílico *cross* (PVAc) e resorcinol formaldeído (RF).

A resistência à flexão estática foi avaliada por meio da aplicação de métodos destrutivos e não destrutivos.

Os métodos não destrutivos utilizados para estimar o módulo de elasticidade dos BLCs foram, o *Stress Wave* (SW), vibração longitudinal (*vib. long.*) e vibração transversal (*vib. trans.*). De acordo com Targa *et al.* (2005), os métodos não destrutivos mais utilizados que visam determinar as propriedades físicas e mecânicas da madeira são o ultrassom, análise de vibrações e emissão acústica. Dentro das análises de vibrações encontram-se alguns métodos comumente conhecido como *Stress Wave* (ondas de tensão) que fornece o tempo que a onda de tensão gasta para percorrer o comprimento da amostra. A partir desse tempo, calcula-se o módulo de elasticidade dinâmico (Esw) por meio de uma Equação ou *free-free bar* (barra livre-livre).

A seguir, a tensão de cisalhamento para cada espécie de bambu de acordo com Quadro 15 e os tratamentos e adesivos empregados.

**Quadro 15** - Tensão de cisalhamento dos BLCs de bambu *D. giganteus* e de *B. vulgaris* para adesivos e tratamentos preservativos.

Espécie	Adesivos/Resistência ao cisalhamento (MPa)					
	Tratamento	EPI	MUF	PVA	RF	Média
<i>D. giganteus</i>	Água	4,80 Aa	3,14 Bb	0,98 Ca	4,16Ab	3,27
	Timbor	2,19Cb	4,23Ba	1,23Ca	5,42Aa	3,27
	Média	3,50	3,68	1,11	4,79	----
<i>B. vulgaris</i>	Água	3,18	6,41	4,94	6,58	5,28a
	Timbor	2,48	6,04	3,54	6,45	4,63b
	Média	2,82C	6,23A	4,24B	6,51A	----

Fonte: Rosa *et al* (2014) Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas linhas ou minúscula nas colunas, para uma mesma espécie de bambu, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). Em que: EPI = emulsão de isocianato polimérico; MUF = melamina urea formaldeído; PVAc = acetato de polivinílico *cross*; e RF = resorcinol formaldeído.

Para os BCLs confeccionados com *D. giganteus*, a interação dos fatores tratamento preservativo e adesivo foi significativa pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ); a interação foi desdobrada e as médias comparadas pelo teste de Tukey que indicou ser a tensão de cisalhamento entre os tratamentos preservativos, para

um mesmo adesivo, estatisticamente diferentes. Para o adesivo EPI, a média foi maior para os bambus tratados em água. Para os adesivos MUF e RF, foi maior para os tratados em Timbor.

Para o adesivo PVA, não houve diferença entre os tratamentos (água ou Timbor). Observou-se que as médias da tensão de cisalhamento entre os adesivos, para um mesmo tratamento foram diferentes estatisticamente. Assim, os BLCs de *D. giganteus* produzidos com as lâminas tratadas em água e coladas com os adesivos EPI e RF, demonstraram ser mais resistentes. Já aquelas aderidas com o MUF, apresentaram a segunda maior resistência e para o PVA, a menor delas. Para os BLCs que continham lâminas tratadas com Timbor, aqueles colados com RF foram mais resistentes. Os aderidos com MUF também propiciaram a segunda maior média, assim como no tratamento com água. A maior diferença, entretanto, foi encontrada nos BLCs tratados com Timbor e colados com EPI, com a menor média, igualando-se aos aderidos com PVA.

Não se detectou interação significativa pelo teste de F ( $p > 0,05$ ) entre os fatores tratamentos e adesivos para o *B. vulgaris*. Para os tratamentos preservativos observaram-se que, os BLCs confeccionados com lâminas tratadas com água foram mais resistentes que as tratadas com Timbor. Já para os adesivos, os BLCs do *B. vulgaris* colados com MUF e RF observou-se maior tensão de cisalhamento, seguidos daqueles aderidos com PVA e EPI. A maior resistência obtida para os BLCs, confeccionados com ripas tratadas em água pode estar relacionado com a lixiviação do amido, permitindo melhor união entre as lâminas e o adesivo empregado (Rosa, 2014).

Os adesivos MUF e RF conferem maior estabilidade dimensional. Tanto os BLCs de *D. giganteus* quanto o de *Bambu vulgaris* em relação aos dois tratamentos preservativos utilizados, tiveram a menor média de falhas no bambu quando aderidos com EPI e PVA.

No estudo desenvolvido por (WILCZAK, 2014), onde painéis compensados foram fabricados com o adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona, com 180 g/m<sup>2</sup>, 160 g/m<sup>2</sup>, 140 g/m<sup>2</sup> e 120 g/m<sup>2</sup>, e com adesivos urea formaldeído e fenol formadeído com 180 g/m<sup>2</sup>. Depois foram extraídos corpos de prova e realizaram-se os ensaios de flexão estática e de cisalhamento por tração da linha de cola. Para os dois ensaios os resultados mostraram que não houve

redução de resistência dos painéis fabricados com o adesivo de poliuretano em relação aos produzidos com os adesivos contendo resina à base de formaldeído nas condições normais de temperatura e umidade. Condições de temperatura e umidade podem causar diminuição da resistência dos painéis produzidos com o adesivo de poliuretano. Mostrou-se claro que, o adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona é uma alternativa para substituir os adesivos comerciais comumente empregados na indústria e que contém resinas à base de formaldeído. Já os adesivos de poliuretano são fabricados com matéria-prima de origem natural que não liberam substâncias nocivas à saúde à frio e ao meio ambiente, por não possuir solventes em sua composição, e sua produção é comercialmente viável. (WILCZAK, 2014)

## 2.6 CLASSIFICAÇÃO VISUAL

### 2.6.1 Classificação Visual da Madeira

A madeira serrada de florestas plantadas no Brasil apresenta um considerável potencial para expansão devido às restrições sobre as florestas nativas que são irreversíveis e, atualmente o mercado está voltado para o uso de madeiras de reflorestamento em grande escala, destacando-se o *Pinus spp* como uma das espécies mais promissoras. Deve-se ao resultado do crescimento mais acelerado do *Pinus spp* em países tropicais em relação aos países de clima frio. A madeira proveniente desta espécie apresenta muitos defeitos, tornando imprescindível a realização da classificação para sua aplicação estrutural.

De acordo com Carreira (2003), as propriedades mecânicas de uma madeira serrada, de uma tora, independentemente da espécie e dimensão são bastante variáveis. De uma peça para outra da mesma espécie é possível encontrar diferenças de resistência acima de 300%. Segundo Curry (CARREIRA, 2003), isto se deve a forte correlação existente entre resistência e a densidades da madeira e considere-se, ainda, a grande variação desta característica entre árvores de mesma espécie e outras características naturais

de crescimento como: nós que tem impacto adverso na resistência. A dimensão, a extensão, as localizações dos nós diferem em cada madeira.

Ainda, Carreira (2003), existem dois métodos usados para a classificação estrutural de peças de madeira: a classificação visual e a classificação mecânica. Um classificador examina cada peça no caso da classificação visual e limita o tipo, a localização e tamanho dos vários defeitos que podem afetar a resistência estrutural. Já a classificação mecânica utiliza um estimulador para avaliar a resistência da madeira, dentre os estimuladores os mais utilizados destacam-se a densidade e a rigidez à flexão.

De acordo com Candian (2007), a classificação visual é uma técnica bastante simples e consiste na inspeção das quatro faces e das duas extremidades de cada peça, onde é avaliada a qualidade visual, por meio da observação da quantidade de defeitos, como também a densidade do material.

Segundo Carreira (2003), a norma NBR 7190 (1997), não abrange procedimentos para classificação estrutural da madeira, mas a qualidade da madeira é levada em conta para o dimensionamento estrutural por meio do coeficiente parcial de modificação  $K_{mod3}$ . O coeficiente afeta os valores de cálculo das propriedades da madeira em função da classe de carregamento da estrutura, da umidade admitida, e do tipo de classificação realizada na peça, visual ou também não destrutiva e do eventual emprego de madeira de segunda qualidade. No caso de madeira de primeira categoria este coeficiente é igual a 1,0 e, no caso de madeira de segunda categoria este coeficiente adotado será igual a 0,8.

Conforme Carreira (2003) a classificação visual é baseada no fato de que as propriedades mecânicas de uma peça estrutural diferem das propriedades mecânicas de corpos de prova isentos de defeitos, em função da presença de características de crescimento, e tais características podem ser notadas e avaliadas pelo olho humano. Com o auxílio de regras de classificação, estas características de crescimento são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade.

De acordo com a norma NBR 7190 (1997) as peças de madeira poderão ser classificadas como de primeira categoria quando isentas de defeitos por meio do método visual normatizado, e também submetidas a uma classificação mecânica para enquadramento nas classes de resistência especificadas, para

que se garanta a homogeneidade da rigidez das peças que compõem o lote da madeira. Não é permitido classificar as madeiras como de primeira categoria apenas por meio de método visual de classificação. As peças serão classificadas como de segunda categoria quando não houver a aplicação simultânea da classificação visual e mecânica.

Ainda, segundo Carreira (2003), na prática as classes de média e baixa densidade das madeiras são unidas e recebem o nome de não-densa. As madeiras densas são designadas pela letra D e as madeiras não densas pela letra ND.

A norma NBR 7190 (1997) distingue as coníferas entre densas e não densas e seus valores mínimos de  $K_{mod3}$  conforme Quadro 16.

**Quadro 16** - Valores de coeficiente de modificação -  $K_{mod3}$  para coníferas.

Classificação	Classe	Tipo de Classificação	
		Apenas visual	Visual e mecânica
Densas (D)	SE-D	0,70	0,90
	S1-D	0,60	0,80
	S2-D	0,50	0,70
	S3-D	0,40	0,60
Não Densas (ND)	SE-ND	0,60	0,80
	S1-ND	0,50	0,70
	S2-ND	0,40	0,60
	S3-ND	0,30	0,50

Fonte: NBR 7190 (1997)

Segundo Carreira, Dias (2005) as classes de densidade para madeira são definidas em função da taxa de crescimento da mesma, isto é, refere-se à quantidade de anéis presentes em 2,5 cm de comprimento ou uma polegada. A madeira densa deve ter seis ou mais anéis de crescimento, madeira de média densidade deve ter quatro ou mais anéis de crescimento, e madeira de baixa densidade deve ter menos de quatro anéis de crescimento.

Moura *et al* (2012) desenvolveram um método de classificação visual para uso estrutural da madeira da espécie de pinus que permite classificar em classe de resistência e rigidez semelhante que formarão parte de um mesmo grupo de qualidade, desta forma cada grupo de classificação possuirá características homogêneas de qualidade, onde considera-se o comprimento das peças, a localização e a natureza dos nós. O desvio de grão, os empenamentos e as fendas de acordo com a quantidade de defeito. E, dependendo da quantidade de

defeito observado é atribuído um nível de qualidade para as peças. A partir desta classificação pode-se separar as peças em quatro grupos de classes: Estrutural Especial (ES), Estrutural nº1 (S1), Estrutural nº2 (S2) e Estrutural nº3 (S3) e quanto a densidade de anéis da madeira em Densa (D) e Não-Densa (ND), conforme Quadro 17.

**Quadro 17** - Condições para Classificação Visual de Peças Estruturais de Madeira tipo pinus.

Defeitos	Classes			
	E	S1	S2	S3
Rachaduras	60 cm	60cm	90 cm Ou $\frac{1}{4}$ do comprimento da peça	$\frac{1}{6}$ do comprimento da peça, sem limitações se atravessar a largura da peça
Nós Cariado, Nó solto, Nó vazado e Nó de Gravata	Não admissível	Não admissível	$\frac{1}{3}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)	$\frac{1}{2}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)
Nó firme e Nó espora	$\frac{1}{6}$ (limite do diâmetro dos nós)	$\frac{1}{4}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)	$\frac{1}{3}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)	$\frac{1}{2}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)
Nó de quina	Não admissível	$\frac{1}{4}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)	$\frac{1}{3}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)	$\frac{1}{2}$ (limite do diâmetro dos nós na largura da seção transversal)

Fonte: Moura *et al* (2012).

De acordo com Moura *et al* (2012), um melhor aproveitamento da madeira pode-se obter através da visibilidade do grupo por semelhança de propriedades, divididas em classes. Assim, definem-se os usos mais adequados podendo ser criado um projeto mais econômico e seguro. A adequação das peças é muito importante para se ter propriedades mecânicas mais elevadas e uniforme à estrutura, além, de possibilitar menos desperdício. O mercado de madeira serrada no Brasil ainda carece de modernização e, introdução de procedimentos de classificação de suas peças visando igualar-se com o mercado norte-americano e europeu através de normas e, manuais de classificação como este de Moura *et al* (2012). A madeira pode e deve ser um produto classificado como são o aço e o concreto.

### 2.6.2 Classificação Visual do Bambu

A Norma *Indian Standard* - IS 6874 N313 (2008) não especifica uma metodologia para a classificação visual do bambu, porém, recomenda-se uma limpeza geral, para a retirada de partes indesejadas do bambu. A norma aborda os métodos de teste para bambu. Para que as propriedades de uma espécie possam ser testadas, a norma referencia que os colmos devem ser sólidos, livres de defeitos e seguir o padrão quanto aos defeitos admissíveis e não admissíveis. Defeito admissível é a descoloração que é uma alteração normal da cor do bambu. Já os defeitos não admissíveis referem-se a ataques de broca; degradação dos colmos; rachaduras e manchas azuis. Tais defeitos afetam as propriedades de resistência do bambu. A parte inferior do colmo, não deve ser torta com entrenós muito curtos. Nos colmos superiores o diâmetro não deve ser muito fino e com parede fina. Na verdade, não foi encontrado a existência de uma norma que especifique uma metodologia para tal classificação visual, o que se faz é o que está especificado nesta norma IS 6874 (2008).

De acordo com Trujillo [200...], alguns aspectos devem ser levados em conta, quanto a classificação visual de madeira e bambu segundo as normas ISO 22156 e a NSR-10, Segue a seguinte classificação visual: (Quadro 18).

**Quadro 18** - Aspectos a considerar na classificação visual de madeira e bambu

Material	Material de Bambu (redondo)
Exemplo código	NSR-10 (AIS, 2010)
Fissuras	Fissuras são controlados, e não deve ser colocada no eixo neutro do membro. O comprimento da fissura também deve ser controlada.
Distorção do colmo	O arco não deve exceder 0,33%.
Esmoado	Não mencionados, não aplicável a bambu.
Rachadura	Não é permitido
Danos de inseto (ataque de Xilófagos)	Não é permitido
Nós	Não mencionados, não aplicável ao bambu
Inclinação de grãos	Não mencionados, não aplicável ao bambu
Cone	Cone não deve exceder 1% (ISO 22156 limites para 1 em cone 170).
Densidade e/ou taxa de crescimento	Nenhuma corrente consideração
Maturidade é controlada	Nos colmos deve ser de 4 a 6 anos de idade
Madeira de reação (comp. Tensão & madeira)	Nenhuma corrente consideração Esses fenômenos não têm sido relatadas para bambu
Outros	Não mencionados A casca e a resina não presentes em bambu

Fonte: Trujillo (não especificado) adaptado norma NSR-10 (AIS, 2010)

## 2.7 CLASSIFICAÇÃO NÃO DESTRUTIVA POR ULTRASOM

2.8 A classificação não destrutiva deve ser feita em cada material distinto, separadamente.

### 2.8.1 Classificação não-destrutiva para madeira

A madeira, por ser um material natural, apresenta grande variabilidade em suas características. Este comportamento está relacionado com alguns fatores: à fisiologia das árvores, à classificação botânica e às condições ambientais e climáticas. Algumas propriedades da madeira podem influenciar estes fatores, como: a geometria dos anéis de crescimento, a idade das diferentes camadas, o nível de lenhificação das paredes das células componentes dos elementos anatômicos, a incidência de nós ou fibras reversas, a distribuição e a concentração dos constituintes celulares (OLIVEIRA *et al*, 2000).

O ensaio não-destrutivo é uma alternativa para em curto intervalo de tempo, estimar o efeito, por exemplo de degradação biológica, detecção de

defeitos ou descontinuidades internas, e avaliar as propriedades mecânicas do material, dentre elas o módulo de elasticidade (ESPELHO, BERALDO, 2008).

