



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MELISSA LAGO DE JESUS SILVEIRA SILVA

**ESTUDO DA ADERÊNCIA DA FIBRA DE CARBONO EM
ELEMENTOS DE MADEIRA LAMELADA COLADA**

Salvador
2022

MELISSA LAGO DE JESUS SILVEIRA SILVA

**ESTUDO DA ADERÊNCIA DA FIBRA DE CARBONO EM
ELEMENTOS DE MADEIRA LAMELADA COLADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dr. Sandro Fábio César

Coorientadora: Prof(a). Dr(a). Rita Dione Araújo Cunha

Agência Financiadora: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Salvador

2022

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Silva, Melissa Lago de Jesus Silveira
Estudo da aderência da fibra de carbono em
elementos de Madeira Lamelada Colada / Melissa Lago
de Jesus Silveira Silva. -- Salvador, 2022.
138 f. : il

Orientador: Sandro Fábio César.
Coorientadora: Rita Dione Araújo Cunha.
Dissertação (Mestrado - Programa de pós graduação em
engenharia civil) -- Universidade Federal da Bahia,
Escola Politécnica, 2022.

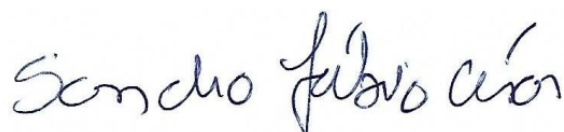
1. Madeira lamelada colada. 2. Aderência. 3.
Propriedades mecânicas. 4. Clone COP 1404. 5. Fibra de
carbono. I. César, Sandro Fábio. II. Cunha, Rita
Dione Araújo. III. Título.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

_____ **Melissa Lago de Jesus Silveira Silva** _____

APRESENTADA AO MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, EM 21 DE OUTUBRO DE 2022.

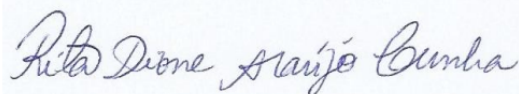
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. **Sandro Fábio César**


Orientador

PPEC-UFBA



Prof^a. Dr^a. **Rita Dione Araújo Cunha**

PPEC- UFBA



Prof. Dr. **Marcelo Strozi Cilla**

PPEC-UFBA



Prof. Dr. **Julio Cesar Molina**

PPGEM - UNESP

Dedico este trabalho à minha mãe Rosimeire.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo amparo constante, por me guiar e me dar forças.

À minha mãe por seu amor incondicional e apoio constante.

Aos meus avós pelas orações e torcidas.

À Marcus Lobo por todo apoio, solidariedade e participação em todas as etapas do trabalho.

Ao Prof. Sandro Fábio César pela oportunidade, por acreditar em mim, pela orientação, paciência, constante incentivo e, especialmente, pela amizade.

À Prof.^a Rita Dione Araújo Cunha pelo apoio, orientação, paciência e, sobretudo, pela amizade.

Ao Laboratório de Madeiras (LABMAD) da Escola Politécnica da UFBA, ao funcionário Deni da carpintaria e aos amigos que fiz dentro do laboratório.

Ao técnico Paulo César J. Sant'anna do Centro Tecnológico da Argamassa (CETA) pela disponibilidade, paciência e apoio na realização dos ensaios. À Prof.^a Vanessa Silveira Silva (Coordenadora do CETA) e ao Prof. Cleber Dias pela permissão para realização dos ensaios.

Ao Programa de pós-graduação em engenharia civil (PPEC) da Escola Politécnica da UFBA por fomentar a pesquisa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

*“Se eu vi mais longe foi por estar sobre os ombros
de gigantes”*

(Isaac Newton)

RESUMO

A preocupação com a sustentabilidade associada à melhoria na tecnologia dos adesivos, aos produtos derivados da madeira, principalmente àqueles originários de florestas plantadas, têm ganhado notoriedade, por terem menor impacto ambiental e favorecerem novas aplicações. A Madeira Lamelada Colada (MLC) é uma alternativa viável para o aproveitamento racional da madeira, possibilitando o uso de madeiras jovens, já que condições intrínsecas destas madeiras, como presença de defeitos, diminuem a capacidade de carga. Além disso, ao engenheirar a madeira pode-se viabilizar o uso de troncos de menor qualidade e menor diâmetro. Entretanto, o desempenho do produto engenheirado depende da espécie a ser utilizada, espessuras e posições das lamelas, tipo de adesivo, desempenho da colagem. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo estudar a aderência do polímero reforçado com fibra de carbono à superfície da MLC de madeira proveniente de floresta plantada. A espécie de madeira selecionada foi *Eucalyptus urophylla*, clonal COP 1404, que se caracteriza por ter rápido crescimento. Empregou-se o adesivo poliuretano, bicomponente Polioliol Bio e Isocianato polimérico tipo MDI, a base de óleo de mamona, pela facilidade de obtenção no mercado e facilidade de aplicação. O programa experimental buscou avaliar as propriedades físicas e mecânicas da madeira in natura e as propriedades mecânicas do MLC com fibra de carbono comparado ao MLC sem fibra de carbono, no que tange à aderência, empregando métodos estatísticos para a análise de resistência dos protótipos. Os resultados indicaram que o adesivo poliuretano foi eficiente na colagem tanto da superfície da madeira quanto da fibra de carbono, de modo que o cisalhamento ocorreu na madeira, além das verificações à compressão paralela e à flexão terem mostrado comportamento de um corpo único, não tendo pontos de descontinuidade por conta da linha de cola, tendo a ruptura ocorrido na madeira.

Palavras-chave: Madeira lamelada colada. Aderência. Propriedades mecânicas. Clone COP 1404. Fibra de carbono. *Eucalyptus urophylla*. Madeira engenheirada.

ABSTRACT

The concern with sustainability of the construction industry associated with the development of modern structural adhesives for timber products have gained notoriety in the light of the environmental benefits of certified timber and diversified structural applications of glued timber. Glued Laminated Timber (GLT) is a viable alternative for the rational use of timber, because it allows the use of timber from juvenile trees plantations and mitigate the intrinsic conditions of these timbers, such as the high presence of defects that reduce the load capacity of the structural element. Additionally, engineered timber could be produced with timber cut from smaller diameter logs and lower quality. However, the performance of the engineered product depends on the species of the timber, thickness and position of the lamellae, type of adhesive, and bonding strength. This work aimed to study the adhesion of the carbon fiber reinforced polymer to the surface of the MLC produced with certified timber. The selected timber species was *Eucalyptus urophylla* COP 1404 clone, which is characterized by rapid growth. To reach the objective, a two-component castor-based polyurethane adhesive Poliol Bio and MDI type polymeric isocyanate, due to the ease of obtaining it on the market and ease of application. The experimental program focused on the physical and mechanical properties of sawn timber and the mechanical properties of carbon-fiber reinforced glulam compared to no reinforced glulam, using statistical methods to analyze the strength of the prototypes. The results indicated that the polyurethane adhesive was efficient in gluing both the timber surface and the carbon fiber, so that the shear occurred in the timber, in addition to the parallel compression and bending verifications having shown a single-body behavior, having no discontinuity points due to the glue line, with the break occurring in the timber.

Keywords: Glulam. Adherence. Mechanical properties. Clone COP 1404. Carbon fiber. *Urophylla eucalyptus*. Engineered timber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das madeiras.....	28
Figura 2 – Fluxograma dos adesivos.	29
Figura 3 – Fluxograma dos produtos de madeira.....	30
Figura 4 – Principais fatores que interferem na resistência da colagem.	34
Figura 5 – Dimensões do corpo de prova de cisalhamento (a) e corpo de prova ensaiado (b).	39
Figura 6 – Dispositivo para o ensaio de cisalhamento na linha de cola.	44
Figura 7 – Corpo de prova e área da aplicação da força no ensaio de cisalhamento.	44
Figura 8 – Representação da face da seção transversal dos corpos de prova.	45
Figura 9 – Corpo de prova e forma de disposição na câmara climatizadora para o ensaio de delaminação.	46
Figura 10 - Número de trabalhos que utilizaram determinadas fibras.....	58
Figura 11 – Tecido bidirecional de fibra de carbono.....	59
Figura 12 - Quantificação de ensaios.....	60
Figura 13 -Falha de uma viga sem reforço.....	61
Figura 14 – Configuração do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento.	62
Figura 15 – Comportamento da madeira no ensaio de compressão paralela.	63
Figura 16 - Fluxograma do programa experimental.	65
Figura 17 – Toras de madeira de clone de <i>Eucalyptus urophylla COP 1404</i>	69
Figura 18 - Localização dos corpos de prova na seção transversal do tronco da madeira estudada	70
Figura 19 - Corpos de prova retirados do alburno, cerne, medula.	70
Figura 20 – Defeitos presentes nos corpos de prova.	72
Figura 21 – Corpos de prova de compressão paralela às fibras.	73

Figura 22 – Corpos de prova de cisalhamento paralelo às fibras.....	74
Figura 23 – Corpo de prova de flexão.	75
Figura 24 – Processo de produção das lamelas.	76
Figura 25 – Disposição das lamelas entabecadas para secagem ao ar.....	77
Figura 26 – Câmara de secagem.	78
Figura 27 – Configuração do ensaio de flexão de 4 pontos.	80
Figura 28- Classificação visual das classes para <i>E. urophylla</i> e <i>E. grandis</i> (urograndis).	81
Figura 29 – Classificação mecânica das classes para <i>E. urophylla</i> e <i>E. grandis</i> (urograndis).....	81
Figura 30 – Propriedades das classes para <i>E. urophylla</i> e <i>E. grandis</i> (urograndis)..	82
Figura 31 – Gabarito e lamelas classificadas.	82
Figura 32 – Medição das distorções dimensionais.	83
Figura 33 – Ensaio de flexão a três pontos para classificação mecânica.	84
Figura 34 – Máquina de desengrosso para aplainamento das lamelas.	86
Figura 35 – Processo de colagem de lamelas sem fibra de carbono (LSFC).....	87
Figura 36 – Sequência de aplicação do adesivo na fibra de carbono da MLC.....	88
Figura 37 – Processo de prensagem	88
Figura 38 – Peça de MLC sem fibra carbono de seção 5 cm x 5 cm para extração de corpos de prova e seus respectivos comprimentos: flexão de 115 cm, compressão paralela às fibras 15 cm e cisalhamento de 6,4 cm.	89
Figura 39 – Peça de MLC com fibra carbono de seção 5 cm x 5 cm para extração de corpos de prova e seus respectivos comprimentos: flexão de 115 cm, compressão paralela às fibras 15 cm e cisalhamento de 6,4cm.	90
Figura 40 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento – LSFC.....	91

Figura 41 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento – LCFC.....	91
Figura 42 – Corpos de prova lamelado para o ensaio de compressão paralela às fibras	92
Figura 43 - Corpos de prova lamelado para o ensaio de flexão estática.....	92
Figura 44 – Corpo de prova para ensaio de flexão a 4 pontos com seção de 4 cm x 4 cm.	93
Figura 45 – Corpo de prova para ensaio de flexão a 4 pontos com seção de 5 cm x 5 cm.	93
Figura 46 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento com seção 4 cm x 4 cm.	94
Figura 47 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento com seção 5 cm x 5 cm.	94
Figura 48 – Corpos de prova rompidos por compressão paralela.....	100
Figura 49 – Corpos de prova maciços rompidos por cisalhamento.....	102
Figura 50 – Ruptura dos corpos de prova obtidas no ensaio de cisalhamento.	103
Figura 51 – Ruptura à flexão de 4 pontos.	106
Figura 52 – Exemplos de defeitos das lamelas – rachaduras após o desdobro das toras em lamelas.....	107
Figura 53 – Ataque de térmita de solo ao Clone <i>Eucalyptus urophylla</i> COP 1404 na região do cerne e alburno.	108
Figura 54 – Corpo de prova lamelado sem fibra carbono rompido ao cisalhamento paralelo às fibras.....	112
Figura 55 - Corpo de prova lamelado com fibra carbono rompido ao cisalhamento paralelo às fibras.....	114
Figura 56 – Ruptura típica ao cisalhamento paralelo dos corpos de prova LSFC...	116
Figura 57 - Corpo de prova lamelado sem fibra carbono rompido à compressão paralela às fibras.....	119

Figura 58 - Corpo de prova lamelado com fibra carbono rompido à compressão paralela às fibras.....	120
Figura 59 - Ensaio à flexão estática	123
Figura 60 – Gráfico deformação x força dos corpos de prova com seção 4 cm x 4 cm (LSFC).....	126
Figura 61 - Gráfico deformação x força dos corpos de prova com seção 4 cm x 4 cm (LCFC).	127
Figura 62 – Nós presentes nas peças lameladas.....	128
Figura 63 - Rupturas dos corpos de prova à flexão de 4 pontos.....	129

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Medição de defeitos.	41
Quadro 2 – Quantidade de corpos de prova por ensaio.....	66
Quadro 3 – Tipos de ruptura do ensaio de flexão e porcentagem de ocorrência no lote ensaiado.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espécies e densidades de madeiras utilizadas para o estudo de MLC...	35
Tabela 2 – Procedimentos do ensaio de delaminação.....	46
Tabela 3 – Densidade básica e dimensões anatômicas do clone COP 1404	51
Tabela 4 – Caracterização da madeira serrada do clone COP 1404 e <i>Eucalyptus cloeziana</i>	52
Tabela 5 – Valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola, na condição seca, em função da gramatura.	56
Tabela 6 – Resultados do teste de tração e flexão para fibra de carbono.	59
Tabela 7 – Parâmetros para a produção da MLC	86
Tabela 8 - Propriedades físicas da madeira de <i>Eucalyptus urophylla</i> COP 1404.	95
Tabela 9 – Resistência à compressão paralela dos corpos de prova maciços (U=12%).	99
Tabela 10 – Valores característicos de resistências.	100
Tabela 11 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova maciços (U=12%).....	101
Tabela 12 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova maciços.....	102
Tabela 13 – Resistência à flexão e módulo de elasticidade dos corpos de prova maciços.....	104
Tabela 14 – Resistência à flexão de 4 pontos e módulo de elasticidade de corpos de prova maciços.....	105
Tabela 15 – Classificação visual e mecânica de lamelas com 2 cm de espessura.	109
Tabela 16 – Densidades de lamelas com 3 cm de espessura.	110
Tabela 17 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono (LSFC).....	111

Tabela 18 – Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado com fibra carbono (LCFC).....	113
Tabela 19 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono (LSFC).....	115
Tabela 20 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado com fibra carbono (LCFC).....	116
Tabela 21 – Resistência à compressão paralela dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono (LSFC).....	117
Tabela 22 - Resistência à compressão paralela dos corpos de prova lamelado colado com fibra carbono (LCFC).....	119
Tabela 23 - Resistência à flexão dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono (LSFC).....	121
Tabela 24 - Resistência à flexão dos corpos de prova lamelado colado com fibra carbono (LCFC).	122
Tabela 25 – Resistência à flexão dos corpos de prova lamelados sem fibra (LSFC) com seção transversal de 5 cm x 5 cm.	124
Tabela 26 – Resistência à flexão dos corpos de prova lamelados sem fibra (LSFC) com seção transversal de 4 cm x4 cm.	124
Tabela 27 - Resistência à flexão dos corpos de prova lamelados com fibra (LCFC) com seção transversal de 5 cm x 5 cm.	125
Tabela 28 - Resistência à flexão dos corpos de prova lamelados com fibra (LCFC) com seção transversal de 4 cm x4 cm.	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
CP	Corpo de prova
COP 1404	Clone de <i>Eucalyptus urophylla</i>
DCTM	Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais
EPI	Isocianato de polímero de emulsão
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímeros reforçados com fibras)
FRF	Fenol resorcinol formaldeído
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IRTS	Índice de rachaduras de extremidade de tábuas secas
LABMAD	Laboratório de Madeiras
LCFC	Lamelado colado com fibra carbono
LSFC	Lamelado colado sem fibra carbono
MLC	Madeira lamelada colada
MUF	Melamina uréia formaldeído
MF	Melamina formaldeído
PVA	Acetato de polivinila
UFBA	Universidade Federal da Bahia

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	23
1.1.	PROPOSTA DO TRABALHO	25
1.1.1.	Formulação do problema	25
1.1.2.	Hipótese.....	26
1.2.	OBJETIVOS.....	26
1.2.1.	Objetivo geral	26
1.2.2.	Objetivos específicos	26
1.3.	JUSTIFICATIVA.....	26
1.4.	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	27
1.5.	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	30
1.6.	RESULTADOS ESPERADOS	31
1.7.	PERSPECTIVAS.....	32
1.7.1.	Originalidade da Pesquisa	32
1.7.2.	Contribuições da Pesquisa	32
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	MADEIRA LAMELADA COLADA.....	33
2.1.1	Parâmetros para fabricação.....	34
2.1.1.1	<i>Madeira.....</i>	<i>34</i>
2.1.1.2	<i>Colagem</i>	<i>36</i>
2.1.1.3	<i>Teor de umidade.....</i>	<i>37</i>
2.1.2	Classificação da madeira	37
2.1.2.1	<i>Classificação visual.....</i>	<i>39</i>
2.1.2.2	<i>Classificação pelo módulo de elasticidade</i>	<i>42</i>
2.1.3	Caracterização da madeira lamelada colada (MLC).....	43
2.1.3.1	<i>Resistência ao cisalhamento na linha de cola</i>	<i>43</i>
2.1.3.2	<i>Delaminação.....</i>	<i>45</i>
2.1.3.3	<i>Resistência das emendas denteadas</i>	<i>47</i>
2.2	FLORESTAS PLANTADAS.....	47

2.2.1	Folhosas de florestas plantadas	49
2.3	ADESIVOS E A MADEIRA	53
2.3.1	Poliuretano à base de mamona	55
2.4	USO DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS NA MADEIRA LAMELADA COLADA	56
2.4.1	Tipos de fibras	57
2.4.1.1	<i>Fibra de carbono</i>	58
2.4.2	Principais ensaios do produto final	60
2.4.2.1	<i>Flexão de 4 pontos</i>	60
2.4.2.2	<i>Cisalhamento</i>	61
2.4.2.3	<i>Compressão paralela às fibras</i>	62
2.5	CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	63
3	MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1	MATERIAIS	64
3.1.1	Madeira	64
3.1.2	Adesivo	64
3.1.3	Fibra de carbono	64
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	64
3.2.1	Amostras e corpos de prova	65
3.2.2	Condição-padrão de referência	66
3.2.3	Determinação dos valores característicos de resistência	67
3.2.3.1	<i>NBR 7190-3 (2022)</i>	67
3.2.3.2	<i>NBR 7190-4 (2022)</i>	67
3.2.4	Tratamento estatístico dos resultados	68
3.3	DESDOBRO DA MADEIRA	68
3.4	CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	69
3.4.1	Caracterização física	69
3.4.1.1	<i>Umidade</i>	70
3.4.1.2	<i>Densidade</i>	71
3.4.1.3	<i>Estabilidade dimensional</i>	71
3.4.2	Caracterização mecânica	72

3.4.2.1	<i>Ensaio de compressão paralela às fibras</i>	73
3.4.2.2	<i>Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras</i>	73
3.4.2.3	<i>Ensaio de flexão estática de três pontos</i>	74
3.5	PRODUÇÃO E SECAGEM DE LAMELAS	75
3.5.1	Desdobro	75
3.5.2	Secagem	76
3.5.3	Planejamento das lamelas	78
3.6	CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA	79
3.6.1	ABNT NBR 7190 – 3	79
3.6.2	ABNT NBR 7190 – 1	79
3.6.2.1	<i>Resistência à flexão de 4 pontos</i>	79
3.6.2.2	<i>Classificação visual</i>	81
3.6.2.3	<i>Classificação pelo módulo de elasticidade</i>	83
3.6.2.4	<i>Densidade</i>	84
3.6.2.5	<i>Cisalhamento paralelo às fibras</i>	85
3.7	CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS	85
3.7.1	Fabricação das peças de MLC	86
3.7.1.1	<i>Colagem do lamelado sem fibra de carbono</i>	87
3.7.1.2	<i>Colagem do lamelado com fibra de carbono</i>	87
3.8	ENSAIOS DA MADEIRA LAMELADA COLADA	89
3.8.1	Extração dos corpos de prova	89
3.8.1.1	<i>Lamelado colado sem fibra carbono</i>	89
3.8.1.2	<i>Lamelado colado com fibra carbono</i>	90
3.8.2	Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola	90
3.8.3	Ensaio de compressão paralela às fibras	91
3.8.4	Ensaio de flexão estática de 3 pontos	92
3.8.5	Ensaio de flexão de 4 pontos	93
3.8.6	Ensaio de cisalhamento	93
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO CLONE <i>Eucalyptus urophylla</i> COP 1404	95
4.1.1	Caracterização física	95
4.1.1.1	<i>Umidade</i>	95

4.1.1.2	Densidade.....	96
4.1.1.3	Estabilidade dimensional	97
4.1.2	Caracterização mecânica	98
4.1.2.1	Compressão paralela às fibras	98
4.1.2.2	Cisalhamento paralelo às fibras (NBR 7190 – 3).....	101
4.1.2.3	Cisalhamento paralelo às fibras (NBR 7190 - 4).....	102
4.1.2.4	Flexão estática de 3 pontos	104
4.1.2.5	Flexão de 4 pontos	105
4.2	OBSERVAÇÕES ACERCA DA MADEIRA CLONE DE <i>Eucalyptus urophylla</i> .	106
4.2.1	Processo de secagem	106
4.2.2	Rachaduras após o desdobro das toras.....	107
4.2.3	Degradação biológica.....	107
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS LAMELAS	108
4.3.1	Classificação visual e mecânica.....	108
4.4	ENSAIOS DA MADEIRA LAMELADA COLADA	111
4.4.1	Cisalhamento paralelo às fibras (NBR 7190 – 3)	111
4.4.1.1	Lamelado colado sem fibra carbono (LSFC)	111
4.4.1.2	Lamelado colado com fibra de carbono (LCFC)	113
4.4.2	Cisalhamento paralelo às fibras (NBR 7190 – 4)	115
4.4.2.1	Lamelado colado sem fibra carbono (LSFC)	115
4.4.2.2	Lamelado colado com fibra carbono (LCFC)	116
4.4.3	Compressão paralela às fibras	117
4.4.3.1	Lamelado colado sem fibra carbono (LSFC)	117
4.4.3.2	Lamelado colado com fibra carbono (LCFC)	119
4.4.4	Flexão de 3 pontos.....	120
4.4.4.1	Lamelado colado sem fibra carbono (LSFC)	120
4.4.4.2	Lamelado colado com fibra carbono (LCFC)	121
4.4.5	Flexão de 4 pontos.....	123
4.4.5.1	Lamelado colado sem fibra carbono (LSFC)	123
4.4.5.2	Lamelado colado com fibra carbono (LCFC)	125
4.4.5.3	Rupturas	127
5	CONCLUSÕES.....	130
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	131

REFERÊNCIAS.....	133
APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS DEFEITOS DOS CORPOS DE PROVA.	140

1 INTRODUÇÃO

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

Dentre as madeiras de florestas plantadas no Brasil, tem-se as do gênero *Pinus* e *Eucalipto*, sendo as mais plantadas. O uso dessas madeiras para a indústria da construção civil pode ser beneficiado por meio desse produto engenheirado de madeira (MLC) e pela adição de polímeros reforçados com fibras a esses produtos, já que a presença de defeitos, típicos de madeira juvenil, reduz a capacidade de carga e, a partir do processo de laminação e colagem, essa condição já pode ser melhorada (RAFTERY; RODD, 2015).

O desenvolvimento de novas tecnologias e processos de produção viabilizam o uso de madeiras de rápido crescimento, aumentando o valor comercial de troncos de menor qualidade e menor diâmetro, além de aproveitamento de resíduos de madeira anteriormente subutilizados (NADIR *et al.*, 2016).

Nadir e Nagarajan (2014), afirmam que o processo de fabricação de produtos de madeira lamelada consiste em uma técnica eficaz para reduzir ou eliminar propriedades negativas dos materiais de madeira proveniente de florestas plantadas, obtendo-se materiais de alto desempenho. No processo de fabricação, defeitos como nós, por exemplo, são removidos através das emendas denteadas (*finger-joint*) ou distribuídos aleatoriamente (THORHALLSSON *et al.*, 2017).

No processo de classificação da madeira para a produção da MLC, o uso de troncos de menor diâmetro pode ser questionado, visto que para atender a classificação de lamelas, por exemplo, a presença de defeitos é limitada em função de alguns parâmetros e a presença de medula não é admitida, conforme ABNT NBR 7190-2 (2022). Então, para atender aos critérios, o uso de troncos de menor diâmetro geraria descartes significativos e teria baixo aproveitamento, de modo que a questão da sustentabilidade estaria comprometida. Todavia, tal questão é maior que o descarte desse material.

O desenvolvimento sustentável consiste em um conceito integrativo do desenvolvimento econômico, social e ambiental, cujo objetivo é encontrar um equilíbrio entre os três. Com isso, viabilizar e racionalizar o uso de materiais provenientes de fontes renováveis é relevante e finalidades de utilização devem ser criadas.

Serrar a madeira para fazer lamelado colado com toras de 15 cm de diâmetro, por exemplo, tem o objetivo de atender o mercado, tem possibilidade de diversificar a forma dos produtos para o consumidor. Deve-se ter como foco a questão estrutural e a questão estética, associadas à sustentabilidade.

Para diversificar o produto é necessário industrializar, e ao fazer isso, perdas são geradas. E no caso de toras com diâmetro em torno de 15 cm, a presença de medula apresenta-se como um fator limitante diante de parâmetros de classificação, aumentando-se as perdas. Logo, tem-se a questão de como industrializar a madeira e diminuir o resíduo gerado, que pode ser solucionada com o desenvolvimento de elementos estruturais de menor solicitação, como vigas para assoalho, terças e caibros.

As melhorias nas etapas de fabricação associadas ao avanço tecnológico conduzem a um uso mais eficiente e otimizado, já que espécies de madeiras de rápido crescimento com diâmetros menores podem ser utilizadas (RESCALVO *et al.*, 2021).

O desempenho da madeira lamelada colada depende da qualidade de colagem dos elementos em diversas configurações (espécie/adesivo). Os sistemas adesivos mais utilizados para colar este produto engenheirado são à base de melamina ureia formaldeído (MUF), melamina-formaldeído (MF), fenol resorcinol formaldeído (FRF), poliuretanos e isocianato de polímero de emulsão (EPI), resinas (HÄNSEL *et al.*, 2021). Balmori, Branco e Basterra (2021) afirmam que a força das ligações adesivas é limitada pela força da própria madeira, sendo a falha na madeira considerada a resposta de ligação ideal.

A aplicação de polímeros reforçados com fibras (FRP) à MLC torna-se importante devido ao desempenho mecânico deste material estar associado a diversos fatores, como espécies de madeira utilizadas, espessuras e posições das lamelas, tipo de adesivo e tratamentos aplicados (CALIL NETO *et al.*, 2014).

Conforme Vahedian, Shrestha e Crews (2019), a interação entre madeira e polímero reforçado com fibras (FRP) é relativamente complexa e é influenciada por

diversas variáveis, tais como: condições ambientais, teor de umidade, tratamento superficial, mistura adesiva e período de cura inadequado ou temperatura de cura incorreta.

Segundo Raftery e Rodd (2015) os adesivos epóxis são amplamente estimados como a primeira opção de adesivo na interface do polímero (FRP)/madeira. Contudo, o desenvolvimento de um produto engenheirado reforçado utilizando um único adesivo para toda a profundidade da seção, ou seja, um mesmo adesivo para a interface madeira-madeira e madeira-FRP, torna-se significativamente mais econômico, aumentando assim a competitividade dos custos.

Brunetti *et al.* (2019) afirmam que a possibilidade de utilizar os mesmos adesivos, já amplamente empregados na produção de produtos engenheirados de madeira, abrirá novas perspectivas no uso de polímeros reforçados com fibra de carbono em elementos de madeira. Nesse contexto, os poliuretanos são muito interessantes, visto que são largamente usados na indústria madeireira para produzir a MLC. O estudo desenvolvido por Sviták e Ruman (2017) mostrou que tais adesivos poderiam ser efetivamente usados para colar fibra de carbono (CFRP) à madeira.

Com esse panorama, avaliou-se a aderência do polímero reforçado com fibra de carbono à superfície da madeira lamelada colada produzida através de madeira oriunda de floresta plantada brasileira clone COP 1404 de *Eucalyptus urophylla*, usando o adesivo poliuretano para fazer a ligação madeira/madeira e madeira/FRP, possibilitando a viabilidade do uso dessa madeira de rápido crescimento para compor elementos de MLC.

1.1. PROPOSTA DO TRABALHO

1.1.1. Formulação do problema

- Assunto: Eficiência da ligação entre madeira e polímero reforçado com fibras;
- Tema: Madeira lamelada colada com polímeros reforçados com fibras;
- Problema: A aderência da fibra de carbono à matriz madeira utilizando um único adesivo irá permitir um comportamento uniforme à madeira lamelada colada feita de *Eucalyptus*, clonal *urophylla* COP 1404?

1.1.2. Hipótese

É possível aderir a fibra de carbono aplicada na interface das lamelas de madeira da espécie clonal *COP1404* do gênero *Eucalyptus*, utilizando um único adesivo, desde que a madeira atenda aos parâmetros necessários para a MLC, como também o emprego de adesivo compatível com a fibra de carbono e com a espécie de madeira adotada.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a aderência da fibra de carbono inserida na linha de cola da madeira lamelada colada composta por madeira do gênero *Eucalyptus*, clone *COP 1404*, oriunda de florestas plantadas, utilizando o adesivo poliuretano.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- caracterizar a madeira clone *COP 1404* a ser empregada no lamelado colado;
- analisar a aderência entre a fibra carbono e a madeira por meio de ensaios mecânicos;
- avaliar o desempenho mecânico da MLC feita com madeira de clone *Eucalyptus urophylla* clone *COP 1404* com e sem fibra de carbono.

1.3. JUSTIFICATIVA

Os produtos engenheirados de madeira resultantes da combinação madeira e polímeros reforçados com fibras (FRP) apresentam melhor desempenho e possuem vantagens em potencial sobre os produtos projetados de madeira maciça in natura (NADIR *et al.*, 2016).

Buscar melhorar propriedades das madeiras de rápido crescimento provenientes de florestas plantadas presentes na região da pesquisa é relevante, uma vez que tais madeiras são consideradas inferiores em relação às nativas ou às de idade avançada. Entretanto, essa combinação (madeira e FRP) só pode tornar-se eficiente se o comportamento de ligação for adequado e compatível aos materiais utilizados, dependendo de propriedades inerentes à madeira, ao processo de fabricação e ao adesivo.

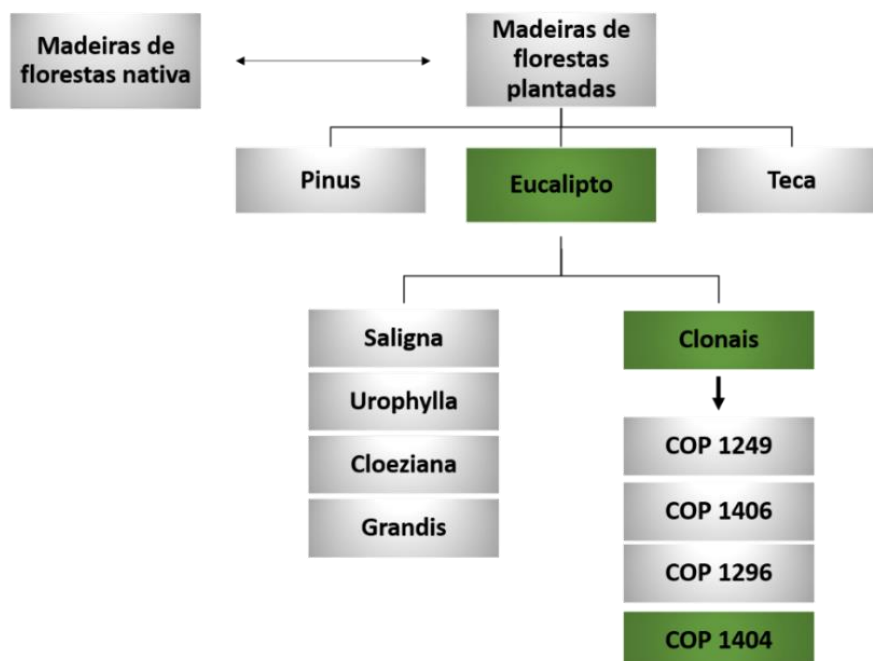
Além de viabilizar uma matéria-prima de fonte renovável, utilizar um único adesivo para toda a produção da madeira lamelada colada amplia o uso do produto. Para isso, é necessário estudar o comportamento entre a matriz, a fibra e o adesivo. Por isso, esse estudo considerará a interação entre esses três fatores que influenciam diretamente no desempenho mecânico da madeira lamelada colada com fibra de carbono.

Percebe-se na literatura a quantidade de estudos desenvolvidos utilizando polímeros reforçados com fibras, com o objetivo de viabilizar o uso de madeiras de florestas plantadas de rápido crescimento que são consideradas de baixa resistência (RESCALVO *et al.*, 2021; RAFTERY E RODD, 2015; NADIR *et al.*, 2016; KHELIFA *et al.*, 2015; ANDOR *et al.*, 2015). Muitos estudos usam técnicas de aplicação de FRP, mas poucos testaram a aderência da fibra quando colocada internamente, na linha de cola, cuja área de ligação é muito maior.

1.4. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Entre as espécies de eucalipto, tem-se os clones que são produtos do melhoramento genético. Assim, escolheu-se a espécie clonal *COP 1404* para a produção da MLC, por ser oriunda de floresta plantada brasileira, por ter rápido crescimento, por estar disponível em regiões do estado da Bahia e por ter poucos estudos desenvolvidos. O fluxograma (Figura 1) a seguir ilustra os tipos de madeira associado à escolha desta pesquisa.

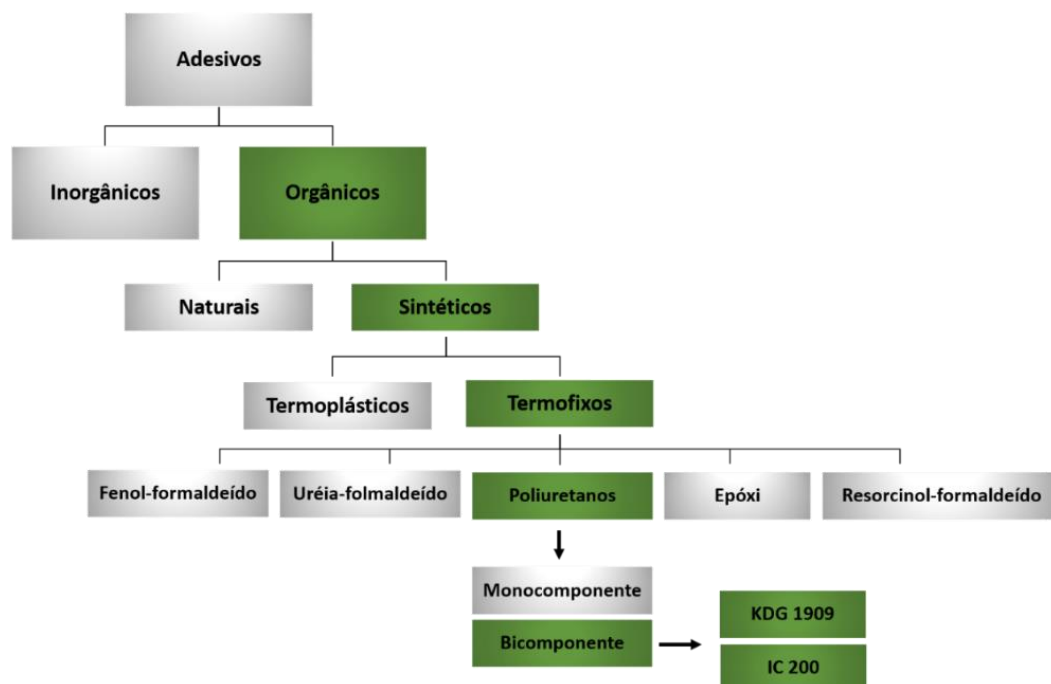
Figura 1 – Fluxograma das madeiras.



Fonte: Autora (2021).

Em relação aos adesivos, tem-se os inorgânicos e os orgânicos, os quais podem ser naturais ou sintéticos, e dentre esses, tem-se os termoplásticos e os termofixos (JESUS, 2000). Em meio aos termofixos, estão os poliuretanos, sendo escolhido nesse estudo o poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona, por ter propriedades superiores aos polímeros provenientes de petróleo, além de ser originado de um recurso natural e renovável, associado ao custo acessível e facilidade de aplicação (AZAMBUJA, 2006). O fluxograma (Figura 2) ilustra os tipos de adesivos associados à escolha dessa pesquisa.

Figura 2 – Fluxograma dos adesivos.

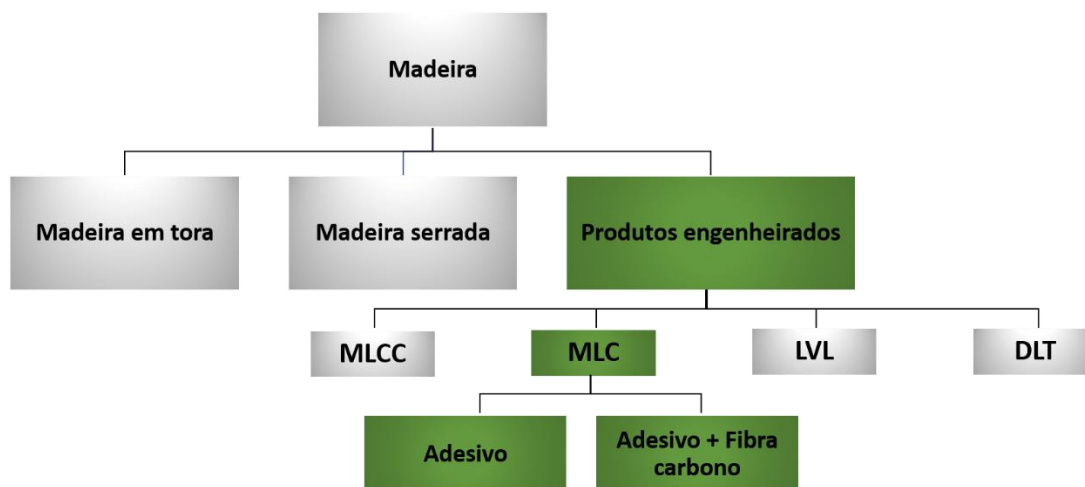


Fonte: Autora (2021).