É possível uma classificação mais eficaz por meio de métodos não destrutivos (OLIVEIRA, 2000), além de permitir avaliar também a influência das irregularidades sobre as propriedades mecânica da madeira (CANDIAN, 2007), não sendo necessária a extração de um corpo de prova, já que a avaliação é feita na própria peça ou estrutura sem alterar sua capacidade de uso final (OLIVEIRA, 2000).

A técnica do ensaio não destrutivo, pelo emprego da técnica de ultrassom apresenta diversas vantagens como baixo custo de aquisição do equipamento quando comparado ao custo de máquinas de classificação automática, facilidade de treinamento da mão-de-obra para a utilização do equipamento, melhora o controle de qualidade dos processos através de uma maior uniformidade na matéria-prima e em seus derivados (CANDIAN *et al*, 2006).

Com a classificação mecânica consegue-se majorar o coeficiente de modificação  $K_{mod,3}$ , resultando em um ganho de confiabilidade estrutural. (CANDIAN, 2007). Verifica-se a existência ou não de descontinuidade ou defeitos, por meio de princípios físicos, sem alterar as características físicas, químicas e mecânicas ou dimensionais, sem interferir em seu uso posterior (ABENDE, 2015).

O método de ultrassom baseia-se na propagação de ondas-sônicas que determina a rigidez de peças de madeira, como também, possibilita detectar aspectos de qualidade da madeira como por exemplo os nós e as medulas, (CANDIAN, 2007), e aplicável aos mais variados tipos ou forma de materiais (ANDREUCCI, 2016).

De acordo com Oliveira (2000) e Stangerlim (2010) a avaliação não destrutiva por meio da técnica de emissão de ondas de ultrassom, atualmente aparece como sendo um dos métodos mais aplicados e promissores, devido à operação e custo relativamente baixo na aquisição e operacionalização do equipamento, quando comparado aos equipamentos utilizados em ensaios destrutivos com máquinas de classificação automática muito utilizadas nos EUA e Europa que são oneroso em razão do tempo consumido com a confecção dos corpos de prova e custo dos equipamentos, já que os ensaios são realizados por meio de amostragem e não da peça real de uso, sendo o treinamento

relativamente simples para a mão de obra para a utilização do equipamento. O ultrassom é caracterizado pela utilização de frequências acima de 20 000 Hz.

A determinação das propriedades mecânicas através de teste não destrutivo é baseada na relação entre velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade do material (OLIVEIRA, 2000).

A propagação das ondas acústicas na madeira depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular e a velocidade de propagação da onda longitudinal na madeira que se relaciona ao módulo de elasticidade da madeira, na direção de propagação e de sua densidade.

Segundo Oliveira (2000), o teste não destrutivo consiste na aplicação e medição de ondas acústicas, onde faz-se o posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado, a onda acústica é introduzida no material por um dos transdutores e captada pelo outro transdutor, sendo a contagem de tempo, em microssegundos, realizada e registrada pelo próprio instrumento de ultrassom. O módulo de elasticidade dinâmico é determinado pela equação:

$$MOE_d = \rho \times V^2$$

Onde:

MOE<sub>d</sub> - módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

$\rho$  - densidade da madeira (Kg/m<sup>3</sup>);

V – velocidade da onda longitudinal (m/s)

Pelo fato da madeira ser um material biológico e anisotrópico, suas características físicas que podem influenciar na propagação das ondas ultrassônicas (BUCUR, 1992).

Segundo Bartholomeu (2001), algumas variáveis influenciam a velocidade de propagação do som além da propriedade física, como a dimensão da seção transversal, o comprimento da peça e o teor de umidade. Existe uma forte relação entre velocidade de propagação de ondas e umidade. A densidade é influenciada diretamente pela umidade o que faz diminuir a velocidade de ultrassom alterando o valor do módulo de elasticidade dinâmico. Assim, a umidade afeta a velocidade de propagação de dois modos: quanto à rigidez da

peça e à densidade da peça. A água livre aumenta a atenuação do resultado numa diminuição das velocidades nas direções longitudinais, radial e tangencial (KABIR, 1997).

Da mesma forma que o teor de umidade afeta as propriedades mecânicas da madeira em ensaios estáticos, a umidade também o faz nas propriedades mecânicas via ensaios dinâmicos (BARTHOLOMEU, 2001).

### 2.8.2 Classificação não-destrutiva do bambu

De acordo com Liese (2004) os colmos de bambu imaturo dificilmente sofrem ataque do caruncho (*Dinoderus minutus*), pois ainda não apresentam amido em suas células parenquimatosas, o que não ocorre com bambus com idade superior a três anos, onde ocorre um espessamento das paredes das células, portanto, a disposição de amido é mais acentuada tornando-os mais vulneráveis ao ataque de caruncho.

Segundo Espelho, Beraldo (2008), a parte mediana e o topo do bambu apresentam menor durabilidade do que a parte basal do colmo e a parte interna sofre mais ataque que a parte externa, devido à estrutura anatômica, pois há maior concentração de células parenquimatosas interna – local de depósito de amido.

Segundo os autores que analisaram o desempenho físico-mecânico ao longo do tempo, de taliscas de bambu obtidas de colmos com o tratamento *Boucherie* Modificado. Através de ensaios não destrutivo, o estudo mostrou que o módulo dinâmico ( $MOE_d$ ) sempre apresentou valores superiores ao módulo elástico (MOE), fato este também, constatado em estudos realizados como a madeira (ESPELHO, BERALDO, 2008).

Assim, a classificação não-destrutiva torna-se uma importante ferramenta para melhorar o controle de qualidade dos processos através do controle da variabilidade da matéria prima (madeira e bambu) e de seus derivados (OLIVEIRA, 2000).

De acordo com Felisberto *et al.* (2016), no caso de colmos de bambu o ensaio não destrutivo ajuda a avaliar o comportamento de colmos de bambu quando exposto ao ataque do caruncho (*Dinoderus minutus*) e à ação de fungos

que torna o colmo mais frágil quando há o ataque de alguns destes elementos. Com o ensaio não destrutivo é possível melhorar o controle de qualidade do material de bambu com e sem ataque de caruncho e/ou fungo, permitindo uma classificação mais padronizada e homogênea quanto ao MOE<sub>d</sub>. E, por conseguinte com propriedades mecânicas similares.

De acordo com Gonzalez *et al.* (2001), a avaliação não destrutiva da madeira e do bambu por meio da técnica de emissão de ondas de ultrassom, atualmente é um dos métodos mais aplicados e promissores, em função da facilidade de operação e custo.

## 2.9 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A norma ANSI/APA PRG 320 (2012) permite que seja utilizado uma ou duas espécies diferentes para compor um painel de CLT, desde que cada espécie ocupe uma camada diferente.

O material bambu é uma alternativa para utilizar juntamente com a madeira de pinus *spp* de baixa classificação, por ser um material renovável, com rápido crescimento. Comparado a madeira de pinus, apresenta alta produtividade por hectare, baixo custo de manutenção desde o plantio até a fase adulta, com algumas características físicas, químicas e mecânicas superiores às madeiras;

A espécie *D. giganteus* é a espécie mais viável para utilizar na elaboração de painéis de BLC, por ter paredes com espessura maior comparada com outras espécies de bambu;

Através de estudos realizados por Alencar (2015) observou-se que é viável utilizar material de baixo valor agregado e madeira de baixa classificação na elaboração de painel estrutural de CLT. Pode-se observar através deste estudo resultados superiores ou similares aos estudos comparados com a literatura nos testes de flexão, acima dos padrões comparados com a norma ANSI/APA PRG 320 (2012);

A maturidade<sup>1</sup> e classificação do material é de extrema importância para alcançar padrões de um painel de CLT estrutural, podendo diminuir a rigidez dos painéis de CLT de acordo com Bâno *et al* (2016);

A classe da madeira pode interferir na rigidez do painel. Peças serão classificadas como primeira categoria quando houver a aplicação simultânea de classificação visual e mecânica e for de alta qualidade, caso tenha sido realizada as duas classificações tanto visual quanto mecânica nos painéis e as peças são de baixa qualidade, estes painéis serão descartados, e se não tiver dentro da classificação de qualidade também serão descartadas. Também, serão classificadas de segunda quando houver somente classificação visual. Aumenta muito a resistência da peça se forem realizadas tanto a classificação mecânica quanto a visual e forem classificadas de alta qualidade. Desta maneira madeira com densidade mais elevada confere maior rigidez ao painel.

Algumas características do bambu também podem interferir na característica mecânica como: espécie, idade, tipo de solo, época colheita, condições climáticas, teor de umidade, localização no comprimento colmo, presença e ausência de nós e defeitos e maturidade do colmo (PEREIRA, BERALDO 2008).

Há importância da classificação não destrutiva na homogeneização do material a ser colado, permitindo selecionar materiais com propriedades mecânicas similares. A incidência de defeitos como nós, a utilização da técnica *finger joint* diminui resistência mecânica dos painéis;

Outros elementos que interferem na resistência mecânica laminação cruzada são posição do material (casca e fundo) e direção do material (paralela e perpendicular) (OLIN, 1990).

Não se encontraram normas de classificação visual do bambu, assim utilizou-se IS-6874 (2008) que não especifica uma classificação visual para o bambu, mas sim uma limpeza geral para retirada das partes indesejadas;

Vários adesivos sintéticos são utilizados na concepção de painéis de CLT, como: Melanina ureia formaldeído, Fenol-resorcinol-formaldeído, Poliuretano e Isocianato. (FPINOVATIONS, 2013). O adesivo à base de óleo de mamona se coloca como alternativa de adesivo pelas qualidades que tem:

---

<sup>1</sup> Madeira do desbaste normalmente contém uma grande porcentagem de madeira juvenil

usado como alternativa de produção mais limpa pois, é proveniente de fonte renovável (*Ricinus communis L.*), biodegradável, causa menos impacto ambiental comparado com os adesivos sintéticos, porém será uma alternativa de teste para painéis de CLTB.

O tipo de adesivo, a forma de aplicação e qualidade da colagem também interferem na resistência mecânica do painel (ALENCAR .2015)

De acordo com Alencar (2015), Adesivo recomendado para uso estrutural são os chamados de estruturais pois, mantém sua resistência e rigidez sob saturação de água e secagem cíclica mais severa: MUF, Isocianato e Poliuretano.

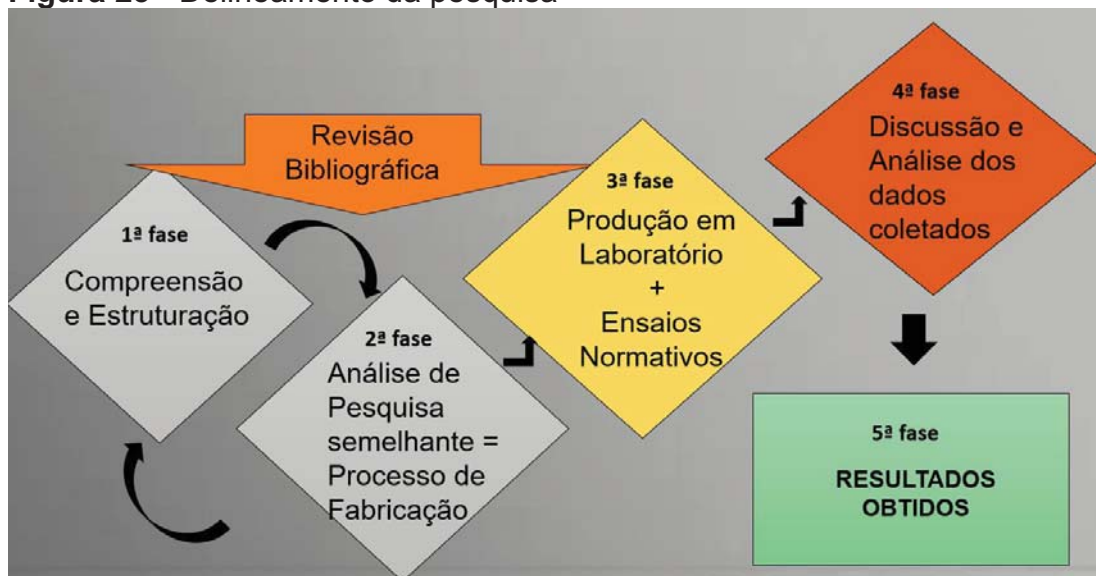
Elementos que interferem no processo de colagem: densidade, porosidade e umidade do material e do ambiente. A densidade da madeira indica a quantidade de espaços vazios disponíveis para o adesivo. Quanto menor for a densidade, maior será a permeabilidade de sua estrutura e, mais forte será ligações interfacial formada entre adesivo e madeira, porém quanto menor for a densidade da madeira, menor será a sua resistência mecânica (menos rígido) (VITAL *et al*, 2006).

Peças provenientes de regiões menos densas, mais curtas, com maior número de *finger joint* e sem um processo de classificação podem ser utilizadas somente em camadas transversais dos painéis, que são as camadas menos solicitadas mecanicamente (ALENCAR, 2015)

Nível de industrialização, equipamento mecânico, sistema automatizado e controle de qualidade também interferem na resistência do painel.

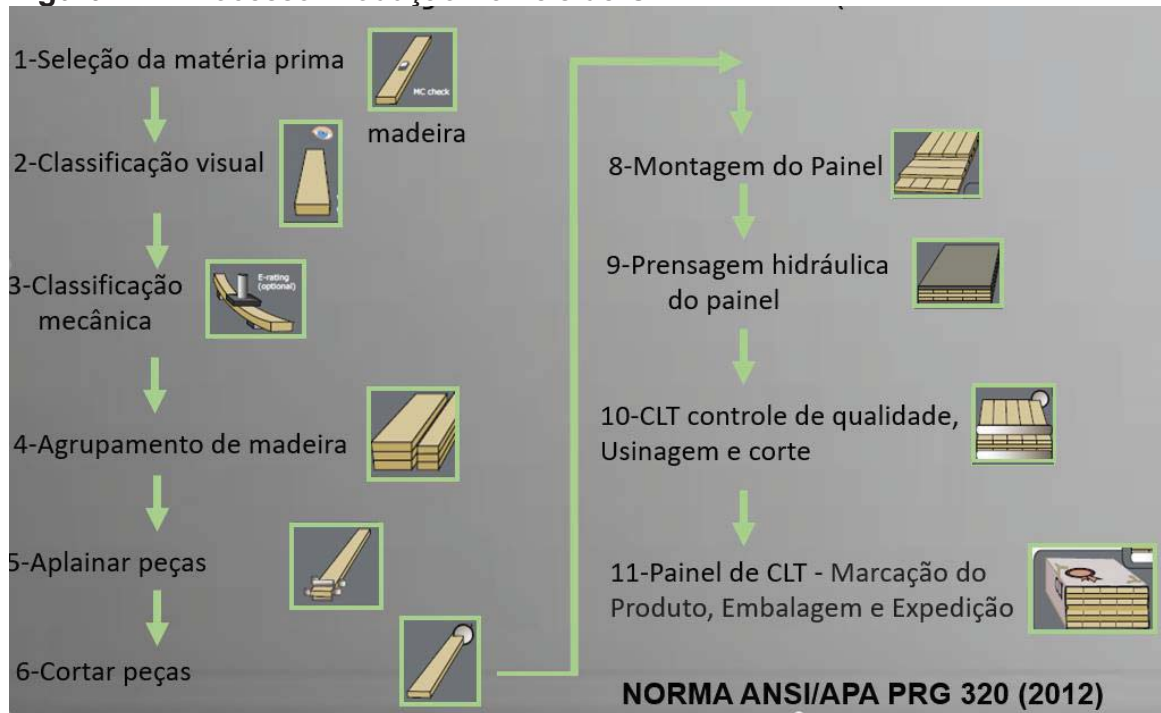
Não se encontraram trabalhos de Painel de Madeira e Bambu Laminado Coldado Cruzado, a normatização para o material bambu e pinus é inexistente para elaboração de painéis de CLT, portanto, adaptações normas e métodos foram necessárias.

O delineamento desta pesquisa de produção de painel estrutural de CLTB de acordo com as normas utilizadas em CLT será feita conforme Figura 23.

**Figura 23 - Delineamento da pesquisa**

Fonte: Autor (2018)

O processo de Produção dos Painéis de CLT segundo *FPINNOVATIONS*, 2013, em que segue Produção Industrial com equipamentos mecânicos, sistemas automatizados e Controle de qualidade segue na figura 24.

**Figura 24 - Processo Produção Painéis de CLT**

Fonte: Autor: *Fpinnovations* (2013)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental desta pesquisa foi desenvolvida no laboratório de maquetes da Universidade Estadual de Londrina.

Os materiais utilizados no estudo foram bambu da espécie *D. giganteus* e tábuas de madeira da espécie *Pinus spp.*

Os colmos de Bambu vieram de duas origens: Universidade Estadual de Londrina (UEL), e Jardim Botânico de Londrina. O material da UEL foi cortado dia 23 de dez de 2016 e do Jardim Botânico, dia 17 de fevereiro de 2017, chegando ao laboratório da UEL no dia 19 de fevereiro de 2017.

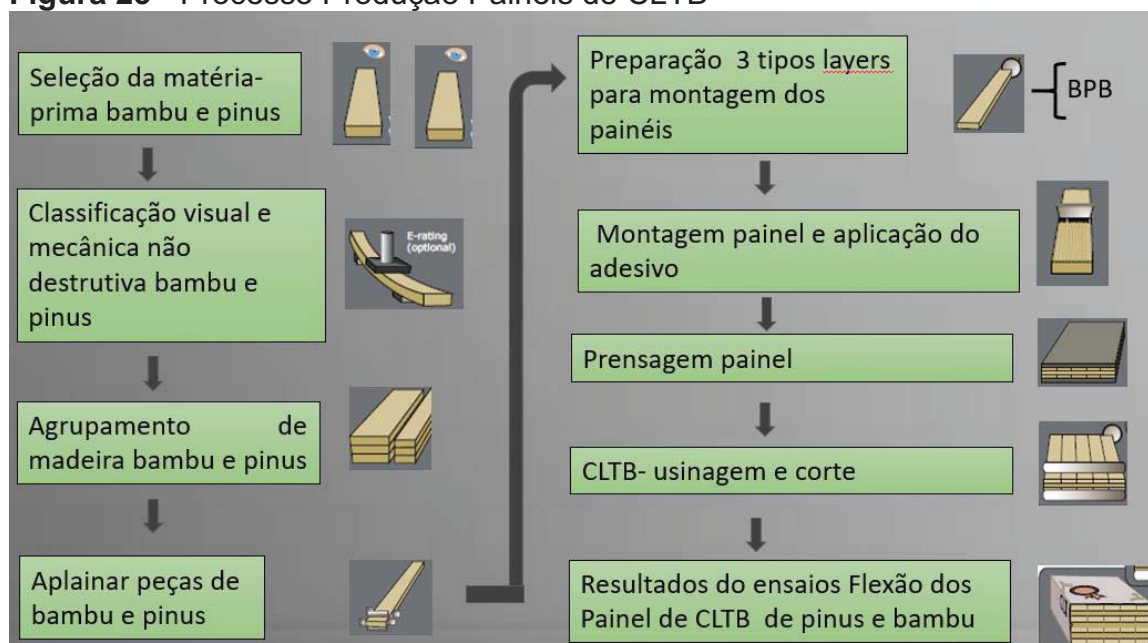
Pereira, Beraldo (2008) indicam o inverno como a melhor época para colheita do bambu. No Brasil são os meses sem o “r”, os meses maio, junho, julho e agosto. Nesta época os colmos de bambu apresentam menor teor de umidade e, por conseguinte estão mais leves, facilitando o corte e o transporte. O bambu com menos seiva, diminui ataque de fungos e insetos. Porém, nesta pesquisa, não foi possível a coleta na estação indicada pelos autores por questões de ordem prática. Para mitigar o aparecimento de insetos, o material foi imunizado através da aplicação de inseticida Jimo Cupim.

A metodologia seguiu as seguintes etapas

- Classificação visual e mecânica não destrutiva por meio de ultrassom das peças de pinus e bambu.
- Ensaio de colagem em corpos de prova de cisalhamento com bambu/pinus e bambu/bambu utilizando 3 tipos de adesivos, MUF - Melanina Ureia Formaldeído, EPI - Isocianato e a AGT a base de óleo de mamona e nas duas direções de orientação das fibras de cada material.
- Montagem de painéis de CLTB com camadas de bambu/pinus/bambu;
- Ensaio de flexão em 4 pontos dos painéis.

O processo de produção dos Painéis de CLTB seguiu a processo conforme figura 25.

**Figura 25 - Processo Produção Painéis de CLTB**



Fonte: Autor (2018)

### 3.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS PEÇAS DE PINUS E BAMBU

A classificação foi realizada de acordo com a norma NBR1700 (1990) e ASTM D245 (1998) seguindo as recomendações de Moura *et al* (2012). Para elaboração dos corpos de prova selecionou-se a madeira sem defeito, imperfeições, como: nós, trincas, arqueamento, curvatura, torção da peça.

De acordo com a norma IS 6874 (2008), já mencionada anteriormente no item 2.6.2, recomenda-se que se faça uma limpeza geral, para a retirada de partes indesejadas do bambu.

A classificação visual do bambu seguiu os parâmetros das normas ISO 22156 e a NSR-10 e norma IS 6874 N313 (2008) não se admitiu as peças com broca (*Dinoderus minutus*), nem ataque de outros insetos, nem degradação, nem manchas azuis, rachaduras, fissuras nos colmos, curvatura, torção da peça também. Os colmos colhidos eram maduros, com idade acima de 3 anos, e

foram escolhidos somente aqueles da parte da base da primeira tora sendo cada tora referenciada com número seguido de uma letra.

A norma ASTM D-905 (2003) recomenda espessura mínima de 16 mm, porém no material obtido, a espessura foi adaptada para este experimento com espessura de 9 mm. Foram selecionados os colmos os mais retos possíveis.

### 3.2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ADESÃO EM CORPOS DE PROVA DE CISALHAMENTO

#### 3.2.1 Determinação do Teor de Umidade

Antes de iniciar a elaboração dos corpos de prova, foi realizada a determinação da umidade do material, de acordo com a norma NBR 7190 (1997). As Amostras (6 de bambu e 2 de pinus) foram pesadas e colocadas em estufa a uma temperatura 103°C, por 24 horas. Após este período, as amostras foram pesadas novamente como mostra o quadro 19.

**Quadro 19** – Resultados teor de umidade

Corpo de prova	Peso inicial(gramas)	Peso final (gramas)	Teor de Umidade
			(%)
1- Colmo 9A	21,88	19,48	12,32
1- Colmo 9A	22,08	19,61	12,59
2- Colmo 6A	15,05	13,38	12,48
3- Colmo 6A	15,99	14,32	11,66
4- Colmo UEL	17,94	15,95	12,47
5- Colmo UEL	20,85	18,62	11,97
<b>Média</b>	-	-	<b>12,25</b>
<b>DP</b>	-	-	<b>0,33</b>
<b>COV(%)</b>	<b>14,75</b>	<b>20,25</b>	<b>2,7</b>
1- Pinus	14,38	12,9	11,47
2- Pinus	19,94	17,74	12,4
<b>Média</b>	-	-	<b>11,935</b>
<b>DP</b>	-	-	<b>0,38</b>
<b>COV(%)</b>	-	-	<b>3,18</b>

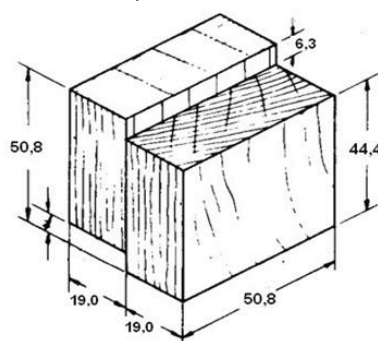
Fonte: Autor (2017) Legenda: CV- coeficiente de variação, DP- desvio padrão

O quadro mostra a média de 12,25% para os corpos de prova de bambu e 11,93% para o pinus. O coeficiente de variação foi de 2,7% para o bambu e de 3,18% para o pinus, evidenciando a adequação dos materiais para colagem.

### 3.2.2 Elaboração dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram confeccionados livre de defeitos de acordo com as normas ASTM 905 (2008) e NBR 7190 (1997) conforme figura 26.

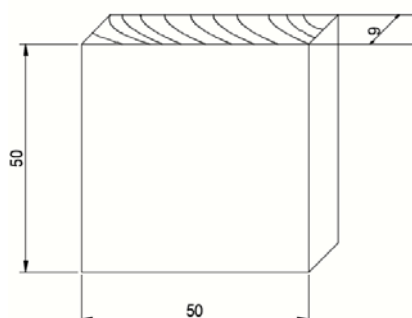
**Figura 26** - Corpo de prova (CP) para a realização do ensaio de cisalhamento da linha de cola (dimensões em mm).



Fonte: ASTM D-905 (2003)

A norma ASTM D-905 (2003) exige que os corpos de prova tenham as seguintes dimensões 50,8 x 50,8 x 19mm de acordo com a Figura 20, porém como a espessura dos colmos de bambu não atingiram este valor, admitiu-se corpos de prova com espessura de 9mm, ficando com as seguintes dimensões 50 x 50x 9mm (Figura 27).

**Figura 27** - Corpo de prova para a realização do ensaio de cisalhamento da linha de cola (dimensões em mm).



Fonte: Autor (2018)

Para a confecção dos corpos de prova, primeiramente separaram-se tanto os colmos de bambu, assim como as tábuas de pinus livres de defeito.

Os colmos de bambu foram desdobrados com auxílio de uma serra circular adaptada conforme figura 28.

**Figura 28** - Adaptação da serra circular para desdobro do bambu.



Fonte: Autor (2018)

Para definir a espessura dos corpos de prova, e conseqüentemente o tamanho das régua que seriam cortadas para compor o painel de CLTB, foram realizados ensaios preliminares de compressão normal sobre régua de bambu. Foram testadas várias medidas até encontrar uma dimensão onde a régua de bambu ao passar pelo teste de compressão não apresentasse nenhum tipo de fissura. As dimensões testadas foram entre 45 e 70mm de largura, 400 mm de comprimento e 9mm de espessura, para que houvesse um maior aproveitamento em relação a curvatura do bambu. Nas peças com dimensões acima de 45mm observou-se algum tipo de fissura. Portanto, a dimensão mínima encontrada em que não houve nenhum tipo de fissura foi de 50mm, sob carregamento de 3 toneladas. As dimensões finais do corpo de prova de colagem foram de 50 x 50 x 9mm. Por conseqüência da curvatura do colmo (Figura 27 e 29).

**Figura 29** – Régua de bambu com dimensão de 50mm e espessura de 9mm já lixada.



Fonte: Autor (2018)

Após o corte dos corpos de prova foi feita uma seleção para que tivessem as dimensões mais regulares e uniformes possíveis (Figura 30).

**Figura 30** - Seleção dos corpos de prova.

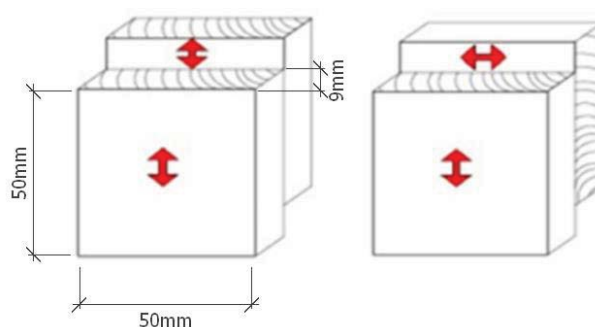


Fonte: Autor (2018)

As peças de pinus e bambu foram lixadas a fim de retificar a curvatura.

Para se realizar o ensaio de cisalhamento na linha de cola, os corpos de prova foram feitos em duas direções: paralela à fibra e perpendicular às fibras (Figura 31).

**Figura 31** - Orientação das fibras dos corpos de prova para a realização do ensaio de cisalhamento da linha de cola conforme norma ASTM 905 (2008).



Fonte: Autor (2018)

Os corpos de prova foram elaborados segundo descrito no quadro 20.

**Quadro 20:** Agrupamento dos corpos de prova de acordo com material, posição do material, direção e tipo de adesivo utilizado.

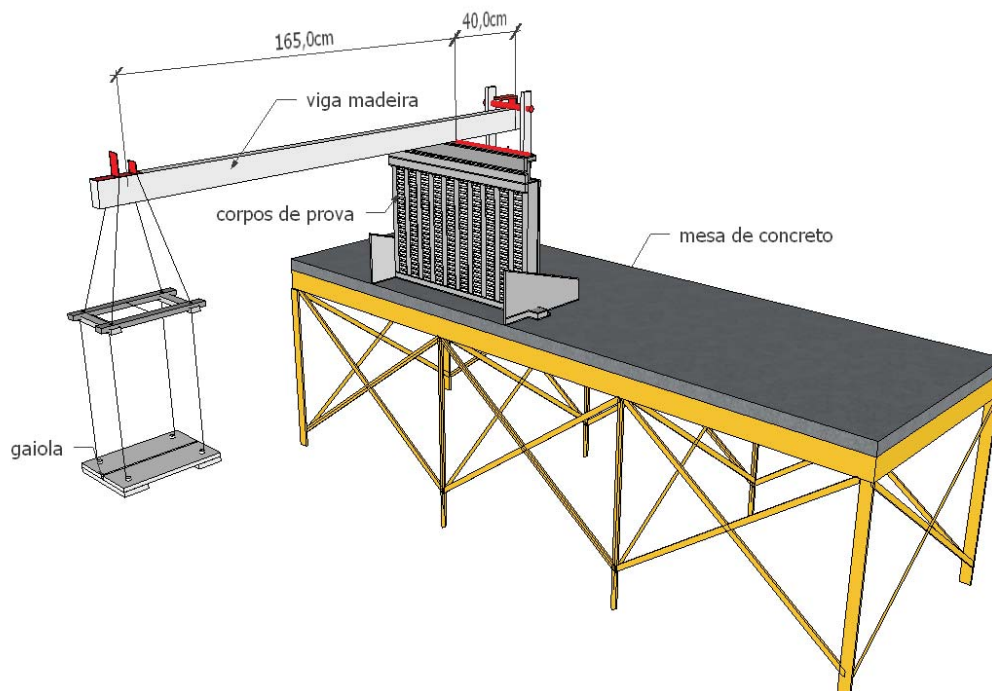
Quantidade corpos de prova	Material	Posição do material	Direção	Adesivo	Adesivo	Adesivo
13 corpos de prova	bambu + bambu	parte externa + parte externa	paralela	MUF	EPI	AGT
13 corpos de prova	bambu + bambu	parte interna + parte externa	paralela	MUF	EPI	AGT
13 corpos de prova	bambu + bambu	parte externa + parte externa	perpendicular	MUF	EPI	AGT
13 corpos de prova	bambu + bambu	parte interna + parte interna	perpendicular	MUF	EPI	AGT
13 corpos de prova	bambu + pinus	parte externa + pinus	paralela	MUF	EPI	AGT
13 corpos de prova	bambu + pinus	parte interna + pinus	paralela	MUF	EPI	AGT
13 corpos de prova	bambu + pinus	parte externa + pinus	perpendicular	MUF	EPI	AGT
13 corpos de prova	bambu + pinus	parte interna + pinus	perpendicular	MUF	EPI	AGT

Fonte: Autor (2018) Legenda: parte externa= capa do bambu e parte interna interior do bambu

No total foram confeccionados 312 corpos de prova, 104 foram colados com os adesivos MUF- melanina ureia formaldeído, 104 com o adesivo EPI - isocianato 104 com o adesivo AGT 1315 a base de óleo de mamona.

Para se agilizar o processo foi projetado aparato capaz de receber 156 corpos de prova cada vez (Figura 32).

**Figura 32** - Prensa criada no laboratório de maquete da UEL com princípio de alavanca para teste de colagem dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2018)

Um gabarito de colagem foi estabelecido para agilizar o processo de colagem dos corpos de prova (Figura 33).

**Figura 33** - Gabarito para colagem de corpo de prova ASTM 905 (2005).



Fonte: Autor (2018)

Os corpos de prova ficaram na prensa por 24 horas segundo recomendações do fabricante e em seguida, retirados para ensaio.

### 3.2.3 Teste de Cisalhamento no plano de colagem

O teste de Cisalhamento Foi realizado de acordo com a norma ASTM D 905 (2008).

Para este teste utilizou-se uma prensa manual, adaptada para acomodar o corpo de prova, conforme a Figura 34.