Dentre a diversidade de produtos engenheirados, a madeira lamelada colada (MLC) foi escolhida como produto desse estudo, por ser considerado um produto mais forte e rígido em relação aos produtos de madeira serrada, possibilitar boa trabalhabilidade, tendo facilidade de conexão entre os diferentes componentes estruturais, ter grande aplicação em elementos estruturais e estar dentro da viabilidade dessa pesquisa (THORHALLSSON *et al.*, 2017).

Dentre as vantagens da MLC está a estabilidade dimensional, visto que este material é produzido com umidade de 12%, a grande flexibilidade com curvaturas, é um material resistente a substâncias químicas e agressivas, possui alta capacidade de carga e baixo peso próprio (CALIL NETO, 2010). A Figura 3 apresenta o fluxograma que ilustra os produtos obtidos por meio da madeira associados à escolha dessa pesquisa.

Figura 3 – Fluxograma dos produtos de madeira.



Fonte: Autora (2021).

Diante das possibilidades do produto em MLC, pode-se ter apenas a madeira com o adesivo ou a madeira com o adesivo combinado a polímeros reforçados com fibras, por exemplo.

Dentre esses materiais, tem-se as fibras sintéticas como as de vidro, aramida e carbono (FIORELLI, 2002). Essa última foi escolhida nesse estudo, por conta de suas elevadas propriedades mecânicas de tração e de flexão (PAMAR *et al.*, 2015), tendo possibilidade de melhorar a resistência mecânica dos produtos engenheirados, pela facilidade de obtenção no mercado, além de fazer parte da linha de pesquisa do Laboratório de Madeiras da UFBA.

Sendo assim, foram produzidas peças em madeira lamelada colada com a madeira clone *COP 1404*, utilizando o adesivo poliuretano à base de mamona e a fibra de carbono. Os protótipos foram feitos baseados nos corpos de prova propostos pelo documento 3 e pelo documento 4 da norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022). Tais protótipos testaram a eficiência do adesivo com o emprego da fibra de carbono na linha de cola MLC.

1.5. ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação foi dividida em: Introdução, Revisão bibliográfica, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões, Conclusões, Referências bibliográficas e Apêndice.

- Na Introdução tem-se a problemática, as hipóteses, os objetivos (geral e específicos), justificativas, delimitação e estrutura da pesquisa.
- O capítulo dois apresenta a revisão da literatura, com estudos desenvolvidos sobre a madeira lamelada colada (MLC) e emprego da fibra de carbono, critérios e condições para sua fabricação. Além dos adesivos empregados, características, aplicações e potencialidades. Assim como, os aspectos relativos às propriedades da madeira e ensaios para avaliar seu desempenho mecânico.
- O capítulo três refere-se aos materiais e métodos, expondo os processos relativos à caracterização física e mecânica da madeira, fabricação da madeira lamelada colada sem e com fibra de carbono, assim como os métodos dos ensaios realizados para avaliar o comportamento do produto.
- O capítulo quatro apresenta os resultados e discussões acerca da caracterização da madeira in natura e da madeira lamelada colada, juntamente com a análise dos ensaios realizados por meio do programa experimental.
- O capítulo cinco traz as conclusões desse trabalho e recomendações para futuras pesquisas.

1.6. RESULTADOS ESPERADOS

- ampliação do conhecimento sobre o clone *COP 1404* de *Eucalyptus urophylla* para uso na construção civil;
- comprovação da aderência entre a fibra de carbono com a madeira COP 1404, visando seu emprego para elementos de MLC;
- criação de subsídios para expandir o conhecimento acerca do lamelado colado através dos resultados obtidos neste estudo.

1.7. PERSPECTIVAS

1.7.1. Originalidade da Pesquisa

- Esta pesquisa trouxe como ineditismo o estudo do clone *COP 1404* de *Eucalyptus urophylla* empregado em produto engenheirado de madeira (MLC) para aplicação na indústria da construção civil.
- Os trabalhos encontrados na literatura específica sobre o clone *COP 1404* não abordam o uso dessa madeira vinculado à construção civil (mais especificamente em produtos engenheirados de madeira).

1.7.2. Contribuições da Pesquisa

- Essa pesquisa pretendeu contribuir para o desenvolvimento de um novo produto, no setor de madeira engenheirada, através da proposta de aplicação de fibra carbono à madeira lamelada colada, cuja origem da matéria-prima é a floresta plantada;
- A pesquisa considerou a preservação do meio ambiente, visto que para a produção do lamelado colado será utilizada madeira proveniente de florestas plantadas de rápido crescimento e adesivo à base de mamona, colaborando para a proteção de matas e florestas nativas;
- Contribuiu para o meio científico, uma vez que os dados produzidos são referências para outros estudos acadêmicos que considerem a madeira do clone *COP 1404* de *Eucalyptus urophylla* e o lamelado colado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são abordados os principais estudos desenvolvidos sobre a madeira lamelada colada (MLC) reforçada, assim como os critérios e elementos para sua fabricação e controle de qualidade. Ainda, os adesivos utilizados para a produção desse produto engenheirado são apresentados, juntamente com os aspectos relacionados às propriedades da madeira.

2.1 MADEIRA LAMELADA COLADA

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 2022), madeira lamelada colada (MLC) para fins estruturais consiste em peças de madeira engenheirada obtidas por meio de processo de fabricação industrializado, cuja composição é feita através de lamelas coladas umas às outras com disposição das fibras paralela ao eixo longitudinal da peça final.

A colagem das lamelas ocorre em função da seção transversal definida no dimensionamento da peça estrutural, podendo o eixo ser reto ou curvo. A qualidade do produto final está vinculada às várias etapas do processo de fabricação, de modo que os fabricantes devem garantir as características de resistência e rigidez dos elementos de MLC.

Hänsel *et al.* (2021) citam uma equação de desempenho que possui como variáveis dependentes: fator de composição do adesivo, fator de propriedade da madeira, fator de preparação da superfície da madeira, fator de aplicação do adesivo, fator de geometria da madeira e fator de serviço do produto.

A Figura 4 apresenta os fatores que influenciam a eficiência da colagem da madeira lamelada colada (MLC), tais fatores dizem respeito à espécie de madeira, ao adesivo, ao processo de usinagem e tecnologia empregada e à estrutura da MLC.

Figura 4 – Principais fatores que interferem na resistência da colagem.

Espécie de madeira	Adesivo	Usinagem e tecnologia	Estrutura da MLC
<ul style="list-style-type: none"> • fibras e ângulo do anel; • densidade/força; • inchaço/retração; • cerne/alburno; • estrutura do anel de crescimento; • extrativos; • composição química; • variação das propriedades das madeira. 	<ul style="list-style-type: none"> • tipo de adesivo <ul style="list-style-type: none"> • propriedades químicas e mecânicas; • penetração na madeira (viscosidade). • espessura da linha de colagem; • sorção e propriedades mecânicas da linha de ligação; • adesão em madeira em condições secas e molhadas; • envelhecimento durante o serviço e testes. 	<ul style="list-style-type: none"> • modo de preparo e elaboração <ul style="list-style-type: none"> • aplainamento, fresagem de superfície, lixamento, etc.; • qualidade da superfície (rugosidade, ondulação, etc.); • teor de umidade das lamelas e variação entre as lamelas; • pré-tratamento: primer, água, plasma, laser. • quantidade de adesivo aplicado/precisão da quantidade aplicada; • condições de pressão <ul style="list-style-type: none"> • tempo de montagem aberto e fechado • tempo de pressão • pressão específica • temperatura ambiente e umidade do ar durante a prensagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • espessura da lamela • propriedades mecânicas das lamelas <ul style="list-style-type: none"> • variação dentro e entre espécies, teor de umidade • revestimento de superfície <ul style="list-style-type: none"> • amortecendo a difusão da água, reduzindo os perfis de umidade e tensões induzidas pela umidade.

Fonte: (HÄNSEL *et al.*, 2021).

2.1.1 Parâmetros para fabricação

2.1.1.1 Madeira

Grande parte dos elementos que compõem a madeira lamelada colada (MLC) são originados da madeira de baixa e média densidades. Admite-se que não há grandes problemas técnicos no que diz respeito à colagem da maioria das espécies de madeira macia. (HÄNSEL *et al.*, 2021). Estudos internacionais apresentam uso de madeiras de rápido crescimento para produção da madeira lamelada colada. A Tabela 1 apresenta quinze estudos com as espécies utilizadas e suas densidades.

Tabela 1 – Espécies e densidades de madeiras utilizadas para o estudo de MLC.

Autor	Espécie	Densidade (kg/m ³)
Raftery <i>et al.</i> (2015)	Abeto sitka (<i>Sitka spruce</i>)	380,0
Brunetti <i>et al.</i> (2019)	Abeto da Noruega (<i>Picea abies</i>)	424,0
Raftery <i>et al.</i> (2014)	Abeto sitka (<i>Sitka spruce</i>)	385,0
Yang <i>et al.</i> (2016)	Abeto Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	531,0
Nadir <i>et al.</i> (2016)	Madeira de borracha (<i>H. brasiliensis</i>)	605,0
Andor <i>et al.</i> (2015)	Abeto da Noruega (<i>Picea abies</i>)	476,0
Ling <i>et al.</i> (2018)	Abeto Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	480,0
Ling <i>et al.</i> (2020)	<i>Pinus sylvestris</i>	475,0
Wang <i>et al.</i> (2021)	Álamo de rápido crescimento	325,0
Lu <i>et al.</i> (2015)	Abeto Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	490,0
	Álamo de rápido crescimento	458,0
Sena-Cruz <i>et al.</i> (2013)	Madeira classe de força GL24h	418,1
	Álamo do clone (<i>Populus x euroamericana</i> I-214)	362,6
Balmori <i>et al.</i> (2021)	Abeto Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	484,0
Yang <i>et al.</i> (2016)	Álamo do clone (<i>Populus x euroamericana</i> I-214)	362,6
	Basterra <i>et al.</i> (2017)	Spruce

Fonte: Autora (2022).

Os estudos atestam o desempenho dessas espécies para uso em MLC, de modo que o processo de laminação uniformiza os defeitos decorrentes da madeira de rápido crescimento, por meio da classificação visual e classificação mecânica, assim como pela disposição das lamelas na seção transversal, ainda sugerem o uso de polímeros reforçados com fibras (FRP) para viabilizar e melhorar o uso dessa madeira.

Os elementos de MLC que são produzidos no Brasil são oriundos de madeira de reflorestamento, dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, visto que apresentam matéria-prima com boas características e possuem rápido crescimento, comparados com espécies nativas do Brasil (SEGUNDINHO *et al.*, 2017).

As espécies de rápido crescimento desses gêneros possuem consistências dentro da faixa de densidades das madeiras empregadas nos estudos da Tabela 1. Fato condizente com a orientação da NBR 7190 (ABNT, 2022), que estabelece que as lamelas empregadas na composição da MLC devem ter densidade aparente ($U = 12\%$) entre 400 kg/m³ e 750 kg/m³. Além disso, a norma orienta que deve ser evitada a composição de um mesmo elemento de MLC com espécies distintas, ou que apresentem diferentes coeficientes de retração.

2.1.1.2 Colagem

De acordo com Hänsel *et al.* (2021), dentre as etapas do processo de fabricação, a colagem se destaca como parte do processo fundamental para garantir a qualidade superior desses produtos de madeira que pode variar devido à alta variabilidade da madeira como substrato, como também a inúmeros fatores relacionados ao próprio processo de colagem. Conforme os autores, a escolha do adesivo é fundamentada no custo, na espécie de madeira e na classe de serviço prevista para o produto, de acordo com o Eurocódigo 5.

Conforme Calil Neto (2011), praticamente, todas as madeiras são possíveis de serem coladas, o que vai diferenciar o processo são as características físicas e químicas de cada espécie, que vai requerer escolhas distintas ou modificações das colas. As espécies mais indicadas são as coníferas e algumas folhosas que possuem resposta satisfatória de colagem.

A ligação adesiva é diretamente influenciada pelas propriedades da madeira (densidade, estrutura anatômica), fato que explica as folhosas apresentarem mais dificuldade de colagem em relação às coníferas, visto que as principais propriedades que interferem no processo de construção e desempenho da ligação adesiva são as propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas (BIANCHE *et al.*, 2017).

A espécie exótica de reflorestamento *Eucalyptus grandis* apresentou bom desempenho de colagem na investigação feita por Jesus (2000), na qual foram utilizados dois adesivos, Cascophen e um poliuretano à base de mamona, e tanto o *Eucalyptus grandis* quanto o *Pinus elliottii* obtiveram desempenho superior com o adesivo à base de mamona em relação ao Cascophen. Tal desempenho foi comparado com as espécies Jatobá e Ipê, tendo as espécies exóticas comportamento superior. O autor explicou que tanto o Pinus como o Eucalipto são mais permeáveis, absorveram mais o polímero, de modo que a estrutura da madeira na interface madeira/adesivo foi alterada. Fato que não foi observado com as outras espécies por serem mais densas e menos porosas.

Conforme Calil Neto (2011), a escolha do adesivo deve ser associada às condições climáticas de uso, espécie de madeira, métodos de fabricação e emprego de preservativos. A recomendação da NBR 7190 (ABNT, 2022) para os adesivos a serem utilizados na fabricação das peças estruturais de MLC é que devem ser estruturais e

apresentar propriedades compatíveis às condições ambientais a que os elementos estruturais são submetidos durante toda a sua vida útil.

A norma brasileira (ABNT NBR 7190, 2022) orienta que a quantidade de adesivo e os demais parâmetros de colagem devem seguir especificações dos fabricantes do adesivo. Calil Neto (2011) recomenda para o adesivo poliuretano, por exemplo, uma quantidade de adesivo por linha de cola de aproximadamente 200 g/m², obtendo-se uma colagem de alta qualidade condicionada a uma pressão exercida e bem definida.

Jesus (2000) já apontava uma pressão de colagem de 0,7 MPa para madeiras de densidade menor ou igual a 0,5 g/cm³ e 1,2 MPa para densidades maiores. Atualmente, a NBR 7190 (ABNT, 2022) indica os mesmos parâmetros relativos à pressão de colagem.

O estudo desenvolvido por Jesus (2000) recomenda para o *Eucaliptus grandis*, por exemplo, uma pressão de colagem de 0,6 MPa com tempo de pressão de 4 horas e tempo de cura de 4 dias.

2.1.1.3 Teor de umidade

A umidade das lamelas para a colagem deve estar em torno de 15% (FIORELLI, 2005; CERCHIARI, 2013; NOGUEIRA, 2017). A NBR 7190 (ABNT, 2022) orienta que se deve buscar a homogeneização do teor de umidade do lote de tábuas, para que no momento da colagem o teor de umidade esteja com no máximo 18% de teor de umidade, de modo que a variação entre lamelas não seja superior a 5%.

Dentre as vantagens da madeira lamelada colada, está a estabilidade dimensional, por conta deste material ser produzido com umidade próxima à condição padrão de umidade (12%), reduzindo ao mínimo o comportamento de contração e inchaço. Além disso, a MLC dispõe de grande flexibilidade com curvaturas, é um material resistente a substâncias químicas e agressivas, possui alta capacidade de carga e baixo peso próprio (CALIL NETO, 2010).

2.1.2 Classificação da madeira

A norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022) traz parâmetros de caracterização das propriedades das madeiras em função de madeiras de florestas plantadas e de madeiras de florestas nativas. Para essas últimas, é permitido que a amostra seja constituída de corpos de prova isentos de defeitos, cujos ensaios devem ser

realizados conforme o documento 3 da NBR 7190 (Projeto de estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas), na qual a classe de resistência é atribuída a partir da resistência característica à compressão paralela da amostra ($f_{c0,k}$).

Para lotes homogêneos de madeiras de florestas plantadas, a amostra constituída de peças estruturais deve ser ensaiada conforme o documento 4 da NBR 7190-4 (Projeto de estruturas de madeira – Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização peças estruturais), cuja classe de resistência é estabelecida a partir da resistência característica à flexão da amostra ($f_{m,k}$).

Quando não se pode garantir a homogeneidade do lote de madeira de floresta plantada, mas sabe-se sobre os efeitos de defeitos na resistência e rigidez, suas propriedades são atribuídas a cada peça estrutural. Nesta classificação, cada peça deve ser classificada visual e mecanicamente, conforme ABNT NBR 7190-2, sendo a classe de resistência a menor das duas classes (visual e mecânica).

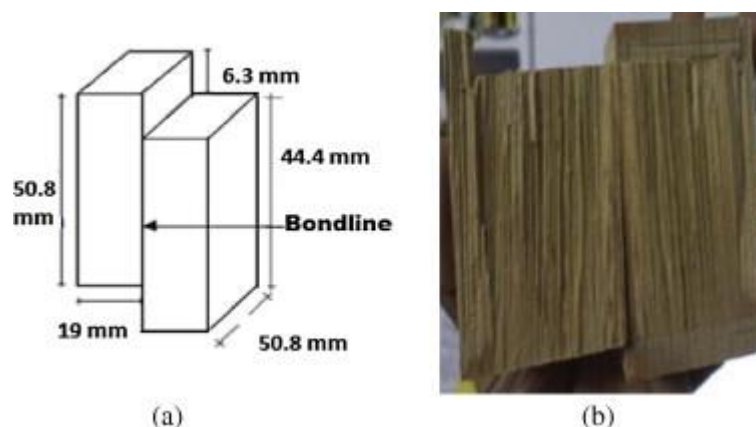
Ainda, a ABNT NBR 7190-1 (2022) no item 6.7.4 discorre sobre peças formadas por lamelas de madeira colada, de modo que o lote do qual são produzidas as tábuas deve ser enquadrado nas classes de resistência, assim como as tábuas devem passar por uma classificação visual seguida de uma classificação através do módulo de elasticidade (ABNT NBR 7190-2).

Nadir *et al.* (2014) analisaram as propriedades da madeira sólida e madeira lamelada provenientes de floresta plantada (madeira de borracha – *Hevea brasiliensis*), e para a madeira sólida foram admitidos defeitos como nós, para demonstrar o caso real.

Com isso, pode-se perceber o quão importante pode ser testar o comportamento da madeira simulando a situação real, ou seja, manter a madeira tal como estaria numa estrutura real. Além disso, sabe-se que a presença de defeitos como os nós caracteriza um ponto de fraqueza na madeira.

Apesar de Nadir *et al.* (2014) terem utilizado no programa experimental normas diferentes (ASTM D905-08), há uma semelhança do formato do ensaio de cisalhamento descrito no documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022), por exemplo. A Figura 5 mostra a configuração do corpo de prova e após o ensaio, sendo ele feito também para a madeira lamelada colada, para a avaliação da ligação do adesivo à madeira.

Figura 5 – Dimensões do corpo de prova de cisalhamento (a) e corpo de prova ensaiado (b).



Fonte: (NADIR *et al.*, 2014).

Segundo Thorhallsson, Hinriksson e Snæbjörnsson (2017), a força da madeira é, em geral, determinada pelo quão impecável ela é. Isto quer dizer que na presença de defeitos como nós e rachaduras, a fratura ocorre nesses pontos que são considerados os mais fracos.

Em produtos de MLC, tais defeitos são distribuídos de maneira mais uniforme, resultando em uma força maior, comparados com a madeira serrada. Esses produtos constituem-se numa forma de uso racional da madeira proveniente de florestas plantadas, ainda, os defeitos podem ser amenizados com aplicação de reforço à MLC.