**Figura 34** - Teste de cisalhamento na compressão sem o corpo de prova (à esquerda); com corpo de prova (ao centro); prensa manual (à direita).



Fonte: Autor (2018)

Na sequência da ruptura avaliou-se o percentual de falha da madeira das partes dos corpos de prova. Foi considerado como falha da madeira de pinus ou bambu a fratura profunda, com arrancamento de partes da madeira; falha média com pouco arrancamento de madeira e falha rasa com a presença de fibras superficiais da ruptura na superfície (ALENCAR, 2015).

Para o cálculo da tensão de cisalhamento nos corpos de prova foi utilizada a seguinte fórmula:

$$F_c = \frac{F \times 9,81 \times K_{anel}}{A} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Onde:

$F_c$  - Tensão de cisalhamento

$F$  - força aplicada

9,81 constante de transformação de unidade

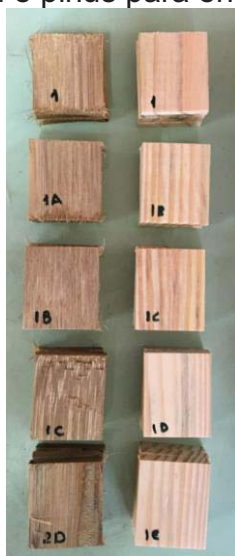
$K_{anel}$  - constante do anel = 23,2108

$A$  - área (mm<sup>2</sup>)

### 3.3 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE NO MATERIAL DE COMPOSIÇÃO DOS PAINÉIS

Antes de iniciar o ensaio não destrutivo das lâminas ou lamelas (termo utilizado após usinagem das ripas de bambu) de bambu e pinus, foi realizada a determinação do teor de umidade do material. Foram retiradas aleatoriamente 15 amostras das lâminas de bambu e 15 amostras aleatórias de pinus (Figura 35), pesadas e levadas à estufa a uma temperatura 103°C de acordo com a norma NBR 7190 (1997), por 24 horas. Após este período, as amostras foram pesadas novamente como mostra os resultados no quadro 20.

**Figura 35** - Amostras de bambu e pinus para ensaio de umidade



Fonte: Autor (2018)

**Quadro 21** – Teor de umidade do material de composição dos painéis

	<b>teor de umidade Bambu(%)</b>	<b>teor de umidade Pinus(%)</b>
	<b>porcentagem de umidade (%)</b>	<b>porcentagem de umidade (%)</b>
<b>Valor máximo</b>	<b>12,30</b>	<b>13,70</b>
<b>Valor mínimo</b>	<b>13,30</b>	<b>10,71</b>
<b>Média</b>	<b>12,25</b>	<b>12,09</b>
<b>DP</b>	<b>0,49</b>	<b>0,84</b>
<b>COV (%)</b>	<b>4,07</b>	<b>6,69</b>

Fonte: Autor (2018) Legenda: DP- desvio padrão, COV- Coeficiente de variação

### 3.4 CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA NÃO DESTRUTIVA DAS PEÇAS DE PINUS E BAMBU

#### 3.4.1 Ensaio de Ultrassom

Após a Classificação visual, as peças de pinus e bambu foram medidas e pesadas. Posteriormente realizou-se em cada ripa de pinus e bambu o ensaio de ultrassom, para se obter o  $MOE_d$  (Módulo de Elasticidade Dinâmico). As lâminas de bambu foram cortadas com 900 mm e as de pinus foram cortadas com 320 mm, segundo especificações da norma ASTM 198 (2015) que estipula que largura do painel seja maior que 305 mm e comprimento trinta vezes a altura da peça. A ripa foi dimensionada com largura 40mm e o próximo múltiplo acima de 300-seria 320mm sendo que o comprimento foi de 30 vezes da altura. No total foram 3 camadas (de 9 mm) para composição do painel, perfazendo espessura de 27mm. O comprimento foi de 810mm com sobra de 45mm de cada lado para apoio no ensaio de flexão. As dimensões, finais do painel foram 900 x 320x 27 mm.

Foram criados 2 grupos de peças: um grupo com madeira pinus com 40mm largura, 320 mm de comprimento 90 mm de espessura de pinus e outro grupo com peças de bambu com 40mm largura, 900 mm de comprimento e 90mm de espessura.

O equipamento de ensaio de ultrassom utilizado foi da marca Agricef e o modelo USLab, com transdutores com encapsulamento metálico, que operam

com frequência de 435 kHz, pelo qual foi medido o tempo de propagação das ondas em microssegundos ( $\mu\text{s}$ ).

Os transdutores foram colocados no centro de cada extremidade das lâminas de bambu e de madeira com aplicação de uma camada de mais ou menos 1 mm de gel sem álcool, a fim de se obter a velocidade de propagação das ondas pelo meio, através da relação entre tempo de percurso da onda pela distância percorrida, conforme figura 36.

**Figura 36** - Medição de ultrassom nas peças de pinus de 320mm e bambu de 900mm respectivamente.



Fonte: Autor (2018)

### 3.4.2 Peças componentes

A classificação estrutural mecânica não destrutiva das peças de pinus e bambu, seguiu as orientações da norma ASTM D 4761 (2002).

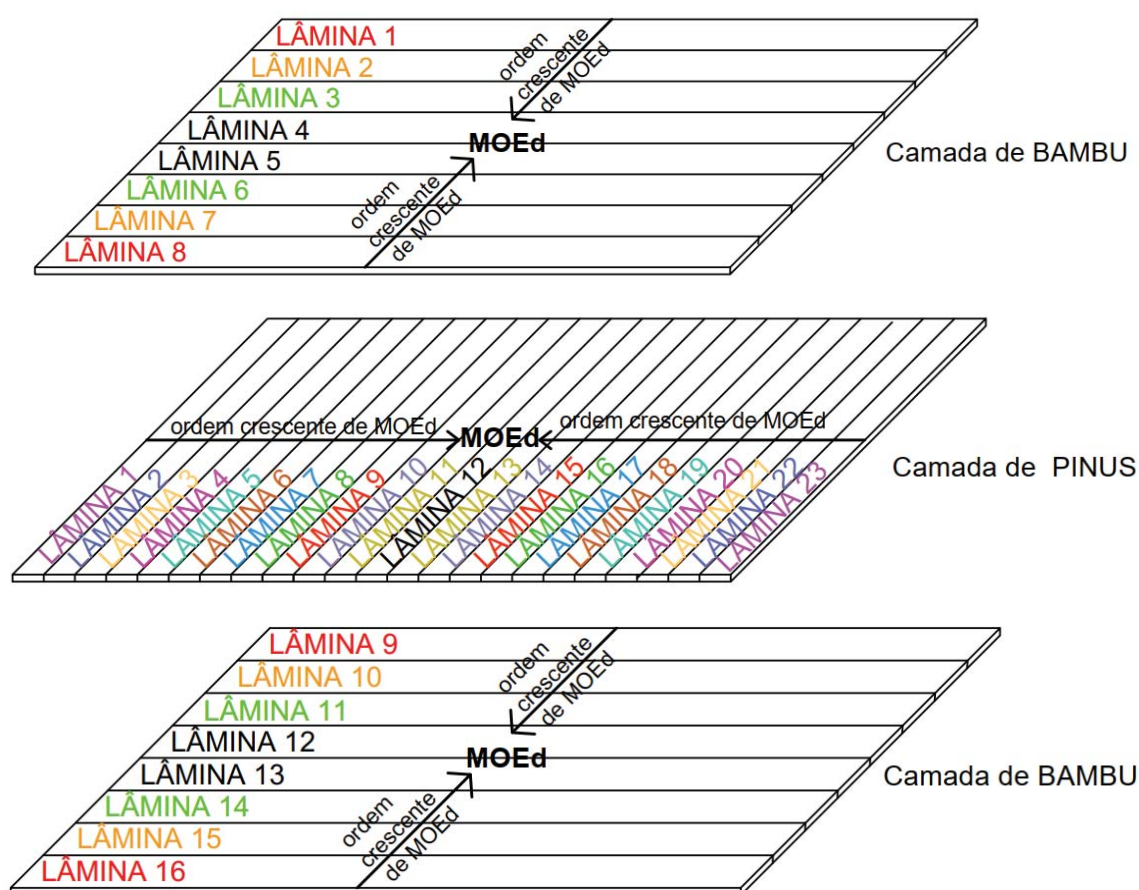
As peças de madeira pinus e bambu, depois de serem classificadas pelo método de ultrassom, foram separadas em ordem crescente de acordo com os valores obtidos de  $\text{MOE}_d$  (módulo de elasticidade dinâmico) e dispostas em quadro para montagem dos grupos. O objetivo deste método é o de criar grupos homogêneos cuja média e desvio padrão das propriedades mecânicas, neste caso expressas pelo  $\text{MOE}_d$ , sejam similares. Os painéis foram concebidos de maneira a que as camadas externas sejam de bambu e a camada interna de madeira.

Constitui-se, o primeiro grupo, de 184 peças de pinus e o segundo grupo de 128 peças de bambu. Foi a quantidade necessária para montar 8 painéis de CLTB com 3 camadas.

A espessura do painel foi determinada através da média de dimensões das peças de bambu obtidas na usinagem e que resultou na espessura média de 9mm. As peças de pinus foram usinadas com a mesma medida, assim sendo, o painel foi composto de 3 camadas obtendo-se a espessura total de 27 mm, 32mm de largura e 900mm de comprimento. As camadas externas compostas por lâminas de bambu e a camada central composta por lâminas de pinus.

A distribuição das lâminas de bambu e pinus seguem conforme figura 37.

**Figura 37** - Disposição das lâminas de bambu e pinus no painel de CLTB



Fonte: Autor, 2018

Como o ensaio aplicado aos painéis vai ser de flexão, a parte central do painel requer maior resistência mecânica comparado as extremidades, devido a especificação do ensaio de flexão pela norma NBR 7190 (1997) em que uma carga pontual é aplicada na parte central do painel. Portanto, os maiores valores de  $MOE_d$  devem estar na parte central do painel. Assim, os valores de  $MOE_d$

crecem das extremidades para a parte central tanto das camadas externas como da camada central do CLTB.

Como o ensaio não destrutivo teve grande amplitude de valores de  $MOE_d$  e para uma melhor análise comparativa entre os 8 painéis, criou-se uma metodologia para distribuição do  $MOE_d$  de forma que ficassem bem próximos a média dos valores do  $MOE_d$  de cada parte do painel entre todos os painéis e o desvio padrão também conforme figura 46.

Cada painel utiliza 16 lâminas de bambu (8 em cada capa longitudinal – camadas superior e inferior) e 23 lâminas de madeira de pinus na camada transversal, no centro de cada painel.

Foi desenvolvido uma metodologia para a distribuição dos valores de  $MOE_d$  em cada camada do painel de CLTB, para que se chegasse numa média de valores de  $MOE_d$  e de desvio padrão similares em cada parte de cada painel. As camadas externas seguiram uma metodologia e a camada central outra.

### Metodologia seguida para distribuição dos valores de $MOE_d$ nas camadas externas do painel CLTB:

**Figura 38** – Distribuição das lâminas de bambu nas camadas externas do painel CLTB de acordo com a ordem crescente de  $MOE_d$  feito no ensaio não destrutivo:

MOEd lamina bambu									
1454,72	↓ripa 1								
2162,97									
2183,74									
2237,17									
2558,16									
2704,43									
2844,02									
3026,39									
3048,65	↓ripa 9								
3080,17									
3106,00									
3225,14									
3439,48									
3491,26									
3548,42									
3877,97									
4263,35									
4400,53									
4579,02									
4579,02									
4628,03									
4635,85									
4667,10									
4697,18	↑ripa 16								
4809,19									
4856,56									
4864,77									
4879,57									
4990,71									
5131,34									
5171,53									
5369,14	↑ripa 8								

Fonte: Autor (2018)

Foram montados grupos dispostos de 32 em 32 lâminas de bambu conforme o valor de ordem crescente de  $MOE_d$  obtidos no ensaio não destrutivo. Cada painel possui 2 lâminas externas em mesma posição no painel (camada superior e inferior, Ex: lâmina 1 e lâmina 9, conforme figura 37) e 2 lâminas em mesma posição tanto na camada superior quanto na *inferior* de cada lado no painel (segue cor feita pelo autor, Ex lamina 1 e 8 e lâmina 9 e 16, conforme figura 37). Demais painéis seguiram a mesma lógica e forma de distribuição dos valores dos  $MOE_d$  como foi feito este primeiro grupo.

**Figura 39** – Sentido da distribuição dos valores dos  $MOE_d$  nas camadas externas do painel *CLTB*.

		painel1	painel 2	painel 3	painel4	painel5	painel 6	painel 7	painel8
lâmina 1	camada externa1								→
lâmina 8	camada externa1	←							
lâmina 9	camada externa2								→
lâmina 16	camada externa2	←							
		painel1	painel 2	painel 3	painel4	painel5	painel 6	painel 7	painel8
ripa 3	camada externa1								→
ripa 6	camada externa1	←							
ripa 11	camada externa2								→
ripa 14	camada externa2	←							
		painel1	painel 2	painel 3	painel4	painel5	painel 6	painel 7	painel8
lâmina 2	camada externa1								→
lâmina 7	camada externa1	←							
lâmina 10	camada externa2								→
lâmina 15	camada externa2	←							
		painel1	painel 2	painel 3	painel4	painel1	painel 2	painel 3	painel4
lâmina 4	camada externa1								→
lâmina 5	camada externa1	←							
lâmina 12	camada externa2								→
lâmina 13	camada externa2	←							

Fonte: Autor (2018)

**Figura 40** – Distribuição das lâminas de bambu conforme o valor de MOE<sub>d</sub> das camadas externas do painel CLTB, seguindo conforme figura 37.

	painel1	painel 2	painel 3	painel4	painel5	painel 6	painel 7	painel8
lâmina 1	1454,72	2162,97	2183,74	2237,17	2558,16	2704,43	2844,02	3026,39
lâmina 8	5369,14	5171,53	5131,34	4990,71	4879,57	4864,77	4856,56	4809,19
lâmina 9	3048,65	3080,17	3106,00	3225,14	3439,48	3491,26	3548,42	3877,97
lâmina 16	4697,18	4667,10	4635,85	4628,03	4579,02	4579,02	4400,53	4263,35
soma MOEd	14569,69	15081,77	15056,93	15081,06	15456,22	15639,49	15649,53	15976,90
	painel1	painel 2	painel 3	painel4	painel5	painel 6	painel 7	painel8
lâmina 3	7353,64	7415,60	7438,15	7677,34	7687,35	7740,74	7780,71	7789,78
lâmina a 6	9695,56	9652,53	9647,88	9567,62	9331,49	9297,27	9248,72	9213,98
lâmina 11	7813,01	7817,61	7863,73	7864,47	8030,35	8286,92	8348,24	8543,74
lâmina 14	9170,28	9108,47	9046,89	9030,52	9003,50	8939,06	8798,53	8684,45
soma MOEd	34032,50	33994,21	33996,65	34139,95	34052,69	34264,00	34176,20	34231,95
	painel1	painel 2	painel 3	painel4	painel5	painel 6	painel 7	painel8
lâmina 2	5382,45	5411,98	5441,08	5543,09	5573,25	5644,41	5767,92	5788,61
lâmina 7	7298,59	7251,38	7236,71	7212,89	7150,64	7116,21	6752,49	6665,77
lâmina 10	5829,96	5832,24	5908,37	5949,90	5993,76	6114,53	6202,25	6295,97
lâmina 15	6649,56	6599,19	6596,50	6524,08	6465,68	6395,46	6386,14	6326,07
soma MOEd	25160,57	25094,80	25182,65	25229,96	25183,33	25270,60	25108,79	25076,41
	painel1	painel 2	painel 3	painel4	painel1	painel 2	painel 3	painel4
lâmina 4	9953,05	9959,96	10136,57	10168,04	10264,19	10272,81	10360,63	10412,47
lâmina 5	15576,59	14624,17	14331,47	14002,25	13099,86	12734,98	12192,04	12184,14
lâmina 12	10453,28	10672,87	10692,62	10927,67	10929,32	11010,94	11118,73	11213,94
lâmina 13	12113,89	11985,41	11692,48	11621,65	11576,65	11398,84	11348,38	11291,46
soma MOEd	48096,81	47242,40	46853,15	46719,62	45870,02	45417,57	45019,78	45102,02

Fonte: Autor (2018)

**Figura 41** – Média da soma dos valores de MOE<sub>d</sub> e desvio padrão de cada painel das camadas externas do painel CLTB

Camada externa superior dos painéis de CLTB com os MOEd								
	painel1	painel 2	painel 3	painel4	painel5	painel 6	painel 7	painel 8
lâmina 1	1454,72	2162,97	2183,74	2237,17	2558,16	2704,43	2844,02	3026,39
lâmina 2	5382,45	5411,98	5441,08	5543,09	5573,25	5644,41	5767,92	5788,61
lâmina 3	7353,64	7415,60	7438,15	7677,34	7687,35	7740,74	7780,71	7789,78
lâmina 4	9953,05	9959,96	10136,57	10168,04	10264,19	10272,81	10360,63	10412,47
lâmina 5	15576,59	14624,17	14331,47	14002,25	13099,86	12734,98	12192,04	12184,14
lâmina 6	9695,56	9652,53	9647,88	9567,62	9331,49	9297,27	9248,72	9213,98
lâmina a 7	7298,59	7251,38	7236,71	7212,89	7150,64	7116,21	6752,49	6665,77
lâmina 8	5369,14	5171,53	5131,34	4990,71	4879,57	4864,77	4856,56	4809,19
média MOEd	7760,47	7706,27	7693,37	7674,89	7568,06	7546,95	7475,39	7486,29
Desvio padrão (DP)	4160,33	3768,91	3705,60	3612,78	3326,83	3204,83	3060,23	3031,32
Camada externa inferior dos painéis de CLTB com os MOEd								
	painel1	painel 2	painel 3	painel4	painel5	painel 6	painel 7	painel 8
lâmina 9	3048,65	3080,17	3106,00	3225,14	3439,48	3491,26	3548,42	3877,97
lâmina 10	5829,96	5832,24	5908,37	5949,90	5993,76	6114,53	6202,25	6295,97
lâmina 11	7813,01	7817,61	7863,73	7864,47	8030,35	8286,92	8348,24	8543,74
lâmina 12	10453,28	10672,87	10692,62	10927,67	10929,32	11010,94	11118,73	11213,94
lâmina 13	12113,89	11985,41	11692,48	11621,65	11576,65	11398,84	11348,38	11291,46
lâmina 14	9170,28	9108,47	9046,89	9030,52	9003,50	8939,06	8798,53	8684,45
lâmina 15	6649,56	6599,19	6596,50	6524,08	6465,68	6395,46	6386,14	6326,07
lâmina 16	4697,18	4667,10	4635,85	4628,03	4579,02	4579,02	4400,53	4263,35
média MOEd	7471,98	7470,38	7442,81	7471,43	7502,22	7527,00	7518,90	7562,12
Desvio padrão (DP)	3025,46	3024,19	2955,12	2954,02	2910,07	2877,34	2889,75	2854,89

Fonte: Autor (2018)

Desta forma as camadas externas de cada painel ficaram com a seguinte

média de valor de  $MOE_d$  e desvio padrão conforme a distribuição dos valores de  $MOE_d$  ou seja, todos painéis ficaram similares quanto ao  $MOE_d$  e desvio padrão.

**Figura 42** - Média dos valores do  $MOE_d$  das camadas externas dos oito painéis de *CLTB*

CAMADAS DO PAINEL		PAINEL DE CLTB							
		painel1	painel 2	painel 3	painel 4	painel5	painel 6	painel 7	painel 8
camada externa -bambu	média MOE (MPa)	7760,47	7706,27	7693,37	7674,89	7568,06	7546,95	7475,39	7486,29
camada central - madeira	média MOE (MPa)	20463,89	20620,61	20710,03	20792,55	20722,91	20826,37	20776,52	20732,29
camada externa - bambu	média MOE (MPa)	7471,98	7470,38	7442,81	7471,43	7502,22	7527,00	7518,90	7562,12
	Média do MOE (MPa)	11898,78	11932,42	11948,73	11979,62	11931,06	11966,77	11923,60	11926,90
	DP	7419,01	7525,12	7588,54	7632,89	7614,03	7672,64	7666,88	7625,79

Fonte: Autor (2018)

### Metodologia seguida para distribuição dos valores de $MOE_d$ na camada central do painel *CLTB*:

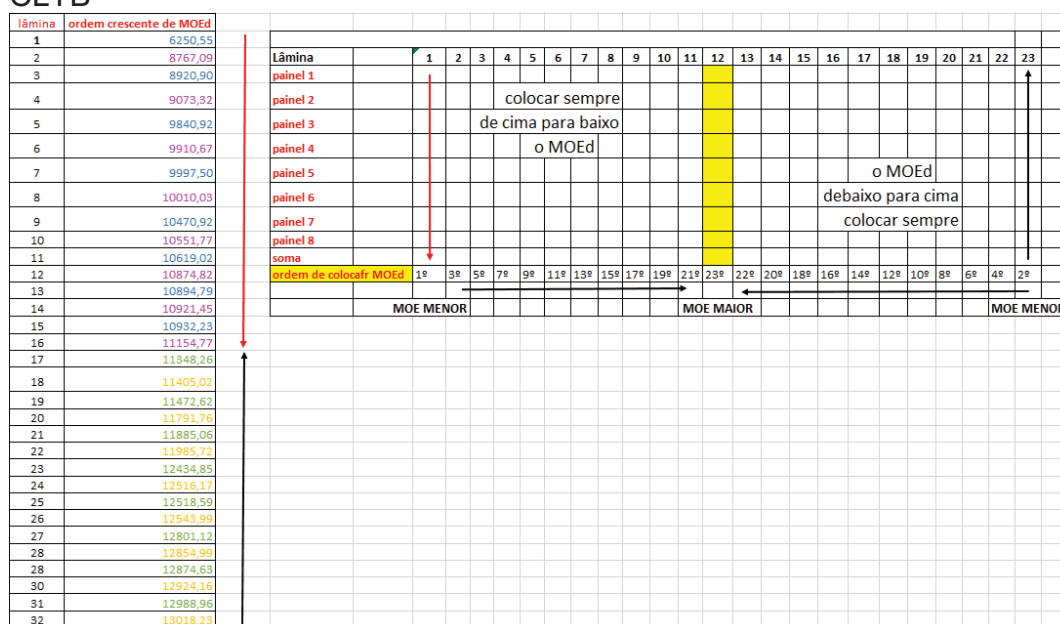
A distribuição das lâminas de madeira de pinus na camada central do painel, se deu das extremidades para o centro de acordo com a ordem crescente do valor de  $MOE_d$  conforme figura 43 e figura 44.

**Figura 43** – Distribuição dos valores do  $MOE_d$  na camada central do painel *CLTB*

	EXTREMIDADE PAINEL											co	CENTRO PAINEL										
lâminas de pinus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	ordem crescente de $MOE_d$												ordem crescente de $MOE_d$										

Fonte: Autor (2018)

**Figura 44** – Distribuição dos valores do MOE<sub>d</sub> na camada central do painel CLTB



Fonte: Autor (2018)

A distribuição das lâminas de pinus no painel de CLT foi colocada em ordem crescente os valores de MOE<sub>d</sub> das extremidades para o centro da camada central de cada painel. Os primeiros oito valores de MOE<sub>d</sub> foram colocados na posição 1 das lâminas de pinus na parte central do painel, ou seja, os valores do MOE<sub>d</sub> foram colocados no painel 1, no painel 2, no painel 3, no painel 4, no painel 5, no painel 6, no painel 7 e no painel 8. Os oitos subsequentes valores de MOE<sub>d</sub> foram colocados na posição 23 das lâminas central do painel ou seja, foram colocados no painel 8, no painel 7, no painel 6, no painel 5, no painel 4, no painel 3, no painel 2 e painel 1.

Os dezesseis valores de MOE<sub>d</sub> subsequentes seguiram a mesma lógica, porém, agora na posição 2 e na posição 22 da camada central do painel. Seguindo, assim, o mesmo princípio para os dezesseis valores subsequentes de MOE<sub>d</sub>, mas agora na posição 3 e 21 do painel e assim por diante até todos os valores de MOE<sub>d</sub> subsequentes ocuparem todas as posições das lâminas na camada central de todos os oito painéis.

**Figura 45** - A distribuição dos valores do MOE<sub>d</sub> para camada central de cada painel.

	lâmina 1	lâmina 2	lâmina 3	lâmina 4	lâmina 5	lâmina 6	lâmina 7	lâmina 8	lâmina 9	lâmina 10	lâmina 11	lâmina 12
painel 1	6250,55	11348,26	13026,50	14512,18	16977,86	19198,79	20957,83	23567,66	25303,56	27056,40	28882,06	32084,99
painel 2	8920,90	11472,62	13358,84	14677,51	17444,82	19442,41	21205,99	23856,31	25814,33	27187,65	29233,65	32462,68
painel 3	9840,92	11885,06	13441,53	14964,98	17537,56	19653,12	21913,47	23973,24	25968,30	27219,70	29745,07	32501,93
painel 4	9997,50	2434,85	13714,80	15705,64	17969,57	19998,01	22229,46	24108,08	26279,75	27398,73	29974,36	33189,57
painel 5	10470,92	2518,59	13800,04	16031,95	18065,97	20198,76	22432,00	24474,74	26413,71	27544,27	30559,75	33608,51
painel 6	10619,02	2801,12	13976,93	16316,28	18837,26	20463,94	23179,52	24799,50	26563,82	27789,72	31007,03	34529,08
painel 7	10894,79	2874,63	14142,61	16419,89	19036,67	20636,62	23371,92	24894,54	26777,98	28055,78	31248,57	35291,37
painel 8	10932,23	2988,96	14218,71	16546,68	19141,36	20817,55	23455,89	24994,29	26803,26	28432,02	31540,86	35564,51
soma	77926,89	98324,09	109679,97	125175,12	145011,07	160409,20	178746,07	194668,35	209924,71	220684,27	242191,35	269232,64
Distribuição MOE <sub>d</sub>												

lâmina 12	lâmina 13	lâmina 14	lâmina 15	lâmina 16	lâmina 17	lâmina 18	lâmina 19	lâmina 20	lâmina 21	lâmina 22	lâmina 23	Média	DP	
32084,99	31662,68	28488,95	26908,67	25288,19	23516,33	20952,70	19144,03	16863,51	14504,82	13018,23	11154,71	20463,89	7162,952231	painel 1
32462,68	31461,89	28194,69	26790,22	24935,76	23431,35	20776,82	19132,32	16468,51	14159,15	12924,16	10921,45	20620,61	6972,192919	painel 2
32501,93	31162,62	27816,75	26768,91	24830,50	23235,85	20607,31	19031,80	16408,56	14093,71	12854,99	10874,82	20710,03	6872,895097	painel 3
33189,57	30905,62	27760,76	26485,36	24533,34	23140,56	20348,71	18802,61	16217,06	13938,47	12543,99	10551,77	20792,55	6887,02174	painel 4
33608,51	29998,27	27456,13	26306,16	24191,78	22269,78	20164,18	17985,70	15812,07	13797,40	12516,17	10010,03	20722,91	6899,81	painel 5
34529,08	29842,68	27397,81	26198,72	24074,81	22218,84	19969,03	17872,07	15071,74	13581,08	11985,72	9910,67	20826,37	7046,248557	painel 6
35291,37	29724,82	27191,58	25836,26	23971,52	21492,32	19538,19	17477,86	14748,04	13368,94	11791,76	9073,32	20776,52	7192,277403	painel 7
35564,51	29049,44	27061,34	25738,74	23571,11	21188,40	19328,69	17385,48	14664,22	13246,94	11405,02	8767,09	20732,29	7248,135326	painel 8
269232,64	243808,03	221368,02	211033,04	195397,02	159305,03	161685,64	146831,87	126253,71	110690,52	99040,05	81263,92			

Fonte: Autor (2018)

A média do MOE<sub>d</sub> e o desvio padrão de cada camada do painel de CLTB ficaram conforme figura 46.

**Figura 46** - Média dos valores do MOE<sub>d</sub> e Desvio padrão de cada camada central do painel de CLTB

	painel1	painel 2	painel 3	painel 4	painel5	painel 6	painel 7	painel 8	
camada externa - bambu	média MOE (MPa)	7760,47	7706,27	7693,37	7674,89	7568,06	7546,95	7475,39	7486,29
camada central - pinus	média MOE (MPa)	20463,89	20620,61	20710,03	20792,55	20722,91	20826,37	20776,52	20732,29
camada externa - bambu	média MOE (MPa)	7471,98	7470,38	7442,81	7471,43	7502,22	7527,00	7518,90	7562,12
	Média do MOE (M	11898,78	11932,42	11948,73	11979,62	11931,06	11966,77	11923,60	11926,90
	DP	7419,01	7525,12	7588,54	7632,89	7614,03	7672,64	7666,88	7625,79

Fonte: Autor (2018)

Desta forma as distribuições das lâminas de bambu e pinus, as médias dos MOE<sub>d</sub> e o seu desvio padrão ficaram próximos entre todos os oito painéis de CLTB (Figura 46).

Depois de organizar a distribuição dos valores de MOE<sub>d</sub> de cada painel, procedeu-se à separação do material para montagem dos oito painéis de CLTB.

**Figura 47** - Separação das lâminas de bambu e pinus para montagem dos painéis



Fonte: Autor (2018)

Em seguida as lâminas de bambu e madeira foram numeradas e organizadas para montagem dos painéis conforme MOE<sub>d</sub>. (Figura 48). Um gabarito foi elaborado para facilitar a montagem (Figura 49).

**Figura 48** - Gabarito para montagem dos painéis e painel montado



Fonte: Autor (2018)

**Figura 49** - Montagem dos painéis

Fonte: Autor (2018)

Os painéis foram levados na empresa de compensado Madeplak comércio de Compensado e Madeiras, localizada na cidade de Londrina-PR que cedeu gentilmente o equipamento assim como apoio profissional para execução da prensagem.

Os painéis foram montados e fixados com fita adesiva para facilitar o transporte e em seguida embalados em sacos plásticos até a empresa a fim de garantir que nenhuma peça saísse da posição (Figura 50)

**Figura 50** - Preparação dos painéis para transporte

Fonte: Autor (2018)

A execução dos painéis foi realizada em uma superfície metálica com 2 tripés. A primeira camada longitudinal foi disposta sobre uma superfície metálica

e aplicado o adesivo MUF. Na sequência foi disposta a segunda camada transversal de madeira e aplicado o adesivo e finalmente acrescentou-se a última camada longitudinal de bambu, (Figura 50). Adotou-se o adesivo MUF para colagem dos painéis por ter sido o de melhor desempenho no ensaio de colagem, o que será discutido mais à frente no item resultados e discussão.

Segundo o fabricante, o adesivo MUF tem o tempo em aberto e, ou o período em que as superfícies a colar entrem em contato de 50 min a 30°C e de 150 min a 15°C. A temperatura ambiente no tempo da elaboração dos painéis era de 32 °C e o tempo de montagem de cada painel ocorreu em média 10min. Depois de montados e aplicado o adesivo, os painéis foram posicionados na bandeja da prensa hidráulica da marca OMACO, constituída de 10 placas de aço com dimensões de 200x250cm, 02(dois) pistões hidráulicos de aço, 01 (um) motor trifásico de 220 volts, sistema de aquecimento por água quente com controle de temperatura e possui a capacidade de 100 toneladas máxima de 160°C, porém os painéis foram prensados a frio para não liberar formaldeído (Figura 51).

**Figura 51** - Aplicação do adesivo MUF nas camadas dos painéis de CLTB



Fonte: Autor (2018)

O adesivo foi misturado segundo as especificações do fabricante: para 100 partes de resina utilizaram-se 20 partes de catalisador. A pressão recomendada pelo fabricante é de 1 MPa tempo mínimo de prensagem de 3 horas e gramatura de 400g/m<sup>2</sup>. Após finalização do processo de prensagem os painéis foram levados para o laboratório da UEL para o ensaio de flexão.

Os painéis foram prensados em prensa com controle de pressão, atendendo as prescrições da norma ASTM D 4761 (2002), conforme figura 52. O

tempo de prensagem a frio foi de 18 horas com uma pressão 1MPa. Todos painéis foram prensados ao mesmo tempo.