2.1.2.1 Classificação visual

A classificação visual da madeira consiste na avaliação da presença de defeitos naturais por meio da inspeção visual, seguida da classificação conforme norma vigente. Essa classificação é fundamentada no pressuposto de que as propriedades mecânicas de uma peça de madeira apresentam diferenças em relação àquela isenta de defeitos, por conta das características de crescimento, as quais podem ser avaliadas pelo olho humano. Sendo assim, as características de crescimento são julgadas para atribuir classes de qualidade à madeira (CARREIRA, 2003).

Conforme o documento 2 da NBR 7190 (ABNT, 2022), a classificação visual pode ser a olho nu, com auxílio de alguns instrumentos e equipamentos. Para essa classificação as tábuas devem apresentar nó que ocupe menos de $\frac{1}{4}$ de sua seção transversal final e medula que ocupe menos de $\frac{1}{6}$ de sua largura final e inclinação

das fibras inferior a 6°, admitindo-se rachaduras longitudinais com extensão inferior a 30 cm.

A NBR 7190-2 (ABNT, 2022) considera na classificação visual de peças de madeira serrada defeitos como: presença de medula, nós, inclinação excessiva das fibras, fissuras passantes e não passantes, distorções dimensionais, ataques biológicos, danos mecânicos ou bolsas de resina.

Conforme os defeitos avaliados, atribui-se uma classe visual à peça serrada de madeira de florestas plantadas: Classe 1, Classe 2 ou Classe 3. A Classe 1 refere-se as lamelas de melhor qualidade e a Classe 3 as de qualidade inferior. Os critérios para avaliação destinam-se a peças de madeira serrada de coníferas e folhosas de florestas plantadas.

A norma ABNT NBR 7190-2 (2022) estabelece critérios de classificação visual através da inspeção da presença de defeitos das duas faces de cada peça, de modo que desconsidera os defeitos nos topos e bordas.

O Quadro 1 ilustra o processo de medição dos defeitos. Em relação aos nós, são considerados apenas os fixos, sendo a ocorrência de nós cariados, soltos ou vazados, motivo de rejeite da peça. A classificação dos nós se dá através da relação D/L , onde D é o diâmetro do nó e L é a dimensão da face. Quanto à inclinação das fibras, considera-se a zona que possuir maior inclinação, sendo expressa em proporção obtida através da relação $(i = a/b)$ que está ilustrada na figura do Quadro 1.

Quadro 1 – Medição de defeitos.

Nós	
	<p>Medição de um nó Conjunto de nós Nós individuais próximos (mesma seção transversal)</p>
Inclinação das fibras	
	<p>Medição da inclinação das fibras na face de uma peça</p>
Fissuras	
	<p>Medição do comprimento de fissuras</p>
Encurvamento	
	<p>Medição do encurvamento</p>
Arqueamento	
	<p>Medição do arqueamento</p>
Torcimento	
	<p>Medição do torcimento</p>

Fonte: ABNT NBR 7190-2 (2022).

As fissuras podem ser passantes e não passantes, fendilhados e rachas cujo comprimento é mensurado paralelamente ao comprimento da peça. Considerado um empenamento da peça em relação ao seu eixo de menor inércia, o encurvamento deve ser medido no ponto de maior deslocamento à linha que une as duas extremidades da peça.

Já o arqueamento, consiste em um empenamento em relação ao eixo de maior inércia de uma peça de madeira, cuja medida deve ser feita no ponto de maior deslocamento em relação à linha reta que une as duas extremidades. E por fim, o torcimento é uma combinação de empenamentos em relação aos eixos de maior e de menor inércia. Sendo assim, esses parâmetros são avaliados nas lamelas, com o objetivo de classificá-las.

2.1.2.2 Classificação pelo módulo de elasticidade

A NBR 7190-2 (ABNT, 2022) apresenta os critérios para classificação mecânica da peça de madeira por meio da avaliação do módulo de elasticidade (E_0) e densidade aparente de cada peça. O módulo de elasticidade é obtido pelo ensaio não destrutivo de flexão estática com a madeira na condição referencial de umidade de 12%, porém, para ensaios realizados em outras condições de umidade, entre 10% e 20%, admite-se a aplicação de variação de 2% no valor da propriedade para cada 1 ponto percentual de variação.

O ensaio para a avaliação do módulo de elasticidade (E_0) de cada peça é o de flexão estática a 3 pontos, força concentrada no meio do vão livre, mensurando a flecha no meio do vão. A peça deve ser ensaiada com comprimento e seção transversal integrais, cujo vão livre deve ser de 18 vezes a espessura nominal da seção transversal.

Determina-se o módulo de elasticidade (E_0) à flexão no regime elástico-linear do diagrama força x deslocamento no intervalo de 10% a 40% da força máxima pela Equação (1):

$$E_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{L}{b} \right)^3 \cdot \left(\frac{\Delta F}{\Delta e} \right) \cdot \frac{1}{h} \quad (1)$$

Onde:

E_0 : módulo de elasticidade à flexão estática, em MPa;

b: espessura nominal da peça, em mm;

h: largura nominal da peça, em mm;

L: vão de ensaio da peça, em mm;

ΔF : incremento de carga, em N;

Δe : incremento de deslocamento, em mm.

2.1.3 Caracterização da madeira lamelada colada (MLC)

A caracterização das propriedades da madeira lamelada colada deve ser realizada por meio de corpos de prova retirados de peças estruturais fabricadas. Admitese as mesmas propriedades da madeira das lamelas.

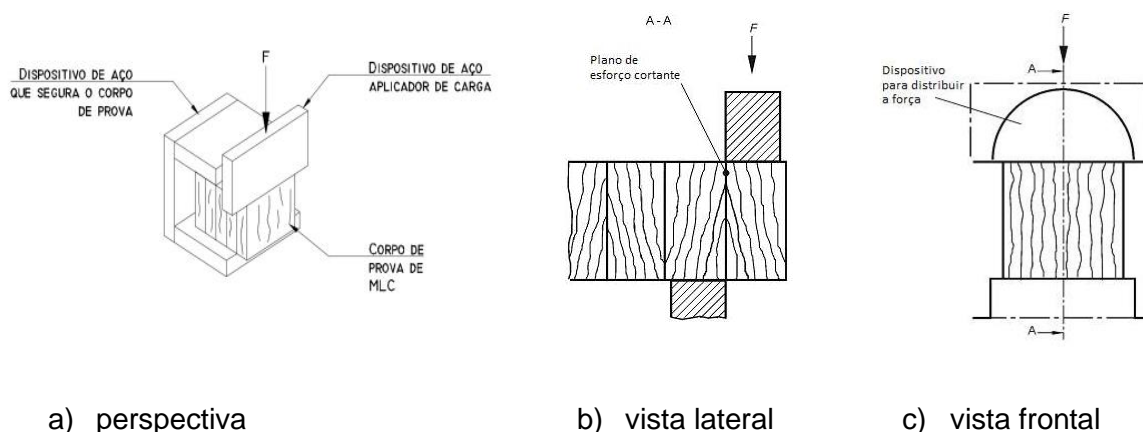
Os ensaios de elementos de MLC devem seguir o documento 6 da ABNT NBR 7190 (Projeto de estruturas de madeira – Parte 6: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural).

2.1.3.1 Resistência ao cisalhamento na linha de cola

O objetivo do método de ensaio é determinar a resistência ao cisalhamento nas linhas de cola da madeira lamelada colada de um lote. Para a realização do ensaio é necessária uma máquina de ensaio de compressão capaz de medir forças de ruptura e aplicar a força a uma velocidade constante para que a ruptura seja atingida no tempo mínimo de 20 s.

A Figura 6 apresenta o dispositivo para aplicar a força de corte, transmitindo a força ao corpo de prova, de modo que a força atue sobre a superfície transversal do corpo de prova com uma distribuição uniforme de pressão em toda a largura do corpo de prova.

Figura 6 – Dispositivo para o ensaio de cisalhamento na linha de cola.



a) perspectiva

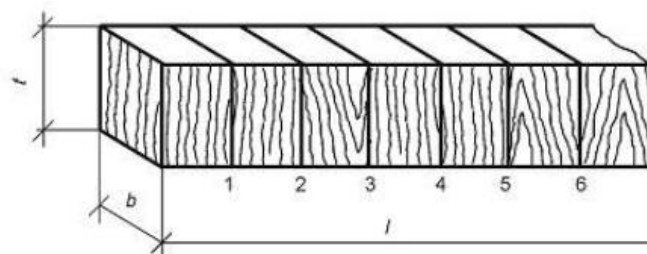
b) vista lateral

c) vista frontal

Fonte: ABNT NBR 7190-6 (2022).

A Figura 7 expõe o corpo de prova para o ensaio de cisalhamento, que deve ser registrado na viga da qual foi retirado, devendo ser parte da seção transversal do elemento estrutural. As superfícies que receberão a aplicação das forças devem estar paralelas entre si e perpendiculares à direção das fibras. A resistência ao cisalhamento na linha de cola e a porcentagem de falha na madeira na área cisalhada deve ser registrada.

Figura 7 – Corpo de prova e área da aplicação da força no ensaio de cisalhamento.



Fonte: ABNT NBR 7190-6 (2022).

A resistência ao cisalhamento da linha de cola é dada através da Equação (2):

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{b.t} \quad (2)$$

Onde:

f_{v0} é a resistência ao cisalhamento da linha de cola (MPa);

$F_{v0,max}$ é a força de máxima cisalhante aplicada nas lamelas (N);

b é a largura do corpo de prova (mm);

t é a altura do corpo de prova (mm).

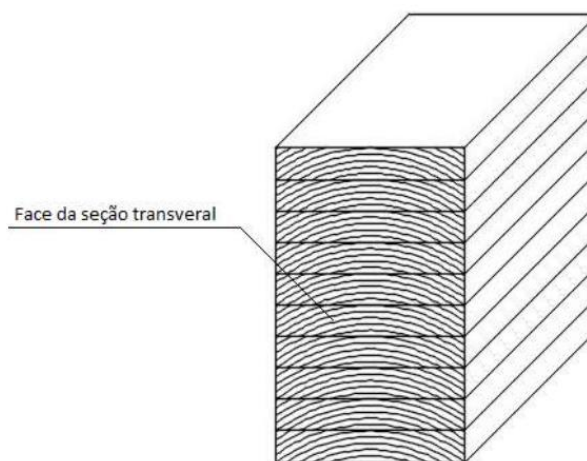
A área de ruptura em relação ao total da área submetida ao cisalhamento deve ser estimada através da separação das uniões, sendo a porcentagem de ruptura determinada em relação a área total da madeira e de acordo com o modo de ruptura.

Bianchi (2020) encontrou uma resistência ao cisalhamento na linha de cola para o *Eucalyptus grandis* com adesivo poliuretano bicomponente variando de 6 a 8 MPa. Nadir et al., (2014) encontraram para a madeira *Hevea brasiliensis* maciça a resistência ao cisalhamento de 13,45 MPa e para a madeira lamelada colada utilizando adesivo PVA (acetato de polivinila) 8,59 MPa, com percentual de falha na madeira de 99,7%.

2.1.3.2 Delaminação

O ensaio de delaminação consiste em determinar a delaminação das linhas de cola de um lote de madeira lamelada colada, no qual as linhas de cola devem ser avaliadas de maneira que se observe o desprendimento das lamelas em ambas as faces da seção transversal do corpo de prova (Figura 8).

Figura 8 – Representação da face da seção transversal dos corpos de prova.



Fonte: ABNT NBR 7190-6 (2022).

A Tabela 2 apresenta os principais procedimentos do ensaio de delaminação, no qual devem ser registradas as áreas com uniões debilitadas causadas pela presença de nós e outras características que possam influenciar os resultados, não podendo considerar rupturas produzidas na madeira.

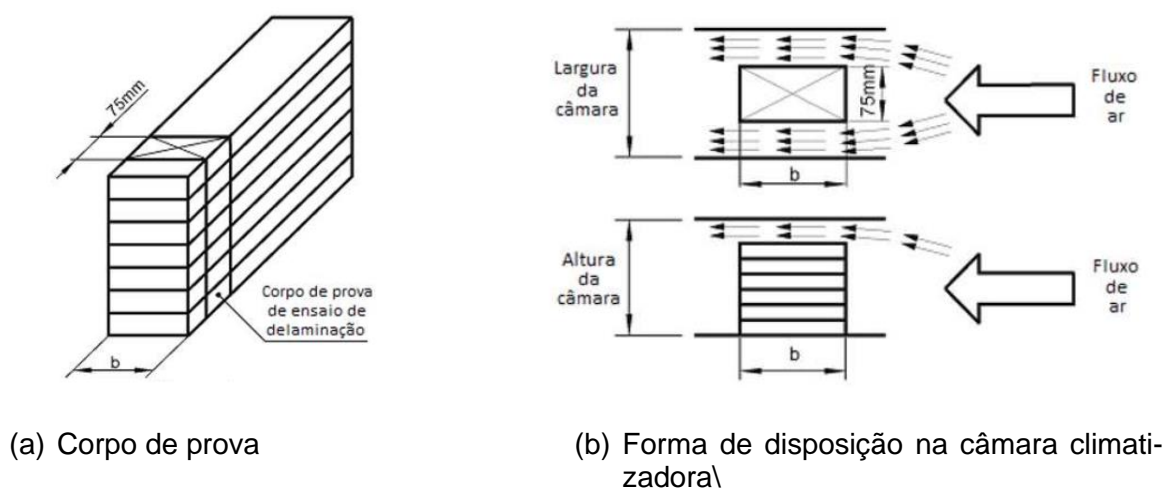
Tabela 2 – Procedimentos do ensaio de delaminação.

Aparelhagem	Autoclave
	Câmara climatizadora
	Balança
Corpos de prova	Extraídos de elementos estruturais já fabricados
	Umidade na faixa de 12% +/- 2%
Procedimento	Comprimento de 75 mm +/- 5 mm cortado na forma perpendicular à direção das fibras
	Procedimento 1 - Adesivos de uso exterior Procedimento 2 - Adesivos de uso interior
Cálculos	Porcentagem de delaminação total (Dt): $Dt = (La/Lt) \times 100$
	Maior porcentagem de delaminação para uma linha de cola: $Dt = 100 \times (L_{am\acute{a}x} / L_{jm\acute{a}x})$

Fonte: Autora embasada na ABNT NBR 7190-6 (2022).

A Figura 9 apresenta o corpo de prova e sua forma de disposição na câmara climatizadora, o qual deve ser retirado de elementos estruturais já produzidos, identificando-se tais elementos de MLC dos quais os corpos de prova foram retirados.

Figura 9 – Corpo de prova e forma de disposição na câmara climatizadora para o ensaio de delaminação.



Fonte: ABNT NBR 7190-6 (2022).

Bianchi (2020) obteve um resultado do percentual de delaminação médio para a MLC de *Eucalyptus grandis* com o adesivo poliuretano bicomponente (KEHL) de 0,83%, estando dentro dos percentuais de delaminação média estabelecidos em norma (ABNT NBR 7190-6, 2022), que são definidos em função do ambiente de exposição, sendo para folhosas 6% e 4% para coníferas (ambiente externo), 8% para

folhosas e 6% para coníferas (externo protegido) e 10% para folhosas e 8% para coníferas (interno).

2.1.3.3 Resistência das emendas denteadas

O método de ensaio objetiva a determinação da resistência das emendas denteadas à tração paralela às fibras das lamelas de madeira. Requisitos mínimos de uniões longitudinais tipo denteadas de lamelas de madeira maciça, de uma mesma espécie, são estabelecidos para uso em elementos estruturais.

O controle de qualidade das emendas por união denteadas pode ser feito através da determinação da resistência à flexão descrita pela ABNT NBR 7190-4, EM 408 e EM 15497.

Deve ser utilizada a mesma espécie de madeira para a produção de emendas dentadas. Quanto aos adesivos a serem utilizados, seguem as mesmas recomendações para a fabricação da MLC.

A resistência à tração paralela às fibras é dada pela razão entre a máxima força de tração aplicada a um corpo de prova alongado e a área do trecho da emenda.

2.2 FLORESTAS PLANTADAS

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2020), a área de árvores plantadas no Brasil chegou a 9,0 milhões de hectares, no ano de 2019, sendo 6,97 milhões de hectares (77%) referentes aos plantios de eucalipto, 1,64 milhão de hectares de pinus (18%) e 0,39 milhão de hectares com outras espécies, sendo elas, seringueira, acácia, teca e paricá. Do total de hectares do plantio de árvores, 29% representa a comercialização da madeira em tora, 36% pertence às empresas do segmento de celulose e papel e 12% é referente ao segmento de siderurgia e carvão vegetal.

Quando se considera o tempo decorrido entre o plantio e a colheita das árvores do mundo, o setor florestal brasileiro possui uma das rotações mais curtas, sendo referência mundial em tecnologia florestal. Tal referência deve-se à adoção de boas práticas de manejo, ao melhoramento genético e às condições edafoclimáticas do país (IBÁ, 2020).

Sendo assim, pode-se perceber que as florestas plantadas tem potencial de fornecimento de matéria-prima satisfatório para a indústria da construção civil, considerando a rotação curta e o crescimento anual das plantações.

Segundo Palma e Ballarin (2003), a demanda crescente de madeira mudou as práticas de manejo silvicultural nas plantações, e com isso houve um interesse nas características da madeira juvenil por parte de pesquisadores. Com o intuito de abastecer os mercados, os silvicultores estão focando na produção de grandes volumes de madeira com rotações cada vez menores, de modo que se induz o crescimento rápido das árvores, sem atentar para as consequências nas propriedades físicas e mecânicas da madeira resultante.

Os fatores que exercem influência nas propriedades das madeiras de coníferas são os mesmos para as propriedades das madeiras de folhosas. Embora o lenho juvenil exista em muitas folhosas, a quantidade é significativamente menor em relação às coníferas (LATORRACA; ALBURQUERQUE, 2000).

A madeira juvenil possui menor densidade básica em relação à madeira adulta, além de maior contração longitudinal, menor contração transversal, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina, menor conteúdo de celulose, menor resistência e rigidez. A estabilidade dimensional da madeira juvenil é diferente da madeira adulta, principalmente, na estabilidade dimensional paralela à grã. Porém, nem toda madeira juvenil apresenta contração longitudinal excessiva (PALMA; BALLARIN, 2003).

Com isso, a madeira juvenil, no geral, depende basicamente das características genéticas da árvore, contudo, considerando a influência da atividade fisiológica dos ramos na árvore, o número de anéis de madeira juvenil dependerá também das características da plantação e dos manejos silviculturais. Sendo assim, quanto mais cedo os ramos da árvore perderem a atividade e forem podados, mais cedo começará a formação de madeira adulta (PALMA; BALLARIN, 2003).

Pode-se entender que é fundamental o conhecimento das propriedades da madeira juvenil visando o seu emprego correto para as diversas soluções, assim como o manejo silvicultural adequado para o emprego do produto final, visto que é possível adequar práticas de manejo ao emprego final da madeira. Se os ramos da árvore forem podados cedo, tem-se mais cedo a formação de madeira adulta, prática de manejo interessante para a indústria da construção civil.

Além do manejo silvicultural, a qualidade da madeira também é influenciada por fatores como espécie arbórea e espaçamento das árvores (FERREIRA *et al.*, 2019). Um maior espaçamento possibilita uma menor competição entre as árvores jovens, produzindo mais fotossíntese e lenho inicial mais denso em relação a árvores em espaçamentos reduzidos. Com isso, maiores espaçamentos promovem maior diâmetro e maior conicidade (ROCHA, 2011).