**Figura 52** - Painéis posicionados nas bandejas e aplicação de pressão.



Fonte: Autor (2018)

Após a prensagem os painéis ficaram em repouso por uma semana em local seco e arejado, para que se completasse a cura total do adesivo. (Figura 53)

**Figura 53** - Painéis pós prensagem e em repouso



Fonte: Autor (2018)

Os painéis foram marcados para posicionamento na prensa universal EMIC conforme figura 54.

**Figura 54** - Marcação dos painéis para ensaio de flexão.



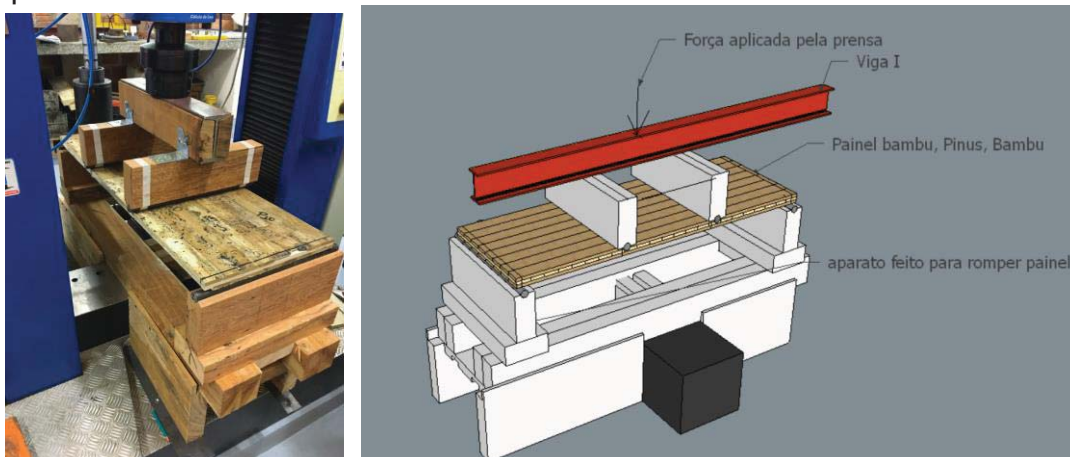
Fonte: Autor (2018)

### 3.5 ENSAIOS DE FLEXAO

O equipamento utilizado para o ensaio de flexão foi uma prensa universal EMIC modelo DL-30000 com capacidade de força de 30.000 kgf. A metodologia utilizada para este ensaio que obedeceu a normas NBR 7190 (1997) e ASTM 198 (2015). A carga foi aplicada por “cutelo” perpendicularmente à face do painel pelo método de flexão e 4 pontos.

Foi confeccionado um aparato próprio para o apoio de 4 pontos nos painéis de acordo com a norma NBR 7190 (1997), de acordo com a figura 55.

**Figura 55** - Aparato para o apoio do painel em 4 pontos no sentido longitudinal na prensa mecânica



Fonte: Autor (2018)

### 3.5.1 Ensaio de umidade em corpos de prova retirado do painel após realização do ensaio de flexão

Imediatamente após a realização do ensaio de flexão e ruptura foram retiradas amostras dos painéis para determinação de umidade dos painéis de acordo com a norma NBR 7190 (1997). Cinco amostras de cada painel nas dimensões 50 x 50 mm foram pesadas e levadas para a estufa a uma temperatura 103°C de acordo com a norma NBR 7190 (1997), por 24 horas. Após este período, as amostras foram pesadas novamente como mostra os resultados no quadro 21.

**Quadro 22 – Média do Teor de umidade dos painéis após ensaio de o de flexão**

Painel	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
<b>média</b>	12,0	12,0	12,8	12,0	12,0	11,70	12,0	12,0	12,0	12,0
<b>DP</b>	0,12	,12	0,97	0,81	1,1	0,9	0,43	0,5	0,37	0,3
<b>COV (%)</b>	0,94	1,00	7,58	6,71	9,15	7,68	3,49	4,14	3,05	2,41

Fonte: Autor (2018) Legenda: P1- painel 1, P2- painel 2, P3- painel 3, P4- painel 4, P5- painel 5, P6- painel 6, P7- painel 7, P8- painel 8 CV- coeficiente de variação, DP- desvio padrão

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 RESULTADO DO TESTE DE COLAGEM ADESIVOS APÓS ENSAIO FLEXÃO

O resultado dos testes de colagem com adesivo MUF, EPI e AGT, quadro 23.

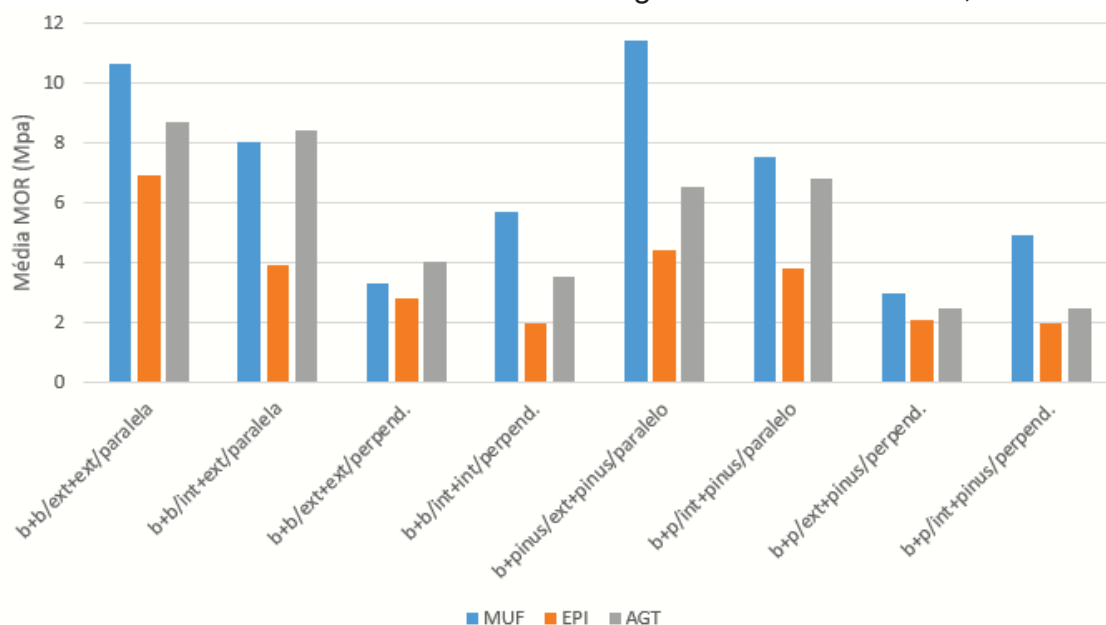
**Quadro 23 - Resultado Ensaio de Colagem com adesivo MUF, EPI e AGT**

Qtde CP	13	13	13	13	13	13	13	13
Material	b+b	b+b	b+b	b+b	b+p	b+p	b+p	b+p
Posição do material	ext+ext	int+ext	ext+ext	int+int	ext+pinus	int+pinus	ext+pinus	int+pinus
Direção	paralelo	paralelo	perpend.	perpend.	paralelo	paralelo	perpend.	perpend.
Adesivo	<b>MUF</b>							
valor mínimo (MPa)	8,8	5,51	1,91	4,16	8,77	5,06	2,25	4,04
valor máximo (MPa)	12,3	10,46	4,72	7,2	13,94	9,9	3,71	5,84
<b>média</b>	<b>10,6</b>	<b>8,0</b>	<b>3,3</b>	<b>5,7</b>	<b>11,4</b>	<b>7,5</b>	<b>3,0</b>	<b>4,9</b>
<b>DP</b>	<b>1,8</b>	<b>2,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,5</b>	<b>2,6</b>	<b>2,4</b>	<b>0,7</b>	<b>0,9</b>
<b>COV(%)</b>	<b>16,6</b>	<b>31,0</b>	<b>42,4</b>	<b>26,8</b>	<b>22,8</b>	<b>32,4</b>	<b>24,5</b>	<b>18,2</b>
Adesivo	<b>EPI</b>							
valor mínimo (MPa)	5,06	2,47	1,57	1,35	2,59	2,81	1,35	1,24
valor máximo (MPa)	8,77	5,28	3,94	2,59	6,3	4,84	2,81	2,7
<b>media</b>	<b>6,9</b>	<b>3,9</b>	<b>2,8</b>	<b>2,0</b>	<b>4,4</b>	<b>3,8</b>	<b>2,1</b>	<b>2,0</b>
<b>DP</b>	<b>1,9</b>	<b>1,4</b>	<b>1,2</b>	<b>0,6</b>	<b>1,9</b>	<b>1,0</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>
<b>COV(%)</b>	<b>26,8</b>	<b>36,3</b>	<b>43,0</b>	<b>31,5</b>	<b>41,7</b>	<b>26,5</b>	<b>35,1</b>	<b>37,1</b>
Adesivo	<b>AGT</b>							
valor mínimo (MPa)	7,2	7,2	3,7	2,02	4,5	5,06	1,69	2,14
valor máximo (MPa)	10,12	9,56	4,39	4,95	8,43	8,55	3,26	2,81
<b>média</b>	<b>8,7</b>	<b>8,4</b>	<b>4,0</b>	<b>3,5</b>	<b>6,5</b>	<b>6,8</b>	<b>2,5</b>	<b>2,5</b>
<b>DP</b>	<b>1,5</b>	<b>1,2</b>	<b>0,3</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>1,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,3</b>
<b>COV(%)</b>	<b>16,9</b>	<b>14,1</b>	<b>8,5</b>	<b>42,0</b>	<b>30,4</b>	<b>25,6</b>	<b>31,7</b>	<b>13,5</b>

Fonte: Autor (2018) Legenda b+b = bambu com bambu, b+p = bambu com pinus; ext= externo=capa, ext com ext= parte externa com parte externa, int + ext = parte interna com externa, int + int = parte interna com parte interna, ext + pinus, parte externa com pinus, int+ pinus = parte interna com pinus, paralelo, perpendicular, CV- coeficiente de variação, DP- desvio padrão

Observa-se, no gráfico, as médias de Carga de Ruptura no ensaio de colagem com os adesivos MUF, EPI e AGT (Gráfico 2).

**Gráfico 2** – Média do MOR do ensaio de colagem com adesivo MUF, EPI e AGT



Fonte: Autor (2018) Legenda: Material: b+b = bambu com bambu, b+p= bambu com pinus, b+p = bambu com pinus, Posição material: ext+ext = camada externa com camada externa, int+ext= camada interna com camada externa, int+int= cama interna com camada interna, ext+pinus= camada externa com pinus, int+pinus= camada interna com pinus, Direção: paralela, perpendicular

O Quadro 22 e Gráfico 2 indicam que os corpos de prova colados com adesivo melanina ureia formaldeído (MUF), com o material bambu e pinus, utilizando a parte externa de bambu com pinus e com direção paralela entre os materiais, apresentaram valores médios superiores em relação aos adesivos Emulsão Polímero Isocianato (EPI) e AGT (a base de óleo de mamona). O resultado com o adesivo MUF foi 36% superior ao valor medio obtido com o adesivo EPI e 51% superior ao valor medio obtido com o adesivo AGT, indicando uma melhor ancoragem e absorção dos adesivo MUF pelos materiais.

Em resumo, o Quadro 22 e gráfico 2 evidenciam o melhor desempenho de colagem para o adesivo MUF em relação aos demais

Após o teste de cisalhamento na linha de cola, cada corpo de prova (CP) foi analisado visualmente após seu rompimento.

Esta análise foi realizada de acordo com (LOBÃO *et al* 2006), a fim de se detectar a porcentagem de fraturas do tipo rasa, média ou profunda, conforme

quadro 23.

**Quadro 24** - Porcentagem em relação do tipo de fratura no teste de colagem com os adesivos MUF, EPI e AGT em relação aos 312 corpos de prova, com análise visual.

Tipo de fratura	Tipo de adesivo					
	MUF		EPI		AGT	
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%
<b>Fratura profunda</b>	10	9,62	0	0	1	0,96
<b>Fratura média</b>	28	26,92	8	8,57	7	6,73
<b>Fratura rasa</b>	66	63,46	96	91,43	96	92,31
<b>CP</b>	104		104		104	

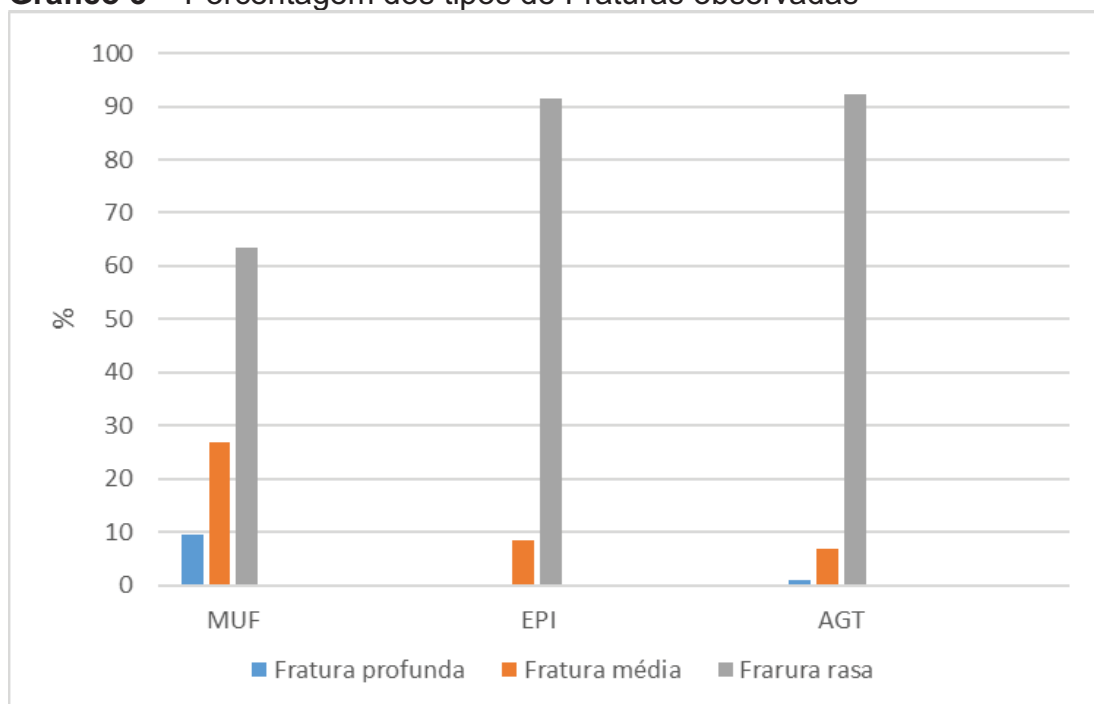
Fonte: Autor (2018) Legenda: CP – corpo de prova

As fraturas rasas, medias e profundas podem ser observadas na Figura 56 e gráfico 3. Corpos de prova com adesivo MUF mostraram maior índice de fratura profunda com arrancamento de partes da madeira, principalmente nos planos de colagem paralelo as fibras, porém em sua maioria o maior índice de fratura foi do tipo média. Já para os adesivos EPI e AGT observou-se em sua maioria mais de 90% de fratura rasa, o que indica pouca resistência na linha de cola em consequência a baixa absorção pelos materiais envolvidos (lignocelulósicos).

**Figura 56** - Corpo de prova após colagem adesivo MUF, fratura profunda, media e rasa respectivamente



Fonte: Autor (2018)

**Gráfico 3 -** Porcentagem dos tipos de Fraturas observadas

Fonte: Autor (2018)

O adesivo MUF apresentou o melhor desempenho tanto na ancoragem nos dois materiais envolvidos quanto à resistência na linha de cola.

#### 4.2 ENSAIOS DE FLEXÃO DOS PAINÉIS DE CLTB

O ensaio foi realizado em três ciclos de carga e descarga de modo a se obter uma acomodação das fibras segundo NBR 7190 (1997) descrita na seção 2.3.6, figura 16.

No apêndice A, estão dispostos o gráfico 4 que apresenta o relatório de todos os ensaios, emitido pelo sistema de dados e a Tabela 1 com o Relatório do ensaio de flexão dos 8 painéis de *CLTB*.

O quadro 25 mostra os valores obtidos de MOE e MOR no ensaio mecânico em comparação aos valores de classificação por ultrassom.

**Quadro 25** - Módulo de elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR) em MPa – MOE<sub>d</sub> (ultrassom).