Ferreira *et al.* (2019) afirmam que o eucalipto apresenta grande número de espécies e vários híbridos interespecíficos que possibilitam a seleção de materiais genéticos destinados a cada finalidade da madeira. Os autores indicam que o agricultor deve dar ênfase às formas de uso mais nobres, como postes, madeira serrada e laminados para a produção de móveis. Todavia, quanto mais nobre for o emprego da madeira, maior será a complexidade do manejo silvicultural a ser adotado.

Conforme Azambuja (2006), para a produção de elementos estruturais de madeira lamelada colada é fundamental fazer o corte da tora de madeira diferenciada, de modo que se aproveite ao máximo a madeira adulta com melhores qualidades de resistência, sendo a densidade um dos fatores importantes para essa produção com qualidade e desempenho estrutural.

2.2.1 Folhosas de florestas plantadas

A área de eucalipto teve crescimento médio de 1,1% ao ano, nos últimos sete anos. A Bahia possui 657 mil hectares de florestas plantadas, dos quais 620 mil hectares são plantios com eucalipto (IBÁ, 2019).

As plantações de eucalipto possuem ciclos de 7 anos, em que, após a colheita, uma nova floresta pode ser formada com a brotação dos tocos. Sendo assim, a renovação do ciclo pode ocorrer aos 7, 14 ou 21 anos do início do cultivo (ABRAF, 2012).

O eucalipto *urophylla* possui densidade de 739 kg/m³ maior do que a densidade do eucalipto *grandis* e menor do que as outras espécies. Com relação à resistência à compressão paralela às fibras, possui 46,0 MPa de resistência e módulo de elasticidade obtido pela compressão paralela de 13.166 MPa. Já a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras é de 8,3 MPa (ABNT NBR 7190, 1997).

Relacionando com os requisitos da madeira, no que tange à densidade para a produção da madeira lamelada colada estabelecidos na NBR 7190 (ABNT, 2022), em que as lamelas para composição da MLC devem ter densidade aparente entre 400

kg/m³ e 750 kg/m³, o eucalipto grandis (640 kg/m³) e o urophylla (739 kg/m³) atendem a esse requisito, sendo adequados para o emprego em produtos de MLC.

Conforme Santos *et al.* (2017), existem mais de 700 espécies de eucalipto catalogadas, entre as quais as espécies *Saligna*, *Grandis* e *Urophylla* (seu híbrido *Urograndis*) são as mais cultivadas no Brasil.

Conforme Assis, Abad e Aguiar (2016), o melhoramento do eucalipto no Brasil começou com o objetivo de identificar as melhores espécies adaptadas às condições climáticas brasileiras, após, teve como objetivos melhorar a uniformidade das plantações, reduzir falhas, melhorar a forma do tronco, aumentar diâmetro e altura, melhorar capacidade de brotação e aumentar a produção por unidade de área.

O *Eucalyptus urophylla* é uma espécie rústica que responde ao espaçamento e à adubação e possui resistência ao déficit hídrico, fato que tornou a espécie importante para os programas de melhoramento genético.

De acordo com o relatório de sustentabilidade da Bahia Specialty Cellulose (BSC) e Copener Florestal (2013), os clones de eucalipto são produzidos e selecionados com as características desejáveis à fabricação de celulose. Os clones são testados em condições de campo durante sete anos e depois é feita a análise tecnológica da madeira para a definição dos clones superiores, autorizando-os para o plantio comercial.

Segundo a Bracell (2020), com cerca de seis a sete anos de idade, as árvores já alcançam maturidade e podem ser colhidas. Tal maturidade é considerada para os fins a que se destina os clones desenvolvidos pela Bracell, que são para a indústria de celulose e papel.

Apesar da finalidade da madeira dos clones ser para celulose, existem clones com potencialidade para processamento mecânico, tendo propriedades físicas e mecânicas satisfatórias e de fácil trabalhabilidade, possibilitando obter madeira desdobrada com baixo custo de produção (LIMA; STAPE, 2017).

Contudo, os novos materiais genéticos de espécies e híbridos de *Eucalyptus* existentes em ensaios experimentais ou em plantações comerciais necessitam ser testados em relação às capacidades para desdobro e uso como madeira sólida. Porém, os mesmos autores afirmam que tais pesquisas não são efetuadas de forma rotineira, porque o setor de madeira serrada de *Eucalyptus* não é tão expressivo e

organizado quanto o setor de celulose ou carvão e, ainda, o tempo de maturação dos materiais é rápido.

A espécie *Eucalyptus urophylla* deu origem a clones como por exemplo, *COP 1249*, *COP 1406*, *COP 1296* e *COP 1404*, plantados em áreas de mais de 20 municípios do litoral norte e agreste baianos (BSC; COPENER FLORESTAL, 2013). O *COP 1404* é um clone promissor de rápido crescimento.

O estudo desenvolvido por Lima e Stape (2017) indicou o diâmetro a altura do peito (DAP) de 35,4 cm aos 8 anos de idade para o *COP 1404*, com altura total de 40,7 m, na plantação da região de Esplanada, na Bahia.

Paulino e Lima (2018) encontraram para o clone *COP 1404* uma densidade básica de 0,47 g/cm³ e dimensões anatômicas expostas na Tabela 3, em plantios da região de Entre Rios e Esplanada, na Bahia.

Tabela 3 – Densidade básica e dimensões anatômicas do clone *COP 1404*

COP 1404	
Densidade básica (DB)	0,47 g cm ⁻³
Comprimento de fibra (CF)	1072 µm
Espessura da parede da fibra (EPF)	5,2 µm
Comprimento de vaso (CV)	655 µm
Diâmetro de vaso (DV)	135 µm
Frequência de vaso (FV)	7,2 n mm ⁻²
Porcentagem total de vaso (PTV)	12,01%
Altura de raio (AR)	334 µm
Diâmetro de raio (DR)	13,6 µm
Frequência de raio (FR)	11,1 n mm ⁻¹

Fonte: (PAULINO; LIMA, 2018)

Para a indústria de celulose, as árvores são consideradas adultas entre os 7 e 13 anos de idade por apresentarem crescimento promissor, por esse tempo de rotação indica ser favorável para o uso na indústria da construção civil. Entretanto, para esse seguimento não se conhece as características físico-mecânicas que possam indicar o comportamento, potencialidades e limitações dessa espécie clonal.

A espécie de eucalipto usada para comparação com os clones caracterizados no estudo de Lima e Stape (2017) foi o *cloeziana*, visto que é considerada por ter ótima capacidade para serraria, aos 22 anos. Pode-se observar que o clone 1404

apresentou diâmetro e altura maiores aos 8 anos de idade em relação ao *cloeziana* com 22 anos de idade, cujos valores são 34 cm de diâmetro e 30,2 m de altura. Os autores realizaram a caracterização que está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização da madeira serrada do clone COP 1404 e *Eucalyptus cloeziana*.

	COP 1404	<i>E. Cloeziana</i>
Índice de rachaduras de extremidade de tábuas secas (IRTS)	14,1 cm	8,6 cm
Flecha de encurvamento (Fe)	1,53 cm	1,06 cm
Flecha de arqueamento (Fa)	1,12 cm	1,21 cm
Quantidade de nós (N)	7,63	6,81

Fonte: (LIMA; STAPE, 2017)

Observou-se que o *COP 1404* apresentou o índice de rachaduras de extremidade de tábuas secas (IRTS) maior em relação ao *cloeziana* e por outro lado, o arqueamento e a quantidade de nós são muito próximos. Essas características podem ser explicadas pelo fato de a madeira COP 1404 ser juvenil, já que o *cloeziana* possuía idade mais avançada, assim como pode estar associado aos seus fatores genéticos.

Os autores observaram que as rachaduras diminuíram no sentido da medula para casca devido ao efeito combinado da madeira central composta de madeira juvenil apresentando menor resistência à tração normal das fibras e das componentes transversais oriundas da tensão de crescimento longitudinal, liberadas no desdobro, sendo máximas, coincidindo com a direção paralela às faces, gerando tração normal máxima.

Essa questão faz com que a madeira da região próxima da medula tenha menor resistência em relação aos efeitos das tensões de crescimento e tensões de secagem. (LIMA; STAPE, 2017). Embora a madeira juvenil apresente características relacionadas à estrutura anatômica como fator limitante, questões relativas ao manejo silvicultural, adequado à finalidade de uso, podem amenizar ou melhorar as características desfavoráveis ao uso como madeira serrada.

Essas características apresentadas pelo COP 1404 são encontradas na madeira da maioria das espécies de *Eucalyptus* de florestas jovens, principalmente, no que se refere às tensões de crescimento. Porém, estas questões podem ser mitigadas

através do aprimoramento das tecnologias de abate, processamento e secagem do eucalipto (ASSIS, 2007).

O processamento de madeira de eucalipto deve considerar possibilidade de melhoria, a fim de atender os requisitos de qualidade das indústrias, tanto no âmbito das propriedades da madeira quanto no campo do manejo e do processamento industrial. Sendo assim, os programas de melhoramento genético se constituem como alternativas viáveis para tornar a madeira de eucalipto condizente para laminação e serraria.

Para a fabricação da madeira lamelada colada (MLC), o desdobro da madeira do COP 1404 deve ser feito com mais cuidado, com a umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, de modo a minimizar os efeitos do comportamento de contração e inchamento, assim como realizar uma secagem controlada, a fim de amenizar os efeitos das tensões de secagem. Apesar da madeira juvenil possuir tensões de crescimento significativas, gerando assim rachaduras, os níveis de rachaduras de topo em toras podem não refletir o que vai ocorrer com tábuas adquiridas a partir delas (ASSIS, 2007).

Lima e Stape (2017) consideraram que as espécies clonais avaliadas apresentaram boa qualidade na maioria das características, destacando que há clones com potencial para processamento mecânico, com boas propriedades físicas e mecânicas e de fácil trabalhabilidade, possibilitando a obtenção de madeira desdobrada com baixo custo de produção.

2.3 ADESIVOS E A MADEIRA

Com o desenvolvimento dos adesivos sintéticos foi possível o aperfeiçoamento da indústria dos compensados de madeira e da madeira lamelada estrutural. Existem vários adesivos no mercado, entre os principais estão o fenol-formaldeído, ureia-formaldeído, poliuretanos, epóxi e resorcinol-formaldeído.

O fenômeno físico-químico da adesão possui um mecanismo de interação entre as superfícies, a aderente e a adesiva. O adesivo, além de aderir dois substratos, também flui e preenche espaços vazios entre as juntas a serem coladas, promovendo interações entre adesivo e substrato (BIANCHE *et al.*, 2017).

As propriedades da madeira exercem influência nas ligas adesivas, visto que os aspectos anatômicos possuem efeito na colagem. Esta influência ocorre devido aos

efeitos no movimento do adesivo para o interior da estrutura da madeira, isto é, movimento associado à penetração (CALIL NETO, 2011).

A estrutura anatômica da madeira influencia diretamente o processo de colagem, tal estrutura refere-se às diferenças de dimensões dos elementos celulares, tamanho, disposição e frequência das cavidades celulares, nas quais estão associadas com a porosidade e permeabilidade da madeira, que possuem relação com a mobilidade e penetrabilidade do adesivo. A densidade da madeira está relacionada às características anatômicas como: comprimento de fibra, espessura da parede, diâmetro do lúmen, proporção dos vários tipos de células e tecidos (LIMA *et al.*, 2007).

Conforme Bianche *et al.* (2017), a densidade da madeira é inversamente proporcional à porosidade e a ação de penetração de adesivos, em densidades menores ocorre maior penetração do adesivo.

Lima *et al.* (2007) analisaram características anatômicas de dois clones de *Eucalyptus urophylla* que exercem influência na colagem com adesivo à base de ureia-formaldeído, sendo a frequência de vasos condutores o parâmetro anatômico que mais influencia, seguido pela frequência e largura dos raios. Tais parâmetros influenciaram diretamente a colagem, em relação à resistência ao cisalhamento na linha de cola e porcentagem de falha na madeira para os dois clones. Tal resistência foi de 8,94 MPa (Clone 26), com densidade básica de 0,501 g/cm³, e 7,36 MPa (clone 39), com densidade básica de 0,467 g/cm³ ambos com idade de 14 anos.

A penetração do adesivo aumentará a força da ligação madeira-adesivo, consequentemente ter-se-á uma maior área para umidificação e adesão específica (CARRASCO, 1984). Se deve levar em consideração a característica higroscópica da madeira, em que o aumento ou redução da umidade relativa leva ao inchamento ou retração, respectivamente, fazendo com que gere defeitos nas ligações. Essa questão é mitigada com a madeira nas condições controladas de umidade, em equilíbrio.

Dentre os adesivos termofixos que endurecem por meio de reações químicas ativadas por temperaturas ou catalisadores, tem-se o poliuretano à base de mamona, oriundo de fonte renovável e não emana formaldeído, ainda proporciona um produto de alta resistência à umidade, cujo manuseio pode ser feito à temperatura ambiente, e possui alta resistência mecânica (BIACHE *et al.*, 2017).

2.3.1 Poliuretano à base de mamona

O adesivo de poliuretano à base de mamona possui uma estrutura polimérica altamente reticulada que possui boa resistência mecânica e estabilidade química (CALLIL NETO, 2011). Conforme esse autor, na união de peças de madeira, o sistema adesivo precisa da umidade contida na madeira, pois a água presente no substrato reage com uma parte do isocianato liberando dióxido de carbono, formando uma amina.

Dessa reação, tem-se a expansão do adesivo e, em seguida, a amina reage rapidamente com um outro grupo isocianato, formando assim, uma estrutura reticulada assim como nos sistemas bicomponentes. Com isso, os elementos de madeira e sua superfície são ligados.

Como principais vantagens, este adesivo apresenta a formação de uma linha de cola incolor, fácil aplicação, endurecimento rápido, sem requerer calor, e a umidade contida na madeira é utilizada para reação de cura, podendo dispensar o solvente e o formaldeído (PETRAUSKI *et al.*, 2010).

Entre os adesivos poliuretanos existe o adesivo desenvolvido pelo Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, que é produzido a partir do óleo de mamona e evidenciou potencial para a produção da madeira lamelada colada (MIOTTO, 2009).

Esse adesivo foi utilizado por Azambuja (2006), que constatou, comportamento aceitável para o adesivo poliuretano, sobretudo para o eucalipto. Esse autor expôs que a Kehl Indústria de Polímeros e Borrachas, também em São Carlos, desenvolveu em 2004, uma nova composição de um adesivo poliuretano bi-componente à base de óleo de mamona, a resina AG101, cujo tempo de utilização é, em média, de 20 min, para confeccionar vigas lameladas coladas. Esta resina é obtida utilizando duas partes do pré-polímero e uma parte de polioli de óleo de mamona (AZAMBUJA, 2006).

Bianche *et al.*, (2017), avaliou a resistência ao cisalhamento na linha de cola de juntas de *Eucalyptus sp* (densidade 0,67 g/cm³), coladas com diversos adesivos e gramaturas. E, um dos adesivos avaliados foi o poliuretano bicomponente à base de mamona da Kehl Indústria que apresentou 3150 (cp) de viscosidade, 90% de teor de sólidos e tempo de trabalho de 38 min. Esse adesivo foi comparado com o PVA, silicato, resorcinol, melamina e fenol, e, apresentou o maior teor de sólidos, o qual tem

grande importância na colagem, podendo ser entendido como a quantidade de sólidos que se formam na linha de cola.

A Tabela 5 apresenta valores de resistência ao cisalhamento do adesivo poliuretano à base de mamona encontrados por Bianche *et al.*, (2017), em função da gramatura utilizada. O ensaio foi realizado conforme a ASTM D-2339/93.

Tabela 5 – Valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola, na condição seca, em função da gramatura.

Poliuretano à base de mamona	Gramatura (g/m ²)		
	150	200	250
	76,64 kgf/cm ²	77,64 kgf/cm ²	82,64 kgf/cm ²

Fonte: (BIACHE *et al.*, 2017)

2.4 USO DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS NA MADEIRA LAMELADA COLADA

Rescalvo *et al.* (2021) afirmam que a madeira de plantações de rápido crescimento pode desempenhar um papel muito importante nas próximas décadas para o desenvolvimento de uma “bio-economia”, considerando que a descarbonização em longo prazo no setor da construção depende, em grande parte, do desenvolvimento de novos produtos de madeira engenheirada para uso estrutural. E nesse aspecto, materiais compósitos provenientes da combinação de materiais com propriedades mecânicas inferiores com materiais com propriedades mecânicas superiores caracterizam-se como uma boa solução tecnológica, visto que podem fornecer produtos de baixo peso com propriedades mecânicas competitivas.

Rescalvo *et al.* (2021) citam a madeira de álamo como uma fonte adequada de matéria-prima para a elaboração de vigas de MLC. Essa espécie tem resistência à flexão aceitável, mas possui baixo módulo de elasticidade (7061 MPa). Logo, o uso de polímeros reforçados com fibras possibilita o aumento da rigidez.

Considerados um tipo de reforço ideal para elementos estruturais, os polímeros reforçados com fibras, denominados pela sigla FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), possuem alta rigidez, alta relação resistência-peso e bom desempenho anticorrosivo (SUN; HE; LI, 2020). Tais polímeros são materiais versáteis, são compostos por fibras sintéticas (como vidro, aramida e carbono, em diferentes formas, cuja resistência do

compósito fica por conta delas) e uma matriz polimérica que mantém as fibras unidas, transferindo forças para as fibras e protegendo-as dos efeitos ambientais (MIOTTO, 2009). Além disso, também são frequentemente usadas na composição, as resinas poliéster, vinílicas e epoxídicas.

Conforme Miotto (2009), os polímeros reforçados com fibras vêm sendo desenvolvidos, desde o início da década de 1940. No entanto, foram propostos pela primeira vez por Plevris e Triantafillou (1992), que analisaram o reforço de membros de madeira com FRP, cujo método envolve a colagem externa de folhas finas nas zonas de tensão de estruturas de madeira, empregando resinas epóxi, tendo como resultado a produção de peças com características aprimoradas de resistência, rigidez e ductilidade.

Basterra *et al.* (2017) desenvolveram um elemento de madeira lamelada colada duplo, duas lamelas com o polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) introduzido na linha de cola, dentro da seção.

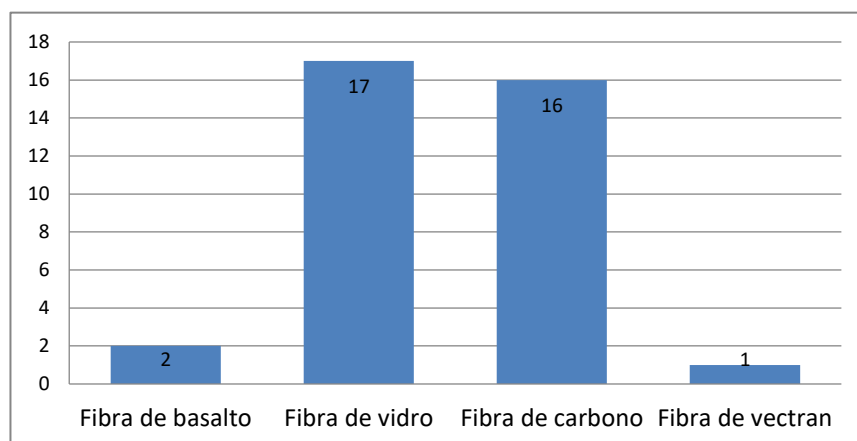
Conforme Raftery e Whelan (2014), a probabilidade de delaminação prematura é expressivamente reduzida quando o reforço é colocado internamente, pois existe uma área de ligação muito maior.

Diante de uma pesquisa bibliográfica fundamentada na metodologia *Proknow-C*, selecionou-se artigos de pesquisa (*research articles*) por meio dos bancos de dados online, *Scopus* e *Science Direct*, buscando as seguintes palavras-chave: “*glulam*”, “FRP”, “*reinforcement*”, “*timber*”. Refinou-se a pesquisa para os últimos dez anos (2012 a 2022) e especificou-se o tipo de documento (artigo de pesquisa).

2.4.1 Tipos de fibras

Através da leitura e seleção dos documentos acerca do tema pesquisado, listou-se os tipos de fibras utilizados pelos autores (Figura 10), sendo a fibra de vidro e carbono as mais empregadas no reforço da madeira lamelada colada (MLC).

Figura 10 - Número de trabalhos que utilizaram determinadas fibras



Fonte: Autora (2022)

O item a seguir apresenta características acerca das fibras de carbono que consistem em um material de engenharia de grande aplicação, por conta do seu alto módulo e força específica. Além disso, é leve, flexível, resistente à fadiga e ao calor e possui alta resistência mecânica, tendo facilidade em ser associada a outros materiais (SOUTO *et al.*, 2015).

2.4.1.1 Fibra de carbono

A produção da fibra de carbono se dá através da oxidação controlada, carbonização e grafitização de precursores orgânicos ricos em carbono que já estão na forma de fibra. O precursor mais comum é o poliacrilonitrila (PAN), pois fornece as melhores propriedades da fibra de carbono, contudo, elas podem ser feitas de piche ou celulose. A variação do processo de grafitização produz fibras de alta resistência ou fibras de alto módulo (PAMAR *et al.*, 2015).

Após a formação da fibra de carbono, é aplicado um tratamento superficial para melhorar a ligação da matriz, tendo a colagem química a função de protegê-la durante o manuseio. De acordo com Pamar *et al.* (2015), a fibra de carbono possui a maior rigidez específica de qualquer fibra disponível comercialmente, tendo resistência muito alta em tração e compressão e alta resistência à corrosão e fadiga.

A fibra de carbono bidirecional (Figura 11) proporciona maior tolerância a danos e maior notoriedade em diferentes aplicações.

Figura 11 – Tecido bidirecional de fibra de carbono.



Fonte: (FIBERTEX, 2018)

As fibras bidirecionais podem ter ângulos de orientação de 30°, 45° e 90°. Essa última apresenta tensões de tração e de flexão superiores.

Pamar *et al.* (2015) desenvolveram um estudo para compreender as propriedades mecânicas de compósitos bidirecionais de fibra de carbono, de modo que investigaram o efeito da orientação da fibra, visto que as propriedades mecânicas dependem, sobretudo, da orientação da fibra. Os autores concluíram que a resistência à flexão para a orientação de 90° é superior às fibras com orientação de 30° e 45° e a resistência máxima à tração também é superior.

A Tabela 6 mostra os resultados dos testes de tração e flexão encontrados por esses autores (PAMAR *et al.*, 2015) para fibra de carbono com orientação de 90°, 30° e 45°.

Tabela 6 – Resultados do teste de tração e flexão para fibra de carbono.

Tração			
Orientação	90°	30°	45°
Máx. carga de Ruptura (N)	6950	2685	3452
Resistência máxima à tração (N/mm ²)	365,3	125,2	175,3
Extensão (mm)	7,85	16,4	13,25
Carregamento no ponto de alto rendimento (N)	3398	995,96	1112,1
Flexão			
Orientação	90°	30°	45°
Máx. carga de Ruptura (N)	493,5	204,3	255,4
Resistência máxima à flexão (N/mm ²)	12,23	5,87	6,12
Deflexão (mm)	8,483	9,843	14,25
Carregamento no ponto de alto rendimento (N)	55,83	25,32	20,17
Módulo de Young (N/mm ²)	5550,2	2456,2	2935,2
Resistência à flexão (3 pontos) (N/mm ²)	358,05	175,71	165,32

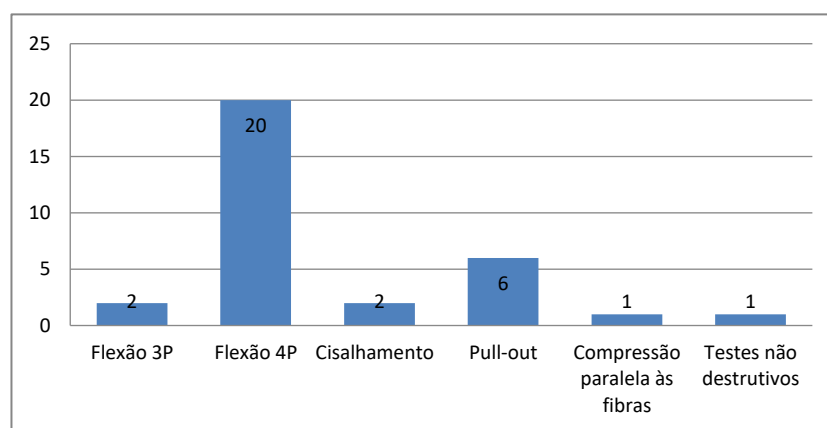
Fonte: (PAMAR *et al.*, 2015)

Uma fibra em tecido bidirecional, cuja especificação é CC – 0202 (Figura 11), foi avaliada no estudo desenvolvido por Silva (2020) que obteve resultados satisfatórios de ganho de resistência 30% e 60%, quando aplicado uma e duas camadas do tecido, respectivamente, como reforço de cavilhas circulares, no ensaio de flexão em três pontos.

2.4.2 Principais ensaios do produto final

A Figura 12 apresenta a quantificação de ensaios englobados no programa experimental de cada artigo do portfólio bibliográfico.

Figura 12 - Quantificação de ensaios



Fonte: Autora (2022).

Pode-se perceber que o ensaio predominante nas pesquisas para avaliar o desempenho do produto final (MLC reforçada com polímeros reforçados com fibras) foi o ensaio de flexão de 4 pontos. Os ensaios não destrutivos constaram em apenas um trabalho e foram referentes ao teste de ressonância e ductilidade.

2.4.2.1 Flexão de 4 pontos

Khelifa *et al.* (2013) formularam um procedimento numérico para simular o comportamento à flexão dos elementos de madeira reforçados com fibra de carbono (CFRP), cuja continuidade cinemática foi tomada entre adesivo e madeira. Os autores justificaram o ocorrido através do módulo de cisalhamento baixo da madeira, sendo que os modos de falha não ocorreram entre madeira e adesivo.

O comportamento mecânico da madeira é influenciado pela presença de defeitos como nós, rachaduras e inclinação das fibras. Esses defeitos afetam mais a zona de tração do que a zona de compressão (KHELIFA *et al.*, 2015).

Azambuja (2006) relatou que as vigas de MLC de Pinus e Eucalipto, de uma forma geral, apresentaram esmagamento pronunciado (compressão normal às fibras) na região dos apoios e nos pontos de aplicação das forças. Para as vigas de eucalipto colados com o poliuretano, relatou-se ruptura por cisalhamento na madeira e na linha de cola e esmagamento na região de apoio, o qual não indica um problema na cola-gem, mas fragilidade da madeira.

Brunetti *et al.* (2019) estudaram a viabilidade e o desempenho de vigas de MLC de abeto da Noruega reforçadas com fibra de carbono utilizando o adesivo poliuretano monocomponente para colar também a fibra. Foi observado o comportamento linear de deflexão de carga para vigas não reforçadas e falha típica de tração na parte inferior e curvas com uma fase não linear antes da falha para vigas reforçadas, evidenciando maior ductilidade. Além disso, os autores mencionaram falha iniciada a partir de nós ou desvios de grãos.

Já Basterra *et al.* (2017) afirmaram que independente do reforço, todas as vigas de MLC apresentaram comportamento essencialmente elástico linear até a ruptura, em que a falha começou em defeitos ou irregularidades da madeira. Ainda, não foram observadas falhas de adesão encontradas na linha de cola. A Figura 13 mostra a falha de uma viga sem reforço.

Figura 13 -Falha de uma viga sem reforço.



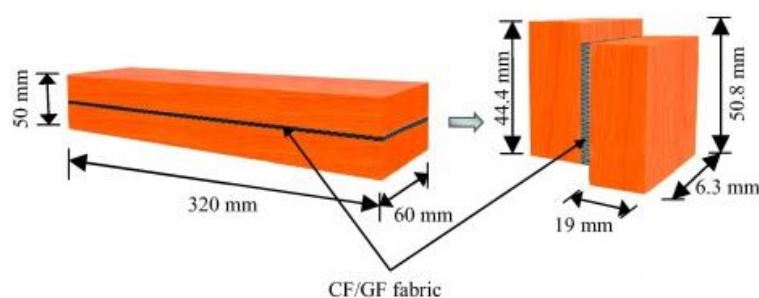
Fonte: (BASTERRA *et al.*, 2017).

2.4.2.2 Cisalhamento

Nadir *et al.* (2016) utilizaram o adesivo PVA para laminação da madeira e para a colagem da fibra de vidro e carbono, primer epóxi e adesivo epóxi. As amostras

foram submetidas ao teste de cisalhamento conforme ASTM D905-08 e cumpriram o requisito, com base no Padrão Agrícola Japonês para MLC (JAS234: 2003), cujo parâmetro é 5,4 MPa, ficando todas as amostras com valores acima deste. A Figura 14 ilustra a configuração do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento.

Figura 14 – Configuração do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento.



Fonte: (NADIR *et al.*, 2016).

O ensaio de cisalhamento é utilizado como um mecanismo para avaliar a aderência adesivo-madeira e adesivo-fibra-madeira, por meio de corpos de prova retirados da peça de MLC.

Os autores Costa *et al.* (2018) avaliaram o comportamento mecânico de dois adesivos por meio do ensaio de corpos de prova de madeira de Eucalipto submetidos ao cisalhamento paralelo às fibras, segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), onde foi feita a colagem manual de ripas e prensagem com uma prensa hidráulica, e, posteriormente, as ripas coladas foram cortadas conforme medidas determinadas em norma.

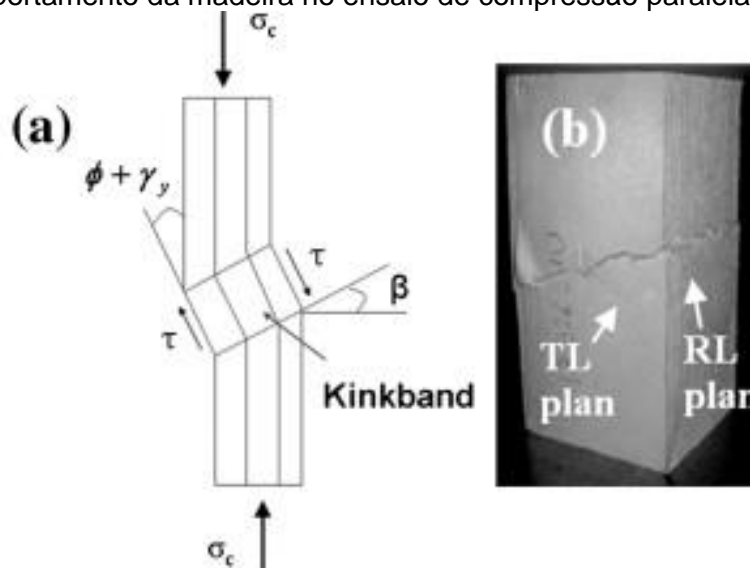
Matos e Molina (2016) avaliaram dois distintos modelos de corpo de prova e métodos de ensaios indicados pela norma brasileira (ABNT NBR 7190, 1997) e pela norma europeia, que também determina a resistência ao cisalhamento através do ensaio de flexão, com corpo de prova simétrico trabalhando como uma viga bi apoiada, tendo a carga concentrada no meio do vão. Os resultados encontrados no estudo mostraram valores de resistência maiores para a norma brasileira em comparação com a norma europeia, sendo a diferença menor (35%) para as madeiras de eucalipto em relação ao pinus (65%).

2.4.2.3 Compressão paralela às fibras

André, Kliger e Olsson (2013) expõem que o uso de madeira de menor qualidade no lado da compressão de um elemento de MLC aumenta sua ductilidade, sugerindo

assim um melhor conhecimento e entendimento do processo de falha da madeira sob carregamento de compressão. A Figura 15 é apresentada no estudo dos autores, demonstrando o modo de falha na madeira à compressão.

Figura 15 – Comportamento da madeira no ensaio de compressão paralela.



Fonte: (ANDRÉ *et al.*, 2013)

2.5 CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com base nos estudos apresentados neste capítulo, percebe-se que a investigação acerca da madeira de eucalipto clone COP 1404 é pertinente, visto que é uma madeira de rápido crescimento, e, por conta disso, pode apresentar características que podem limitar sua aplicação na construção civil. Entretanto, ao engenheirar a madeira, tais características podem ser superadas, de modo a viabilizar o emprego do produto (MLC).

Além disso, melhorar o produto com a inserção de outros materiais é relevante e oportuno, pois o mercado está sinalizando ampliação do uso da madeira como material estrutural. Ainda, a aderência e desempenho da colagem são influenciados pela estrutura anatômica da espécie, sendo proeminente a investigação do comportamento dos adesivos na superfície da madeira a ser estudada. Esses pontos apresentados tornam-se fatores de contribuição que embasaram proposta desse estudo, de modo a criar subsídios para expandir o conhecimento acerca das variáveis a serem investigadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, os equipamentos e os procedimentos metodológicos executados para a avaliação da aderência da fibra de carbono à madeira, bem como caracterizá-la.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Madeira

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

3.1.2 Adesivo

Para a montagem das peças de madeira lamelada colada (MLC) e colagem da fibra de carbono, foi utilizado o adesivo poliuretano bicomponente isocianato polimérico tipo MDI (IC 200 - componente A) e Polioli Bio para aglomerante de poliuretano (KDG1909 - componente B) fabricado pela Kehl Indústria e Comércio Ltda.

O adesivo foi utilizado para confecção de corpos de prova colados e corpos de prova colados com fibra de carbono, para testar o desempenho do poliuretano na colagem da fibra de carbono no lamelado de madeira.

3.1.3 Fibra de carbono

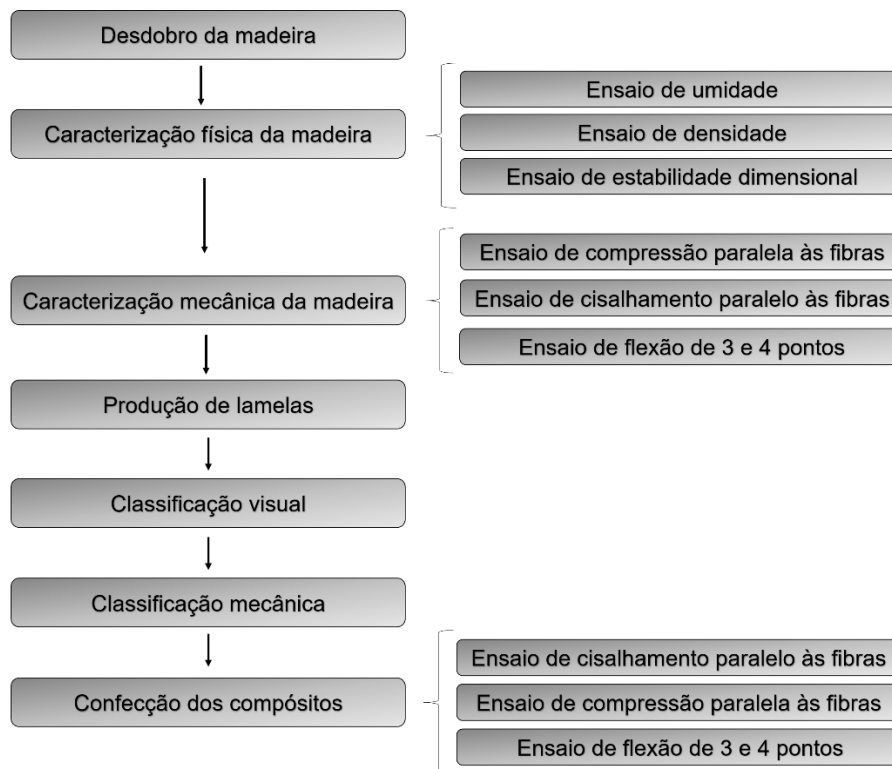
A fibra de carbono adotada nesta pesquisa foi em tecido bidirecional (CC – 0202), fabricado pela Fibertex, com a padronagem Sarja 2 x 2, 206 g/m², direção 90° trama/urdume, cuja largura é dada em 1,27 m. Foram consideradas as propriedades da fibra fornecidas pelo fabricante.

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental contemplado nesta pesquisa foi desenvolvido no Laboratório de Madeiras (LABMAD) e no Departamento de Ciência e Tecnologia de Materiais (DCTM), ambos da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA). O procedimento do programa experimental desse estudo está ilustrado na Figura 16, que lista as etapas metodológicas. Após a caracterização da espécie

escolhida, foram produzidos os corpos de prova em MLC, utilizando-se o adesivo de poliuretano a base de mamona.

Figura 16 - Fluxograma do programa experimental.



Fonte: Autora (2021).

3.2.1 Amostras e corpos de prova

Nesta subseção, as amostras e os corpos de prova empregados nos ensaios de caracterização física e mecânica, bem como nos ensaios da MLC são apresentados. Para caracterização física e mecânica da madeira in natura seguiu-se o documento 3 da ABNT NBR 7190 (2022).

Para os ensaios do lamelado colado, seguiu-se o documento 2 (NBR 7190-2: Projeto de Estruturas de madeira parte 2 – Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira.), o documento 3 (NBR 7190-3: Projeto de Estruturas de madeira parte 3 – Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas) e o documento 4 (NBR 7190-4 (2022): Projeto de Estruturas de madeira parte 4 – Caracterização de peças estruturais) da ABNT NBR 7190 (2022).

A fabricação das peças de MLC foi constituída de dois lotes de corpos de prova, sendo um lote feito apenas com adesivo e madeira (LSFC) e o outro lote com madeira,

adesivo e fibra de carbono (LCFC). O Quadro 2 apresenta os ensaios, seguidos das normas e quantidade de corpos de prova.

Quadro 2 – Quantidade de corpos de prova por ensaio.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	ENSAIOS	NORMA	QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA
MACIÇO	UMIDADE	NBR 7190-3 (2022)	42
	DENSIDADE		
	ESTABILIDADE DIMENSIONAL		
LAMELADO	DENSIDADE	NBR 7190-2 (2022)	36
CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	ENSAIOS	NORMA	QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA
MACIÇO	COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	NBR 7190-3 (2022)	15
	CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS	NBR 7190-3 (2022)	24
		NBR 7190-4 (2022)	6
	FLEXÃO DE 3 PONTOS	NBR 7190-3 (2022)	12
FLEXÃO DE 4 PONTOS	NBR 7190-4 (2022)	6	
LSFC	COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	NBR 7190-3 (2022)	15
	CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS	NBR 7190-3 (2022)	26
		NBR 7190-4 (2022)	14
	FLEXÃO DE 3 PONTOS	NBR 7190-3 (2022)	12
FLEXÃO DE 4 PONTOS	NBR 7190-4 (2022)	19	
LCFC	COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	NBR 7190-3 (2022)	7
	CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS	NBR 7190-3 (2022)	12
		NBR 7190-4 (2022)	13
	FLEXÃO DE 3 PONTOS	NBR 7190-3 (2022)	6
FLEXÃO DE 4 PONTOS	NBR 7190-4 (2022)	18	

Fonte: Autora (2022).