<b>Painel</b>	<b>MOE<sub>d</sub></b>	<b>Carga ruptura</b>	<b>MOE</b>	<b>MOR</b>
<b>1</b>	11898,78	17654,8	13979,3	66,2
<b>2</b>	11932,42	16641,1	12041,3	59,0
<b>3</b>	11948,73	16483,7	12420,0	60,5
<b>4</b>	11979,62	14446,6	10263,0	47,6
<b>5</b>	11931,06	15873,6	14507,5	64,7
<b>6</b>	11966,77	17585,9	14069,6	68,2
<b>7</b>	11923,60	18412,5	16994,8	77,9
<b>8</b>	11926,90	19800,0	12206,4	72,6
<b>Media</b>	<b>11938,00</b>	<b>17112,3</b>	<b>13310,2</b>	<b>64,6</b>
<b>DP</b>	<b>24,03</b>	<b>1528,5</b>	<b>1902,0</b>	<b>8,6</b>
<b>COV (%)</b>	<b>0,20</b>	<b>8,93</b>	<b>14,29</b>	<b>13,35</b>

Fonte: Autor (2018) Legenda: CV- coeficiente de variação, DP- desvio padrão

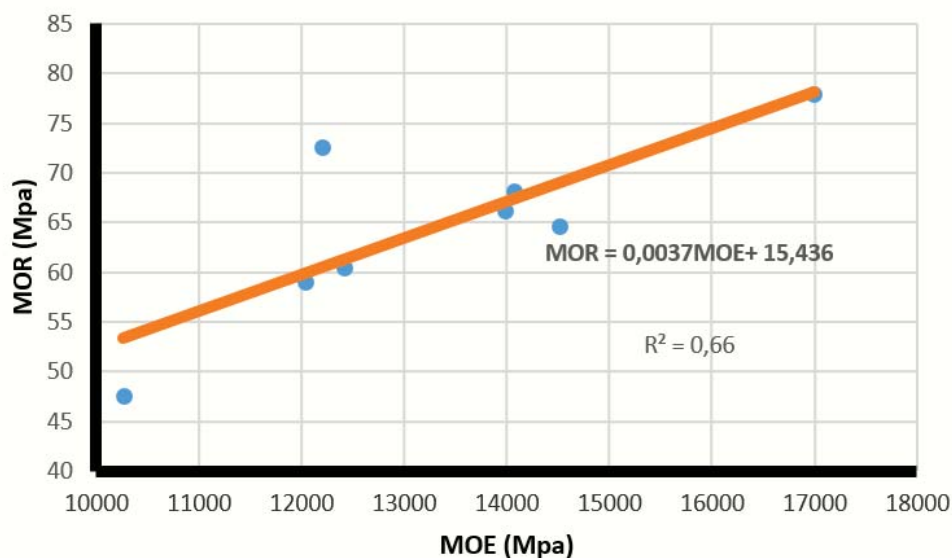
No quadro 25 percebe-se a variação de MOE entre 10263,0 e 16999,4 MPa (coluna 4) um incremento de 65%. A média foi de 13310,2 MPa, mostrando um coeficiente de variação igual a 14,29% valor considerado baixo no que diz respeito aos valores para madeira serrada, porém relativamente alto, considerando-se produtos florestais industrializados. Explica-se este fato pelas incertezas introduzidas na execução manual das amostras.

Na coluna 2 observa-se os valores menores do MOE dos painéis estimados pela classificação por ultrassom com variação quase nula (0,20%). As médias da classificação por ultrassom (11938.0 MPa) e a obtida no ensaio (13310.2 MPa) se aproximam, indicando coerência entre a classificação e valores obtidos no ensaio mecânico.

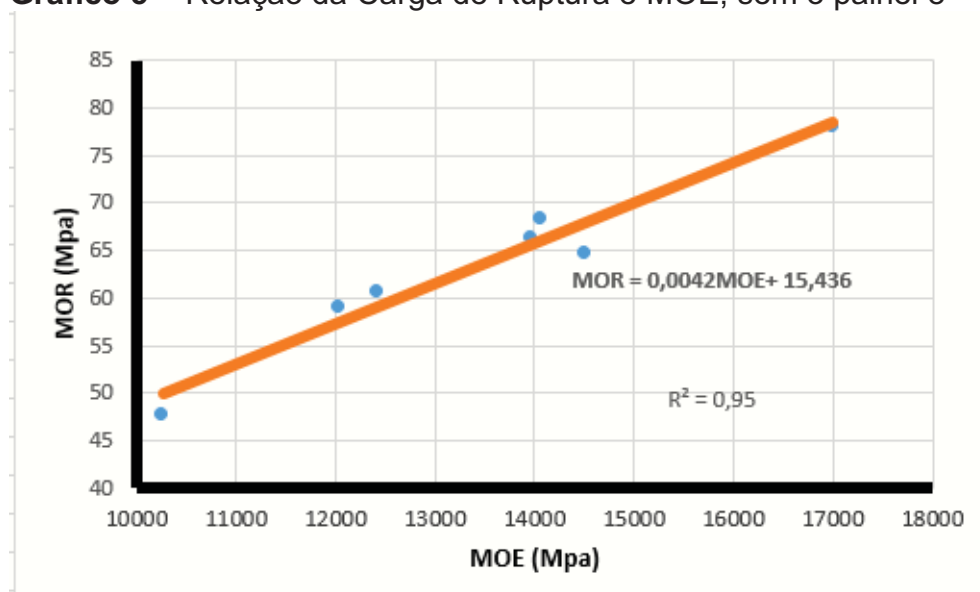
Estes resultados confirmam a importância da classificação prévia do material para se obter componentes com propriedades mecânicas previsíveis.

No que diz respeito à ruptura a variação é um pouco mais baixa 13,35 %.

A correlação entre MOE e MOR é mostrada no gráfico 5 e 6.

**Gráfico 4 -** Relação da Carga de Ruptura e MOE com 8 painéis

Fonte: Autor (2018)

**Gráfico 5 -** Relação da Carga de Ruptura e MOE, sem o painel 8

Fonte: Autor (2018)

Neste gráfico pode-se notar a alta correlação entre as duas propriedades com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) 0,6637 (com 8 painéis), Gráfico 5 e 0,95 (sem o painel número 8), Gráfico 6. O que permite vislumbrar boa previsibilidade da ruptura através de ensaio mecânico de flexão não destrutivo.

A título de comparação com a literatura, o quadro 26 mostra os

resultados obtidos em CLT por outros autores.

**Quadro 26** - Resumo comparativo dos resultados dos estudos relacionados.

Autores	Tipo da madeira	Densidade ( g/cm <sup>3</sup> )	MOE (MPa)	MOR (MPa)
ANSI/APA PRG 320 (2012)-valor mínimo	CLT		8.300	10,0
CONCU <i>et al</i> (2014)	Pinus	0,49	7.913	26,1
SIGRIST <i>et al</i> (2014)	<i>Pinus radiata</i> (sem classificação)	Não informado	6.251	25,5
	<i>Pinus radiata</i> (classificado visualmente)	Não informado	8.066	35,4
	<i>Pinus radiata</i> (classificação MGP12)	Não informado	12.567	53,1
WANG <i>et al</i> (2014)	<i>Pinus radiata</i>	0,45	6.350	44,5
	<i>Douglas fir</i> (sem defeito com finger joint)	0,47	8.690	34,7
	<i>Populus euroamericana</i> (sem defeito com finger joint)	0,41	5.970	41,6
FLAIG <i>et al</i> (2014)	Vigas CLT Sem finger joint ( <i>Picea abies</i> )	0,45	12.800	40
		0,40	10.000	32
STEIGER <i>et al</i> (2011)	Classe madeira C24/C20	0,42 (camada externa) 0,39 (camada interna)	12.000/ 14.000	-
ZHOU e CHUI (2014)	<i>Spruce-pine-fir</i>	0,52	10.500	-
ALENCAR (2015)	EEE	0,51	10.270	24
	EPE	0,51/0,53	10.144	24
	PPP	0,53	8111	32
	PEP	0,53/0,51	7240	39
<b>BARRETO (2018)</b>	<b>BPB</b>		<b>13310,2</b>	<b>64,6</b>

Fonte: adaptado Alencar, 2015 Legenda: E – Eucalipto, P- Pinus; camada dos painéis: EEE- eucalipto,eucalipto eucalipto, eucalipto, eucalipto; PPP- Pinus, Pinus, Pinus; PEP – Pinus, Eucalipto, Pinus ; BPB- bambu,pinus,bambu.

Os valores de rigidez e de ruptura ficaram acima dos especificados pela

norma americana ANSI/APA PGR 320 (2012); neste estudo 13310,2 e 64,6 respectivamente. Nesta norma, os valores de MOE não devem ser menores que 8.300MPa e de MOR não deve estar abaixo de 10 MPa.

#### 4.3 MODO DE RUPTURA

Não se observou descolamento entre as camadas e o conjunto rompeu por tração na fibra inferior Figuras 57,58,59.

**Figura 57** - ensaio de flexão (4 pontos)



Fonte: Autor (2018)

**Figura 58** - Ruptura da parte inferior durante ensaio de flexão



Fonte: Autor (2018)

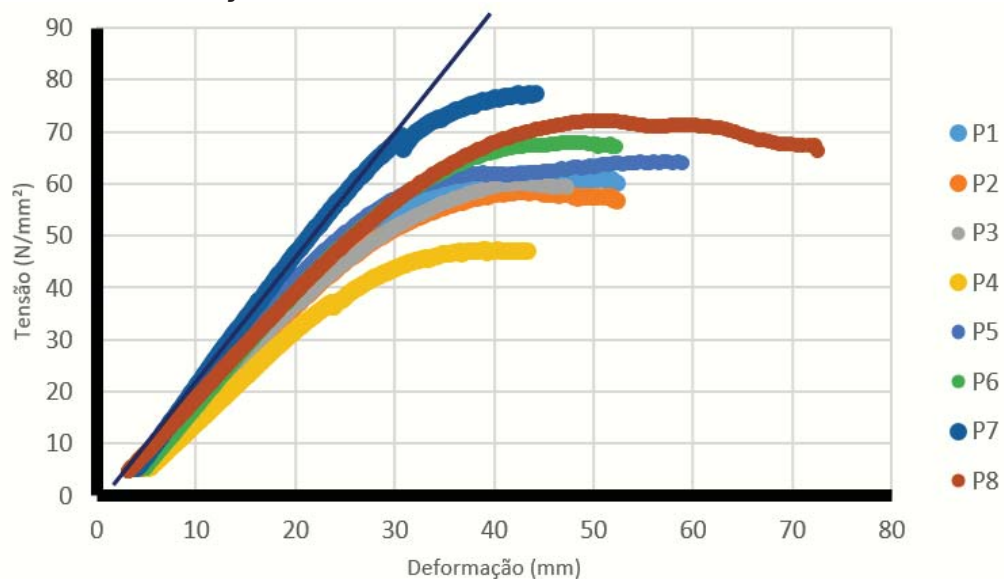
**Figura 59** - Detalhe mais próximo da ruptura do painel



Fonte: Autor (2018)

No gráfico 7 observam-se as curvas extraídas do último ciclo de carregamento de cada ensaio tensão/deslocamento do conjunto de painéis.

**Gráfico 6** - Relação da Tensão de Cisalhamento com o deslocamento



Fonte: Autor (2018)

Nota-se, na figura, o comportamento bastante similar das peças, apresentando fase elástica, com posterior plastificação e ruptura final.

A reta adicionada aos dados referencia o módulo de elasticidade do conjunto dos painéis.

## CONCLUSÃO

Neste estudo observou-se o comportamento mecânico de painéis composto de bambu e madeira de pinus colados em camadas com fibras orientadas ortogonalmente umas em relação às outras que se denominou CLTB (*Cross Laminated Timber and Bamboo*) e tiraram-se as seguintes conclusões:

Os colmos de bambu gigante encontrados e extraídos na região de Londrina – PR, tem a parede relativamente fina o que permitiu apenas a utilização da parte basal da tora de bambu. Em razão disto, as maiores espessuras de peças após usinagem foi de 9mm. Foi necessário cuidado especial na usinagem das peças de bambu de maneira a se eliminar o menos possível da superfície externa do colmo (casca), região de alta concentração de fibras e alta densidade, para se garantir o melhor desempenho do painel.

A metodologia de organização das peças dos painéis foi baseada na classificação por ultrassom, decisiva para se produzir painéis com propriedades mecânicas bastante homogêneas e baixo coeficiente de variação.

Foram testados em corpos de prova de cisalhamento três tipos de adesivos: Melanina Uréia Formaldeído (MUF), Isocianato (EPI) e a base de óleo de mamona (AGT). Aquele que mostrou melhor desempenho estrutural bem como produziu maior porcentagem de fraturas profundas foi o composto MUF. Foi este, portanto, o adesivo eleito para montagem dos painéis.

O aparato desenvolvido para a colagem dos CPs permitiu a confecção de 156 peças por turno de prensagem.

Nos ensaios de flexão a 4 pontos, os painéis apresentaram desempenho superior ao mínimo exigido pelo documento normativo ANSI/APA PRG 320 (2012) o que permite vislumbrar aplicação ampla do material como estrutura.

Em comparação com pesquisas publicadas, as propriedades mecânicas neste material são comparáveis, com destaque para o módulo de ruptura, bastante superior à média dos resultados encontrados na literatura. A correlação entre módulo de elasticidade - MOE e módulo de ruptura - MOR é elevada permitindo a previsão de carga máxima através de ensaio mecânico não destrutivo com baixo carregamento. O comportamento na fase elástica foi muito similar a todos painéis testados.

O modo de ruptura foi uniforme e comum a todas as amostras consistindo na ruptura por tração paralela na camada inferior de bambu.

Não se observou descolamento entre as camadas atestando a boa ancoragem do adesivo entre os materiais, assim como a qualidade da prensagem.

Não se realizaram ensaios de delaminação embora se reconheça a importância destes testes para a completa caracterização do material.

Por restrições da dimensão média das paredes do colmo do bambu estudado optou-se por realizar painéis com 27mm de espessura. Numa próxima etapa da pesquisa o foco principal deveria ser o incremento desta dimensão a fim de aumentar possibilidades de utilização do material.

O bambu, que é de utilização restrita no país, associado a madeira de reflorestamento (pinus), passa ter uma importância na composição de um material de desempenho mecânico bastante competitivo e um papel preponderante na produção de sistemas construtivos inovadores no país, além do bambu crescer mais rápido (pouco mais de 3 anos), com ciclos mais curtos que a madeira (20 anos), não existe outra espécie florestal que consiga competir com a velocidade de crescimento do bambu, nem com o aproveitamento por área, além da não necessidade de replantio, podendo desta forma ser usado juntamente com a madeira contribuindo assim para diminuição do desmatamento de florestas nativas.

Através desta pesquisa pode-se observar a dificuldade de aplicação da Norma ANSI/APA PRG 320 (2012), como também CLT *Handbook: Cross Laminated Timber, FPIinnovations* para o material bambu, o que pode ser um indicativo que a norma e o *FPIinnovations* devem ser revisados.

Outra dificuldade encontrada foi quanto à classificação visual das peças de bambu, com a inexistência de uma norma específica que contribua realmente com a pesquisa pois, a norma Indiana ISO 22156 e a NSR-10, de fato não foi muito elucidativa.

O fato de ter cortado colmos de bambu no mês de dezembro e fevereiro, época não recomendada para corte de acordo com Beraldo (2008), pode ter interferido na grande quantidade de fissura que o material veio a ter durante secagem, portanto recomendaria cortar nos meses que não tem R.