3.2.2 Condição-padrão de referência

A norma ABNT NBR 7190-1 (2022) considera a condição-padrão de referência definida pelo teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12%. A correção para essa umidade é considerada para o intervalo entre 10% e 25% de umidade. As expressões para as correções são apresentadas pelas Equação (3) e Equação (4).

$$f_{12} = f_U \left[1 + \frac{3(U-12)}{100} \right] \quad (3)$$

$$E_{12} = E_U \left[1 + \frac{2(U-12)}{100} \right] \quad (4)$$

Para o documento 4 da ABNT NBR 7190 (Projeto de estruturas de madeira – Parte 4: Método de ensaio para caracterização peças estruturais) o ajuste para

condições de ensaio padrão é em função do ensaio. Para amostras com um teor de umidade entre 10% e 20%, recomenda-se os percentuais de redução, diminuindo-se o valor da propriedade, para ganhos de teor de umidade.

Para a resistência à flexão nenhum ajuste deve ser feito, para os módulos de elasticidade longitudinal de transversal, deve-se reduzir 2% para cada ponto percentual de ganho de teor de umidade. Já para a resistência ao cisalhamento são considerados os procedimentos tecnicamente fundamentados nos ensaios de corpos de prova isentos de defeitos. Ou seja, deve-se utilizar a Equação (3) apresentada.

3.2.3 Determinação dos valores característicos de resistência

3.2.3.1 NBR 7190-3 (2022)

Os valores característicos foram determinados para as resistências à compressão paralela e ao cisalhamento paralelo às fibras da amostra de corpos de prova maciços, a fim de determinar a classe de resistência da madeira. Os resultados obtidos dos ensaios foram corrigidos para a condição padrão, obtendo-se a resistência característica através da Equação (5).

$$X_{wk} = \left(2 \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - X_{\frac{n}{2}} \right) \cdot 1,1 \quad (5)$$

Os resultados foram colocados em ordem crescente, de modo que se desprezou o valor mais alto, quando o número de corpos de prova foi ímpar, não se tomando para X_{wk} valor inferior a X_1 , nem a 0,7 do valor médio da amostra nem superior.

3.2.3.2 NBR 7190-4 (2022)

Os valores característicos (f_k) foram determinados para a densidade, cisalhamento paralelo às fibras e flexão de 4 pontos, conforme tratamento estatístico definido no documento 4 da ABNT NBR 7190-4 (2022), no qual os valores estão relacionados a uma estimativa do valor 5-percentil. As estimativas são tomadas como o limite inferior ($f_{data,0,05,inf}$), sendo uma estimativa com 25% de chance de ser maior do que o valor verdadeiro de 5-percentil da população de referência. Quando o valor característico é baseado em dados de uma única dimensão, então f_k é calculado pela Equação (6):

$$f_k = f_{data,0,05,inf} \quad (6)$$

3.2.4 Tratamento estatístico dos resultados

As análises estatísticas tiveram o objetivo de avaliar se as médias das resistências obtidas através dos ensaios do maciço, lamelado colado sem fibra de carbono (LSFC) e com fibra (LCFC), apresentavam diferenças significativas a um nível de significância de 5%. Inicialmente partiu-se da hipótese nula (H_0), cuja população possui distribuição normal, tal hipótese foi testada pelo teste de *Shapiro-Wilk*.

Em seguida, os dados obtidos foram tratados estatisticamente por meio da análise de variância ANOVA (fator único) que verificou se existiu diferença significativa de uma medida entre três ou mais grupos. Quando houve diferença de pelo menos um dos grupos, testes de comparações múltiplas precisaram ser feitos, e, nesse caso, foi aplicado o teste de *Tukey*. Os resultados deste teste foram representados pelas letras A, B e C junto às médias dos grupos, de modo a identificar os grupos que se diferiram.

Os resultados obtidos da madeira serrada foram comparados aos da madeira lamelada colada, como também aos da madeira lamelada colada com fibra de carbono.

3.3 DESDOBRO DA MADEIRA

A madeira adquirida para a realização da pesquisa foi em toras, de modo que foi necessário realizar o desdobro da madeira para a confecção dos corpos de prova para os ensaios propostos.

O desdobro foi realizado no Laboratório de Madeiras da Escola Politécnica da UFBA, utilizando-se equipamentos como: motosserra, plaina, desengrossadeira e serra de bancada. A Figura 17 apresenta o lote de madeira adquirida para a pesquisa.

Figura 17 – Toras de madeira de clone de *Eucalyptus urophylla* COP 1404.



Fonte: Autora (2021).

As toras possuíam 3,5 m de comprimento e diâmetro médio do topo da peça de 12 cm, assim, foram escolhidas aleatoriamente 13 toras para a caracterização física e mecânica do lote, de modo que as toras foram divididas ao meio, sendo deixada a parte mais grossa das toras para a confecção das lamelas e a parte mais fina para a caracterização do lote.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

De cada tora, foram retirados corpos de prova (CP's) com dimensões 2,0 cm x 3,0 cm x 5,0 cm, para os ensaios de caracterização física, conforme orienta o documento 3 da norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022). Ainda, foram retirados os corpos de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e flexão em três e quatro pontos.

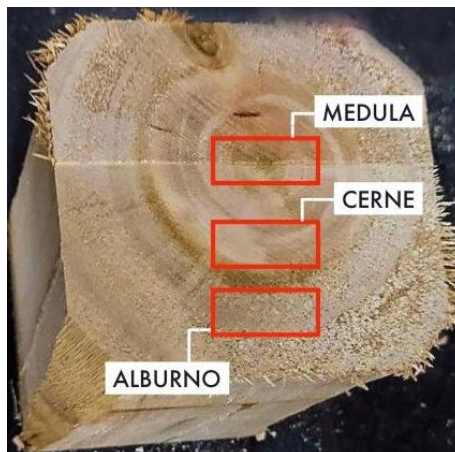
3.4.1 Caracterização física

Para a caracterização física da madeira foram feitos os ensaios de umidade, densidade e estabilidade dimensional. Os corpos de prova foram retirados do alburno, cerne e medula, a fim de observar as propriedades físicas nas três regiões do tronco. Os ensaios foram realizados conforme o documento 3 da ABNT NBR 7190 (2022).

A Figura 18 mostra a seção transversal de um tronco da madeira clone de *Eucalyptus urophylla* COP 1404 após o faceamento de seção circular para seção quadrada, com a posição de onde foram retirados os CP's. Observou-se nesta espécie que o

alburno se mostrou poroso e o cerne mais uniforme. A Figura 19 ilustra os CP's retirados das regiões do alburno, cerne e da medula.

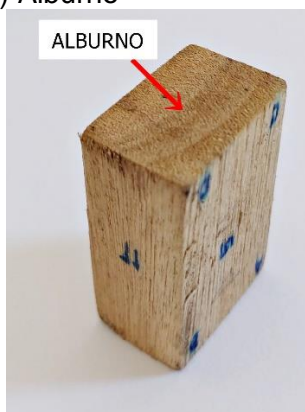
Figura 18 - Localização dos corpos de prova na seção transversal do tronco da madeira estudada



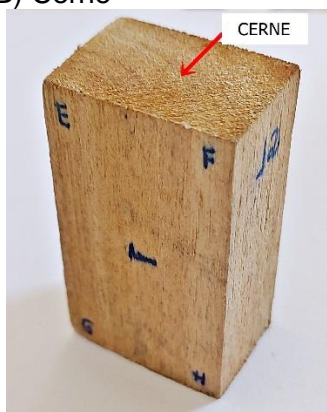
Fonte: Autora (2021).

Figura 19 - Corpos de prova retirados do alburno, cerne, medula.

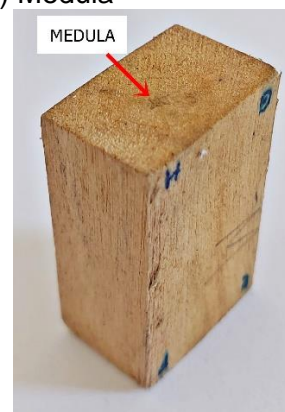
(A) Alburno



(B) Cerne



(C) Medula



Fonte: Autora (2021).

3.4.1.1 Umidade

Para determinar a umidade da madeira, os corpos de provas foram pesados, para obter a massa inicial (m_i) dos CP's, depois, foram colocados na câmara de secagem, com temperatura de $103 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$, tendo sua massa medida a cada 6 horas, até que a variação entre duas medidas consecutivas fosse menor ou igual a 0,5% em relação a última massa medida, sendo definida como massa seca (m_s). A umidade foi determinada por meio da Equação (7), onde m_i e m_s em gramas:

$$U (\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (7)$$

3.4.1.2 Densidade

Após a determinação da umidade, iniciou-se o processo do ensaio de densidade. Os corpos de prova foram submersos em água para a saturação, sendo medidos a cada 6 horas, até a medida da massa apresentar variação menor que 0,5% em relação à medida anterior, quando, então, mediu-se todos os lados (seção transversal e comprimento), e obteve-se o volume saturado.

De posse dos dados de massa seca (m_s), em quilogramas, e volume saturado (V_{SAT}), em metros cúbicos, determinou-se a densidade básica, segundo a Equação (8):

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{SAT}} \quad (8)$$

A determinação da densidade aparente foi definida pela razão entre a massa (m_{12}), em quilogramas, e o volume (V_{12}), em metros cúbicos, dos corpos de prova com teor de umidade de 12%, seguindo a Equação (9):

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (9)$$

3.4.1.3 Estabilidade dimensional

Para o ensaio de estabilidade dimensional, os corpos de prova foram colocados em ambiente saturado, com temperatura de 20 °C (± 5 °C), até a estabilização da variação dimensional ficar em torno da diferença de 0,02 mm entre duas medidas sucessivas. Em seguida, as distâncias entre os lados dos corpos de prova foram medidas com o paquímetro digital.

As deformações específicas de retração (ε_r) e inchamento (ε_i) foram determinadas para cada uma das direções, axial (ε_1), radial (ε_2) e tangencial (ε_3). Obteve-se as deformações a partir das medidas dos CP's secos e dos CP's saturados. As deformações específicas de retração (ε_r) foram determinadas para cada uma das direções, axial ($\varepsilon_{r,1}$), radial ($\varepsilon_{r,2}$) e tangencial ($\varepsilon_{r,3}$), conforme Equação (10), Equação (11) e Equação (12), respectivamente.

$$\varepsilon_{r,1} = \frac{L_{1,SAT} - L_{1,SECO}}{L_{1,SAT}} \times 100 \quad (10)$$

$$\varepsilon_{r,2} = \frac{L_{2,SAT} - L_{2,SECO}}{L_{2,SAT}} \times 100 \quad (11)$$

$$\varepsilon_{r,3} = \frac{L_{3,SAT} - L_{3,SECO}}{L_{3,SAT}} \times 100 \quad (12)$$

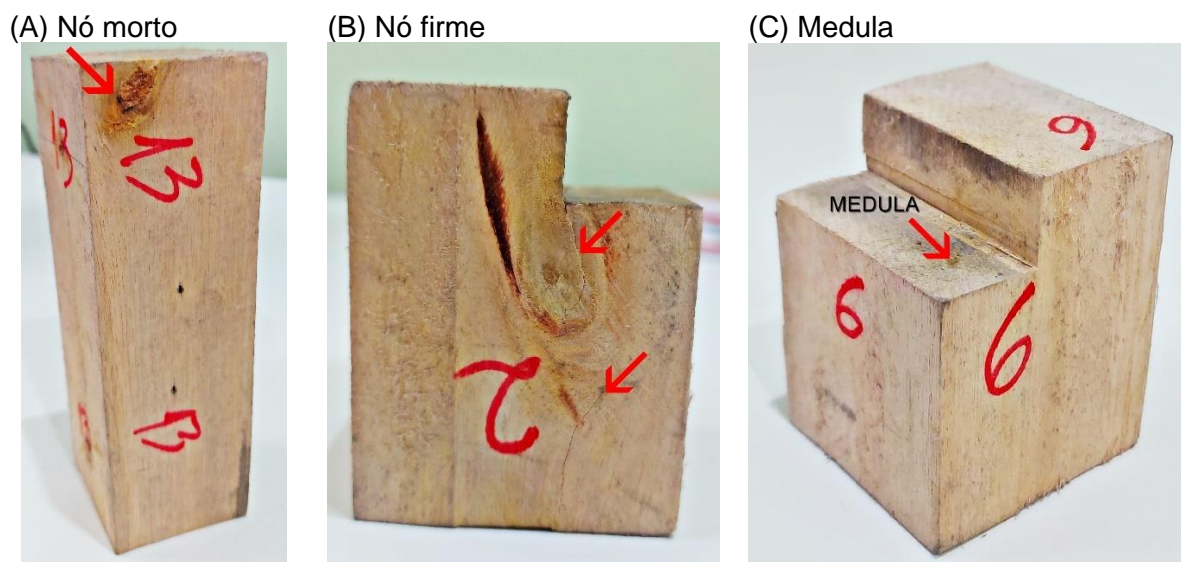
Sabe-se que a variabilidade dimensional da madeira no sentido longitudinal é pequena quando comparada aos sentidos tangencial e radial. Com isso, fez-se o uso da relação entre a variabilidade nas direções tangencial e radial, através do coeficiente de anisotropia.

3.4.2 Caracterização mecânica

Conforme o documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022), foram determinadas as propriedades: resistência à compressão paralela às fibras (f_{C0}), resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) e resistência a flexão estática (f_M) em três pontos e os módulos de flexão estática e de compressão paralela às fibras ($E_{C0,m}$, $E_{M,m}$).

A Figura 20 apresenta defeitos presentes em alguns corpos de prova, tais defeitos foram admitidos com o objetivo de simular uma situação real, nos termos do conhecimento de que o defeito se caracteriza como um ponto de ruptura.

Figura 20 – Defeitos presentes nos corpos de prova.



Fonte: Autora (2021).

Para a determinação das características mecânicas seguiu-se os procedimentos descritos no documento 3 NBR 7190 (ABNT, 2022). Os ensaios de caracterização

mecânica dos corpos de prova foram realizados em prensa eletro-hidráulica analógica, modelo WPM Alemã, cuja capacidade é de 30 toneladas.

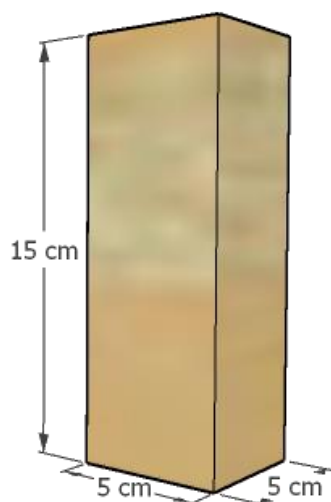
3.4.2.1 Ensaio de compressão paralela às fibras

O ensaio para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras foi realizado conforme o documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022), cujos corpos de prova têm as dimensões 5 cm x 5 cm x 15 cm. Determinou-se a resistência e rigidez da madeira, obtendo-se o módulo de elasticidade por meio da aplicação de carga no corpo de prova e leitura da deformação feita através de dois relógios comparadores.

A Figura 21(A) apresenta o desenho do corpo de prova à compressão paralela às fibras. A Figura 21(B) apresenta um corpo de prova durante a realização do ensaio com os relógios comparadores.

Figura 21 – Corpos de prova de compressão paralela às fibras.

(A) Corpo de prova e suas dimensões



(B) Corpo de prova sendo ensaiado



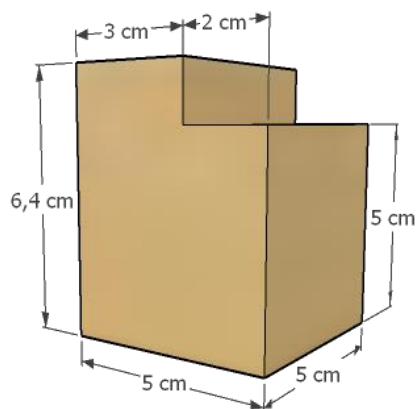
Fonte: NBR 7190-3 (ABNT, 2022).

3.4.2.2 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

O ensaio para a determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras foi realizado conforme o documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022), cujo corpo de prova está ilustrado na Figura 22(A).

Figura 22 – Corpos de prova de cisalhamento paralelo às fibras.

(A) Corpo de prova e suas dimensões



(B) Corpo de prova sendo ensaiado



Fonte: NBR 7190-3 (2022).

O ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira sólida foi referência para os demais estudos de cisalhamento feitos com madeira lamelada colada e madeira lamelada colada com fibra de carbono.

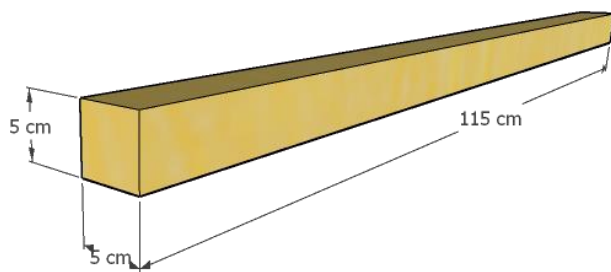
3.4.2.3 Ensaio de flexão estática de três pontos

Para realização desse ensaio utilizou-se corpos de prova estipulados pelo documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022), conforme mostra a Figura 23(A). Nesse ensaio, determinou-se a resistência e rigidez da madeira à flexão simples. A resistência foi obtida pela máxima tensão atuante no corpo de prova e a rigidez foi alcançada pelo módulo de elasticidade no trecho linear a 50% e 10% da carga máxima.

Vinculou-se o corpo de prova a dois apoios articulados móveis, cujo vão livre seguiu a relação de 21 vezes a altura, sendo assim o vão livre adotado foi de 1,05 m conforme estabelecido pela NBR 7190-3 (ABNT, 2022). A Figura 23(B) apresenta um corpo de prova durante a realização do ensaio.

Figura 23 – Corpo de prova de flexão.

(A) Corpo de prova e suas dimensões



(B) Corpo de prova sendo ensaiado.



Fonte: NBR 7190-3 (ABNT, 2022).

3.5 PRODUÇÃO E SECAGEM DE LAMELAS

A produção das lamelas foi feita a partir das toras, após o período de secagem inicial de 4 meses, em que as 32 toras de madeira ficaram secando na posição vertical dentro da carpintaria do LABMAD. Após esse tempo, foram escolhidas aleatoriamente 13 toras para fazer a caracterização física e mecânica do lote. Essas toras foram divididas em dois segmentos.

O segmento do meio para o topo da tora, seção transversal em torno de 12 cm na extremidade menor. Ele foi reservado para os ensaios de caracterização física e mecânica da madeira. O segmento do meio até a base da tora, cuja seção de base era em torno de 15 cm, foi reservado para a produção de lamelas. Após a produção das lamelas, elas foram submetidas primeiramente à secagem ao ar, e posteriormente à secagem forçada.

3.5.1 Desdobro

O processo do desdobro destes segmentos iniciou-se com o faceamento das toras de seção circular para obter a seção quadrada. Em seguida, as peças faceadas em seção quadrada de aproximadamente 10 cm x 10 cm foram desdobradas por meio de serra circular para obter as espessuras de 3,5 cm, 2,5 cm e 2,0 cm. Essas espessuras foram ajustadas para 3,0 cm, 2,0 cm e 1,5 cm, depois que as lamelas passaram pelo processo de secagem forçada.

Cortaram-se as peças com meio centímetro a mais, devido a irregularidades decorrentes do desdobro, para que elas pudessem ser aparelhadas, para se obter a seção planejada.