Para possibilidade de estudos posteriores sugere-se:

- Ensaio de blocos de cisalhamento e delaminação;
- Elaboração de painéis com maiores espessuras;
- Estudo de emenda tipo *finger joint* para criação de painéis maiores
- Apesar do adesivo MUF ter sido o que teve melhor desempenho, é desejável novo estudo com o mesmo tipo de painel com adesivo à base de óleo de mamona, devido ao resultado obtido ter sido bem superior a norma internacional ANSI/APA PRG 320 (2012);
- Verificação da aplicação deste sistema construtivo de CLTB dentro do sistema construtivo completo como um todo para uso em: painel, painel estrutural, painel de vedação vertical e horizontal, sistema de cobertura, laje, parede autoportante e piso.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - **ABRAF**. Anuário estatístico ABRAF 2013: ano base 2012. Brasília: ABRAF, 2013.
- ACMA, L. M. C. **Comparative mechanical properties of selected bamboo species**. Int. Journal of Precious Engineering Research and Application. ISSN: 2456-2734, Vol. 2, Issue 1, April 2017, pp.01-08.
- AGUIAR, A. V. *et al.* **Cultivo de pinus**. 2014. EMBRAPA. Disponível em: <<https://www.spo.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 06 out. 2016.
- ALENCAR, J. B. M. **Sistema construtivo em madeira laminada colada cruzada ou *cross laminated timber* (CLT)**: Análise da Viabilidade Técnica da Madeira e com Baixo valor Agregado. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual de Londrina-PR. 2015. 99 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Strength Properties os Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading, ADM 905**, Philadelphia, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **ASTM 198 – Standard Test Methods of Static Test of Lumber in Structural Size**, Philadelphia, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **ASTM D4761 – Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural material**. Philadelphia, 2013, 10p.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**. ABENDE- Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo. São Paulo, jul. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **NBR 11700 – Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento para uso geral**, 1991, 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **NBR 15557 – Norma de desempenho**, 2013, 61 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira**, 1997, 107 p.
- APA - THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION STANDARD FOR PERFORMANCE – **Rated Cross- Laminated Timber, ANSI/APA PRG 320**. Tacoma, Washington, USA. 2012.
- BAÑO. V, *et al.* **Experimental and Numerical Evaluatio of Cross-Laminated Timber (CLT) Panels Produced with Pine Timber from Thinnings in**

**Uruguay.** World Conference on Timber Engineering. Viena-Áustria. ago. 2016..

BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças estruturais de madeira através do Ultrassom**, 2001. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas-SP, 2001, 70 p.

BOGENSPERGER, T.; AUGUSTIN, M.; SCHICKHOFER, G. **Properties of CLT-Panels Exposed to Compression Perpendicular to their Plane**. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures. Alghero, Italia: [s.n.]. 2011.

BUCUR, V. **An experimental study of ultrasonic wave's propagation in dry and water saturated solid wood**. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 4. São Carlos. Anais, v. 2. (1992).

CANDIAN, M.; *et al.* **Classificação de peças estruturais de madeira de uso na construção civil com emprego de técnicas não destrutivas**. ENTAC. Florianópolis, SC. 23-25 ago.2006.

CANDIAN, M. **Estudo da classificação não-destrutiva de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas**. 2007. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

CARBONARI, G.; *et al.* **Propriedades mecânicas de várias espécies de bambu**. XV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Curitiba, PR. 09-11 mai. 2016.

CALIL JUNIOR, C.; R. LAHR, F.; DIAS, A. A. **dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. São Paulo: Manole, 2003

CONCU, G. *et al.* **Experimental Grading of Locally Grown Timber to be used as Structural Material**. Revista Advances in Civil Engineering and Building Material, Londres, 2013.

CARREIRA, M. R. **Critérios para Classificação Visual de Peças Estruturais Pinus Sp**. 2003. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo. 2003. 182p

COSTA, A. P. da C. **Construção de Edifícios com Cross Laminated Timber**. Dissertação (Mestrado) Universidade do Porto. 2013, 106 p.

CONSORTE, A. K. G.; *et al*, **Ensaio de Stuttgart – reprodução em laboratório**. Universidade Católica de Goiás - Departamento de Engenharia.

CROSSLAM - Suzano- SP Disponível em: < [crosslam.com.br](http://crosslam.com.br) > Acesso em: 07 abril.2018.

ESPELHO, J. C.C.; BERHALDO, A. Avaliação físico-mecânica de colmos de bambu tratados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.12, n.6, p.645–652, 2008 Campina Grande, PB, UAEAg/UFCG.

EUROPEAN TECHNICAL ASSESSMENT - **ETA06/0138**. 2017. Disponível em:<  
[http://www.klh.at/en/download/public/zertifikate/KLH\\_ETA\\_certificate\\_EN.pdf](http://www.klh.at/en/download/public/zertifikate/KLH_ETA_certificate_EN.pdf)>  
Acesso em: 03 ago. 2017.

FPINNOVATIONS. **CLT Handbook: Cross Laminated Timber**. FPInnovations  
Canadá, 2012.

FPINNOVATIONS. **CLT Handbook: Cross Laminated Timber**. FPInnovations  
Canadá, 2013.

GHAVAMI, K. Bambu... um material alternativo na engenharia. In: **Engenharia**,  
n.492, p.23-27.1992.

GHAVAMI, K. (1995). **Propriedades dos bambus e suas aplicações nas  
obras de engenharia, arquitetura e desenho industrial**. Artigos Compilados  
do Autor. CTC/ PUCRIO. Jul. 201p.

FELISBERTO. M.H.F.; *et al.* **Young bamboo culm flour of Dendrocalamus  
asper: Technological properties for food applications**. LWT - Food Science  
and Technology 76 230 e 235. 2017.

GHAVAMI, K. Application of bamboo as a low-cost energy material in civil  
engineering. In: **SYMPOSIUM MATERIALS FOR LOW INCOME HOUSING**, 3,  
1989, Mexico City. Symposium...Mexico: CIB/RILEM, 1989.

GHAVAMI, K.; HOMBEECK, R.V. Application of bamboo as a construction  
material. Part I Mechanical properties & water - repellent treatment of bamboo.  
Part II: Bamboo reinforced concrete beams. In: **LATIN AMERICAN SYMPOSIUM  
ON RATIONAL ORGANIZATION OF BUILDING APPLIED TO LOW COST  
HOUSING**, 1981, São Paulo. **Proceedings ...** São Paulo: IPT; CIB, 1981. v. 1, p.  
49-66.

GONÇALEZ, J.C.; VALLE, A.T.; COSTA, A.F. **Estimativas das constantes  
elásticas da madeira por meio de ondas ultrassônicas (ultrassom)**. Cerne,  
Lavras, v.7, n.2, p.81-92, 2001.

GRYCZAK, M. **Compósito Sustentável Casca de Arroz/Resina de Óleo de  
Mamona de Baixa Densidade**. Dissertação Pós-Graduação em Ciências  
Ambientais da Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC, Criciúma,  
Santa Catarina 2016.

GREEN, D. W.; HERNANDEZ, R. (1998). Codes and standards for structural  
wood products and their use in the United States. In: **Proceedings of the  
Forest  
Products Study Group Workshop**. Mérida, Yucatan, México.

INDIAN STANDARD – **Method Of Tests for Bamboo**, IS 6874. 2008.

International Standards Organization - **ISO 22156:2004 Bamboo – Structural**

**design.** 2004. ISO, Geneva, 15pp.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TC165 N314. Determination of Physical and Mechanical Properties of Bamboo.** 1999, 20 p..

INDIAN STANDARD. **IS 6874 N313. Method of tests for bamboo.** 2008, 16 p.

JANSSEN, J.J.A. **Designing and Building with Bamboo.** INTERNATIONAL NETWORK OF BAMBOO AND RATTAN – INBAR. Beijing, China. Technical report. n.20, 207p. 2000.

JESUS, IM.H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC).** São Carlos, 2000. 109 p. Tese (Doutorado) – Área Interinidades, Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo.

KABIR, M. F. *et al.* (1997). **Effect of Moisture Content and Grain Angle on the Ultrasonic Properties Of rubber Wood.** *Holzforschung*, v. 51, n.3..

KLH. 2008. Engineering. Version 01/2008. [www.klh.cc](http://www.klh.cc)

LIESE, W. **Preservation of a bamboo culm in relation to its structure.** In: Simpósio Internacional Gradua, 2004. Pereira. Anais...Pereira, 2004.

LOPEZ, H.O. **Bambu, Su Cultivo y Aplicaciones en:** fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía. Cali: ITALGRAF, 1974.

MARÇAL, V.H. S. **Uso do bambu na construção civil.** Monografia (Bacharel). Universidade de Brasília, DF. 2008. Disponível em: < [http://bambusc.org.br/wp-content/uploads/2009/05/tratamentobambu\\_vitor\\_hugo\\_marcal.pdf](http://bambusc.org.br/wp-content/uploads/2009/05/tratamentobambu_vitor_hugo_marcal.pdf) > Acesso em: 01 dez. 2017.

MARQUES & MARTINS. Poliuretano Derivado do Óleo de Mamona. In.: **II ENCONTRO CIENTÍFICO E II SIMPÓSIO DE EDUCAÇÃO UNISALESIANO.** Lins, 2009. Disponível em: <http://www.unisalesiano.edu.br/encontro2009/trabalho/aceitos/CC36939464859.pdf>. Acesso em:01/04/2011.

MARTINS, L. J. R. **Poliuretano derivado de óleo de mamona: de meio ambiente a biocompatibilidade.** Trabalho acadêmico da Universidade Federal Paulista de Ilha Solteira. Lins. São Paulo.

MOIZÉS, F.A. **Painéis de Bambu, uso e aplicações:** uma experiência didática nos cursos de Design em Bauru, São Paulo. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista- Bauru. 2007.

MOURA, J. D. M.; PLETZ, E.; STRASS, M. C CALEGARI. **Qualidade e**

**processo produtivo da madeira para utilização em mobiliário.** 2012. Universidade Estadual de Londrina, 1. ed.

NASCIMENTO, A. M.; LUCIA, R. M. D. Modelos estatísticos estimadores para confecção de tabelas de volume e peso seco para o bambu gigante. **Floresta e Ambiente, Seropédica**, v. 1, p. 28-40, 1994.

NOGUEIRA, C. de L. **Painel de bambu laminado colado estrutural.** Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Piracicaba. 2008.

NOGUEIRA, R.de S. **Proposta de um método de ensaio para controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL.** Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos- São Carlos – SP. 2017.

NUNES, A. R. S. **Construindo com a natureza bambu:** uma alternativa de eco desenvolvimento. . Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio ambiente) - Universidade federal de Sergipe. São Cristóvão. 2005. v. 1.

OLIN, H.W. (1990). Wood. In: **Construction: Principles, Materials & Methods.** Ed. Van Nostrand Reinhold, New York.

OLIVEIRA, F.G. R.; SALE A. **Caracterização de Propriedades Físicas de Dicotiledôneas Nativas por Meio de Técnicas de Ultrassom.** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 14. 2000.São Paulo. SP. Anais.

PADOVAN, R. B. **O bambu na arquitetura:** design de conexões estruturais. Dissertação de Pós-Graduação em Design da Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Bauru-SP. 2010.

PASSARELLI, R. N. **Cross Laminated Timber:** Diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo-São Carlos. 2013.

PEREIRA, C.M.P. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de madeira laminada colada cruzada.** Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo-São Carlos. 2014.

PEREIRA, M.A.R.; BERARDO, A.L. **Bambu de corpo e alma.** Bauru, SP: Canal 6 Projetos Editoriais, 2008.

RIVERA, C. S. **Expanding Opportunities for Mid-Rise Buildings in Chile Through the application of Timber Panel Systems.** 2012, (Master of Advanced Studies in Architecture) University of British Columbia – Vancouver, 2012.

ROSA, R. A. *et al.* Efeitos do tratamento preservativo e adesivo nas características mecânicas do laminado colado de duas espécies de bambu.

**Revista Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 103, set. 2014.

SANTOS, C. M. T.; DEL MENEZZI, C. H. S. **Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola de duas madeiras tropicais: seru (*Allantomalineata*) e marupá (*Simaroubaamara*)**. *Floresta*, v. 40, n. 2, p. 345- 354, 2010.

SEGUNDINHO, P. G. A. *et al.* **Resistência de linhas de cola para madeiras de reflorestamento**. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 36, n. 1, p. 107-116, jan./jun. 2015.

SILVA, C.; BRANCO, J. M.; LOURENÇO, P. B. **MLCC na Construção em altura**. 4º Congresso Nacional da Construção. Coimbra, Portugal: [s.n.]. 2012.

SILVA, C. A. *et al.* **Cross Laminated Timber (CLT) Uma tecnologia construtiva viável no Brasil?** ENTAC 2016 - São Paulo, Brasil, 21/23 set. 2016.

SIGRIST, C.; LEHMANN, M. Potential of CLT Produced from Quebec City Canada, 2014. **Anais...**

STANGERLIN, D. M. *et al.* **Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da Madeira de *peltophorum dubium***. *Ciência da Madeira*, Pelotas, v. 01, n. 02, p. 44-53, Novembro de 2010.

STEIGER, R. *et. al.* **Comparison of bending stiffness of cross-laminated solid timber derived by modal analysis of full panels and by bending tests of strip-shaped specimens**. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 70 p. 141-153, Berlim-Alemanha, 2011.

TEIXEIRA, A. A. **Painéis de bambu para habitações econômicas: Avaliação do desempenho de painéis revestidos com argamassa**. 2006. v. 1, 177 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

TRUJILLO, D. **Prospects for a Method to Infer Non-destructively the Strength of Bamboo: a Research Proposal**. Department of Civil Engineering, Architecture and Building Faculty of Engineering and Computing Coventry University Priory Street, UK.

WANG, Z.; FU, H.; CHUI, Y.; GONG, M. Feasibility of Using Poplar as Cross Layer to Fabricate Cross-Laminated Timber. 2014. World Conference on Timber Engineering, Quebec-City, Canadá, **Anais....**

WILCZAK, L. **Avaliação do comportamento mecânico do adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado na produção de painéis compensados**. Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia de Produção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba. 2014.

VITAL, B. R.; MACIEL, A. S.; LUCIA, R. M. D. **Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do troco de *eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* E *Pinus elliottii***. Sociedade de Investigações Florestais. Viçosa-MG, v.30, n.4, p.637-644, 2006.

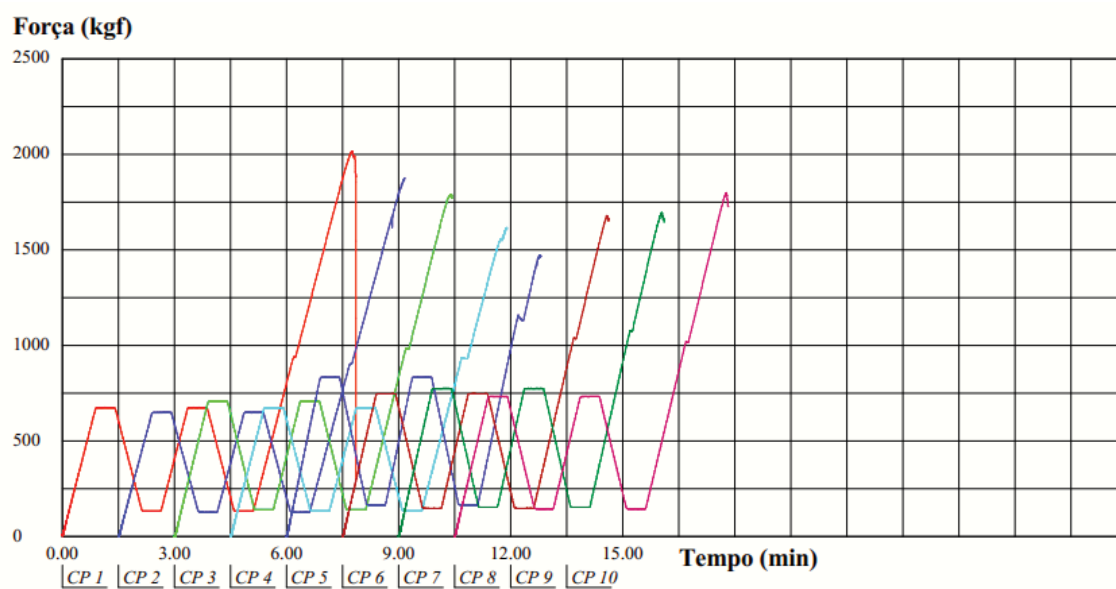
WILCZAK, Luana. **Avaliação do comportamento mecânico do adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado na produção de painéis compensados**. 2014. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

ZHOU, J.; CHUI, Y. Efficient Measurement of Elastic Constants of Cross Laminated Timber using Modal Testing. 2014. World Conference on Timber Engineer, Quebec-City, Canadá, **Anais...**

## APÊNDICE A

O gráfico 4 apresenta o relatório de todos os ensaios, emitido pelo sistema de dados

**Gráfico 4** – tela de Aquisição dos ensaios de flexão realizado nos 8 painéis. Força em função do tempo.



Fonte: Autor (2018)