A Figura 24(A) apresenta o equipamento empregado (desengrossadeira) na primeira etapa de produção das lamelas, ou seja, produzir uma seção quadrada a partir de uma seção circular. A Figura 24(B) apresenta a serra circular empregada para serrar as peças de seção quadrada em lamelas.

Figura 24 – Processo de produção das lamelas.

(A) – Desengrossadeira para ajuste de seção circular para seção quadrada.



(B) – Serra circular para desdobro da peça de seção quadrada em lamelas.



Fonte: Autora (2021).

3.5.2 Secagem

Após o desdobro do clone *Eucalyptus urophylla COP 1404*, as lamelas foram submetidas a secagem ao ar em ambiente protegido dos raios solares diretos e do vento natural. As lamelas ficaram expostas ao ar do laboratório de madeiras com temperatura média de 25,5 °C. A Figura 25 mostra as lamelas entabicadas para secagem ao ar no Laboratório de Madeiras da UFBA.

Figura 25 – Disposição das lamelas entablicadas para secagem ao ar.

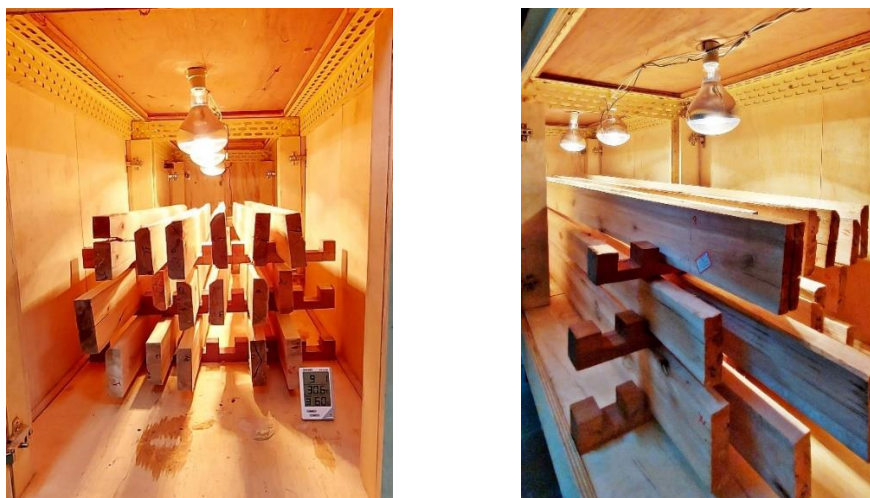


Fonte: Autora (2021).

As lamelas de 3,5 cm de espessura foram submetidas à secagem forçada, e apresentaram decréscimo de 42,12%, saindo da umidade de 28,57% para a umidade de 16,53%, no período de 90 dias. Já as lamelas de 2,5 cm de espessura foram submetidas apenas à secagem ao ar, e apresentaram um decréscimo de 23,28%, possuindo inicialmente uma umidade média de 28,57% e, após o período de 90 dias, apresentaram umidade de 21,92%.

No procedimento de secagem forçada, as lamelas foram acondicionadas em uma câmara de 65 cm de largura com 81 cm de altura, com 248 cm de comprimento. Para o aquecimento da madeira empregou-se 3 lâmpadas de 250 watts, as quais elevaram a temperatura a 45 °C, empregou-se também um ventilador da marca Mondial com velocidade média de 1,97 metro por segundo. A Figura 26 ilustra a câmara de secagem.

Figura 26 – Câmara de secagem.



Fonte: Autora (2021).

O procedimento de secagem forçada ocorreu durante o dia, alternando ciclos de aquecimento e ventilação com duração de uma hora, durante 10 horas (das 08 h até as 18 h), sem o umedecimento das lamelas. Após esse período, as lamelas ficaram submetidas à secagem ao ar por 14 horas, reiniciando no dia seguinte a secagem forçada por 10 horas.

Utilizou-se esse processo de secagem para alcançar a umidade ideal para a colagem das lamelas, visto que o período em que ocorreu o processo de secagem da madeira foi chuvoso, fazendo com que a madeira não chegasse ao teor necessário para a colagem, em torno de 15% a 18%.

Para acompanhar a secagem das lamelas, utilizou-se o medidor de umidade por contato modelo DUC 2050 Digisystem.

3.5.3 Planejamento das lamelas

O comprimento das lamelas foi determinado visando melhor aproveitamento, uma vez que depois de serradas as toras, algumas lamelas apresentaram rachaduras nas extremidades. Diante desse fato, as lamelas apresentaram comprimentos de 1,70 m, 1,60 m, e 1,50 m.

Portanto, o planejamento das peças lameladas coladas levou em consideração a combinação de peças de 2 cm e 3 cm de espessura com mesmo comprimento para fazer as peças, de modo que a seção transversal dos elementos de MLC ficassem com 5 cm de espessura e largura em torno de 6 cm. A partir desses elementos

obtiveram-se os corpos de provas de seção transversal de 5 cm x 5 cm e comprimento recomendado pelo documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022), conforme os ensaios realizados nesta pesquisa.

3.6 CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA

3.6.1 ABNT NBR 7190 – 3

A madeira da espécie clone *Eucalyptus urophylla* COP 1404 foi classificada através de corpos de prova, conforme o documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022), por meio da resistência característica à compressão paralela ($f_{c0,k}$). O documento descreve procedimentos para corpos de prova isentos de defeitos de madeira de florestas nativas. Todavia, tais procedimentos foram considerados para madeira de florestas plantadas e com defeitos, com o objetivo de caracterizar a madeira e simular uma situação real de uso, admitindo-se os defeitos.

3.6.2 ABNT NBR 7190 – 1

A classificação da madeira do clone *Eucalyptus urophylla* COP 1404 também foi feita através de peças estruturais, cuja orientação é que para lote homogêneo (coeficiente de variação da resistência à flexão for inferior a 20%) deve ser extraída amostra constituída de peças estruturais ensaiadas de acordo com o documento 4 da ABNT NBR 7190-4 (2022) que classifica a madeira a partir da resistência característica à flexão ($f_{m,k}$).

Entretanto, quando não se pode garantir a homogeneidade do lote, as propriedades de resistência e rigidez são impostas a cada peça estrutural, conforme o documento 2 da ABNT NBR 7190-2 (2022).

Sendo assim, classificou-se cada peça visual e mecanicamente (ABNT NBR 7190-2, 2022), foram obtidos o MOE médio e a densidade, assim como selecionou-se uma pequena amostra que foi submetida ao ensaio de flexão e cisalhamento (ABNT NBR 7190-4, 2022), com o objetivo de comparar as classificações e verificar a homogeneidade do lote.

3.6.2.1 Resistência à flexão de 4 pontos

O ensaio de resistência à flexão foi realizado conforme ABNT NBR 7190-4 (2022), cuja viga atendeu o vão de 18 h, recebendo carregamento em dois pontos. O

módulo de elasticidade (E_0) foi determinado medindo-se o deslocamento vertical no ponto central da superfície inferior da viga em relação aos apoios. A força F foi aplicada até a ruptura. A Figura 27 apresenta a configuração do ensaio. Os corpos de prova tiveram seção transversal de 5 cm x 5 cm e comprimento 100 cm.

Figura 27 – Configuração do ensaio de flexão de 4 pontos.



Fonte: Autora (2022).

Para avaliar o módulo de elasticidade na flexão (E_0), o deslocamento incremental (Δe) associado a uma força incremental (ΔF) foi considerado no trecho elástico-linear do gráfico força x deslocamento, cujo intervalo de 10% a 40% da força máxima foi usado para determinar $\Delta F / \Delta e$. O módulo de elasticidade na flexão foi calculado pela Equação 13.

$$E_0 = \frac{23}{108} \left(\frac{L}{h}\right)^3 \left(\frac{\Delta F}{\Delta e}\right) \frac{1}{b} \quad (13)$$

A resistência convencional à flexão (f_m) foi dada pela Equação (14).

$$f_m = \frac{F_{rupt} L}{bh^2} \quad (14)$$

Onde:

F_{rupt} é o valor da força de ruptura (N);

L é o vão livre entre os apoios (mm);

b é a largura da seção transversal do corpo de prova (mm);

h é a altura da seção transversal do corpo de prova (mm).

3.6.2.2 Classificação visual

A classificação visual das lamelas foi feita com base nos critérios da ABNT NBR 7190-2 (2022), tal qual foram avaliados os defeitos referentes à presença de medula, tamanho de nós, fissuras passantes e não passantes e distorções dimensionais (arqueamento, encurvamento e torcimento).

Conduziu-se a inspeção visual das duas faces (largura de 6 cm) de cada peça, qualificando e quantificando os defeitos presentes ao longo do comprimento da peça, atribuindo uma classe visual. Conforme os defeitos presentes e sua intensidade, classificou-se visualmente a peça como Classe 1, Classe 2 ou Classe 3, sendo as peças de Classe 1 de melhor qualidade e as peças Classe 3 consideradas de qualidade inferior. A classificação baseou-se na Tabela A.4 (Figura 28), Tabela A.5 (Figura 29) e Tabela A.6 (Figura 30), presentes no Anexo A da ABNT NBR 7190-2 (2022).

Figura 28- Classificação visual das classes para *E. urophylla* e *E. grandis* (urograndis).

Defeito	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	Não se admite		
Nós na face	$\leq 1/5$	$\leq 1/3$	$\leq 1/2$
Nós na borda	$\leq 1/5$	$\leq 1/3$	$\leq 1/2$
Inclinação das fibras (mm/mm)	1:12	1:9	1:6
Fissuras não passantes (m)	O comprimento das fissuras não pode ser maior que 1,0 m e nem $\frac{1}{4}$ do comprimento da peça		
Fissuras passantes (m)	Somente se permitem as fissuras passantes nos extremos e o comprimento não pode ser maior do que a largura da peça		
Encurvamento (mm)	Menor que 8 mm para cada 3 m de comprimento		
Arqueamento	Menor que 3 mm para cada 2 m de comprimento		
Torcimento (mm/m)	Menor que 5 mm para cada 1 m de comprimento		
Encanoamento (mm)	Sem restrições		
Esmoadado (mm/mm)	Transversalmente menor que $\frac{1}{4}$ da espessura ou largura da peça Sem restrições para o comprimento		

Fonte: (ABNT NBR 7190-2, 2022).

Apesar da Tabela A.4 da norma não admitir presença de medula, ela foi admitida nessa classificação visual, visto que o diâmetro (15 cm) das toras usadas era pequeno. O fato de não admitir medula tornaria o descarte maior que o aproveitamento.

Figura 29 – Classificação mecânica das classes para *E. urophylla* e *E. grandis* (urograndis)

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Densidade (kg/m ³)	≥ 700	≥ 600	≥ 500
E ₀ (MPa)	$\geq 14\ 000$	$\geq 13\ 000$	$\geq 11\ 000$

Fonte: (ABNT NBR 7190-2, 2022).

Figura 30 – Propriedades das classes para *E. urophylla* e *E. grandis* (urograndis)

Propriedade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Densidade ρ_{12} (kg/m ³)	700	600	500
Módulo de elasticidade médio E_{med} (MPa)	14 000	13 000	11 000
Resistência característica à flexão $f_{m,k}$ (MPa)	50	40	30
Resistência característica à compressão paralela $f_{c0,k}$	35	30	25
Resistência característica ao cisalhamento $f_{v,k}$ (MPa)	4	4	4

NOTA Adotar a menor das classes atribuída nas classificações visual e mecânica.

Fonte: (ABNT NBR 7190-2, 2022).

A Figura 31 expõe o gabarito que foi confeccionado para a medição do tamanho dos nós e os exemplos de lamelas classificadas conforme tamanho dos nós. A medição das distorções dimensionais é ilustrada na Figura 32.

Figura 31 – Gabarito e lamelas classificadas.



Fonte: Autora (2021).

Figura 32 – Medição das distorções dimensionais.

(A) Medição do arqueamento

(B) Medição do encurvamento

(C) Medição do torcimento



Fonte: Autora (2021).

Diante da inspeção realizada em cada face das peças, o critério de classificação visual basicamente ficou definido em função do tamanho dos nós, uma vez que os demais critérios como fissuras passantes e não passantes só ocorreram nas extremidades das peças e essas foram retiradas posteriormente; distorções dimensionais, como arqueamento, encurvamento e torcimento ocorreram em algumas peças (8 peças), porém dentro dos limites estabelecidos em norma.

3.6.2.3 Classificação pelo módulo de elasticidade

A classificação mecânica seguiu os critérios do método de ensaio referente à ABNT NBR 7190-2 (2022), cuja classificação se deu através do ensaio de flexão estática a 3 pontos. Sendo assim, determinou-se o módulo de elasticidade das lamelas através desse ensaio. A classificação foi realizada a partir da avaliação do módulo de elasticidade (E_0) e densidade aparente da madeira de cada peça.

O módulo de elasticidade foi obtido por meio do ensaio não destrutivo de flexão, no regime elástico-linear do diagrama força x deslocamento, no intervalo de 10% a 40% da força máxima. A Figura 33 apresenta o ensaio. As lamelas foram testadas com um vão livre de 36 cm para as lamelas de 2 cm e 54 cm para as lamelas de 3 cm. O lote utilizado para a classificação seguiu a recomendação da norma que descreve a escolha aleatória de 12 tábuas.

Figura 33 – Ensaio de flexão a três pontos para classificação mecânica.



Fonte: Autora (2021).

O módulo de elasticidade à flexão (E_0) foi calculado através da Equação (1) já apresentada.

3.6.2.4 Densidade

A densidade foi obtida através do comprimento total e seção transversal de cada peça, após aplainamento, assim como da massa (m) e do teor de umidade (U). A densidade foi calculada conforme Equação (15):

$$\rho_{test} = \frac{m \times 10^9}{L \cdot b \cdot h} \quad (15)$$

Onde:

L é comprimento total da peça;

b é a largura da peça;

h é a altura da peça.

Para a correção da umidade para 12%, foi utilizada a Equação (16):

$$\rho_{12} = \rho_{test}(1 - 0,5(U - 0,12)) \quad (16)$$

Onde:

U é o teor de umidade no momento do ensaio.

O teor de umidade foi obtido por meio do medidor elétrico, cujas medições foram feitas em três locais ao longo de cada peça. A umidade U foi a média das três leituras.

3.6.2.5 *Cisalhamento paralelo às fibras*

O ensaio de cisalhamento paralelo às fibras foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7190-4 (2022), cuja seção transversal foi de 5 cm x 5 cm, com comprimento de 40 cm. A resistência ao cisalhamento (f_v) foi calculada através da Equação (17):

$$f_v = \frac{0,75F_{rup}}{bh} \quad (17)$$

Onde:

F_{rup} é a força de ruptura;

b é a largura da seção transversal;

h é a altura da seção transversal.

3.7 CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS

Foram confeccionados dois tipos de vigas lameladas coladas: lamelado colado sem fibra carbono (LSFC) e o lamelado colado com fibra carbono (LCFC). Para isso, foi empregado o adesivo poliuretano bicomponente: IC 200 (Componente A) e KDG 1909 (Componente B), tanto para a colagem das lamelas quanto para a colagem da fibra de carbono.

Os dois tipos de vigas foram compostos por duas lamelas, sendo uma de 2 cm e outra de 3 cm. Tal estrutura foi estabelecida em função das dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, definido no documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022), fato justificado pelo alinhamento ao objetivo desta pesquisa que consiste na avaliação da aderência da fibra de carbono à madeira clonal COP 1404. Por isso, foram fabricadas peças de MLC com apenas 2 lamelas. Essa situação não favoreceu a disposição das lamelas na seção transversal em função do seu módulo de elasticidade.

3.7.1 Fabricação das peças de MLC

Para a fabricação da madeira lamelada colada foram levados em consideração aspectos preparatórios da madeira e parâmetros de colagem e prensagem. Tais parâmetros empregados nesta pesquisa são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros para a produção da MLC

1	TEOR DE UMIDADE	15%
2	TIPO DE ADESIVO	POLIURETANO
3	QUANTIDADE DE ADESIVO	225 g/m ²
4	PROPORÇÃO DE MISTURA	2:1
5	PRESSÃO DE COLAGEM	0,7 MPa
6	TEMPO DE PRENSAGEM	18 h
7	TEMPO DE CURA	MÍN. 8 dias

Fonte: Autora (2022).

Durante todo o período de secagem, o decréscimo a umidade das lamelas foi acompanhado por meio do medidor de umidade, e, quando atingiram a faixa de umidade adequada para colagem (em torno de 15%), foram reservadas para serem aplainadas. Esse processo foi feito 24 horas antes da colagem para obter a espessura final de 3 cm e de 2 cm (Figura 34).

Figura 34 – Máquina de desengrosso para aplainamento das lamelas.



Fonte: Autora (2021).

3.7.1.1 Colagem do lamelado sem fibra de carbono

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

Sendo assim, primeiramente foi feita a limpeza das lamelas para a aplicação do adesivo, o qual foi aplicado nas faces das lamelas de 2 cm e de 3 cm que ficaram em contato, seguindo-se do posicionamento das duas lamelas para formar a peça sem fibra carbono (LSFC). Foi utilizada uma fita adesiva para unir as peças e auxiliar no posicionamento na prensa. A Figura 35 ilustra as etapas.

Figura 35 – Processo de colagem de lamelas sem fibra de carbono (LSFC)

(A) Limpeza das lamelas (B) Aplicação do adesivo (C) Fixação com fita adesiva



Fonte: Autora (2021).

3.7.1.2 Colagem do lamelado com fibra de carbono

Para a colagem das peças lameladas com fibra de carbono (LCFC), inicialmente foi feita a limpeza das lamelas para a aplicação do adesivo, aplicou-se o adesivo sobre a superfície limpa da lamela. Em seguida, colocou-se a fibra carbono e, utilizou-se um rolo para desaeração, de modo que a fibra foi pressionada contra o adesivo para a expulsão de possíveis bolhas de ar.

Após esta etapa, aplicou-se uma nova camada do adesivo sobre a fibra de carbono. Na lamela que foi colocada sobre a fibra de carbono também foi aplicado o adesivo, para em seguida fazer a união das duas lamelas, cada aplicação de adesivo

seguiu a gramatura de 225 g/m². A Figura 36 ilustra o processo de colagem da peça de MLC com fibra de carbono.

Figura 36 – Sequência de aplicação do adesivo na fibra de carbono da MLC.

(A) Aplicação do adesivo



(B) Colagem da fibra de carbono



(C) Retirada de bolhas de ar



(D) Aplicação da 2ª camada de adesivo



Fonte: Autora (2021).

Depois da colagem, as peças foram prensadas por meio de uma prensa manual, com quatro pontos de aplicação de pressão, utilizando-se um torquímetro, cujo torque foi de 88,2 N.m, para produzir a pressão de 0,7 MPa. A Figura 37 ilustra o processo de prensagem.

Figura 37 – Processo de prensagem

(A) Peças posicionadas na prensa



(B) Aplicação do torque



(C) Peças sendo prensadas



Fonte: Autora (2021).

Após o tempo da prensagem, as peças foram ajustadas na serra circular. Em seguida, fez-se os cortes dos corpos de prova referentes a cada ensaio.

Primeiramente, foi realizada uma investigação acerca da aderência da fibra à madeira. Esta verificação foi executada através de ensaios de cisalhamento, comparando a resistência ao cisalhamento da madeira sólida com a da madeira lamelada colada sem fibra carbono e madeira lamelada colada com fibra de carbono.

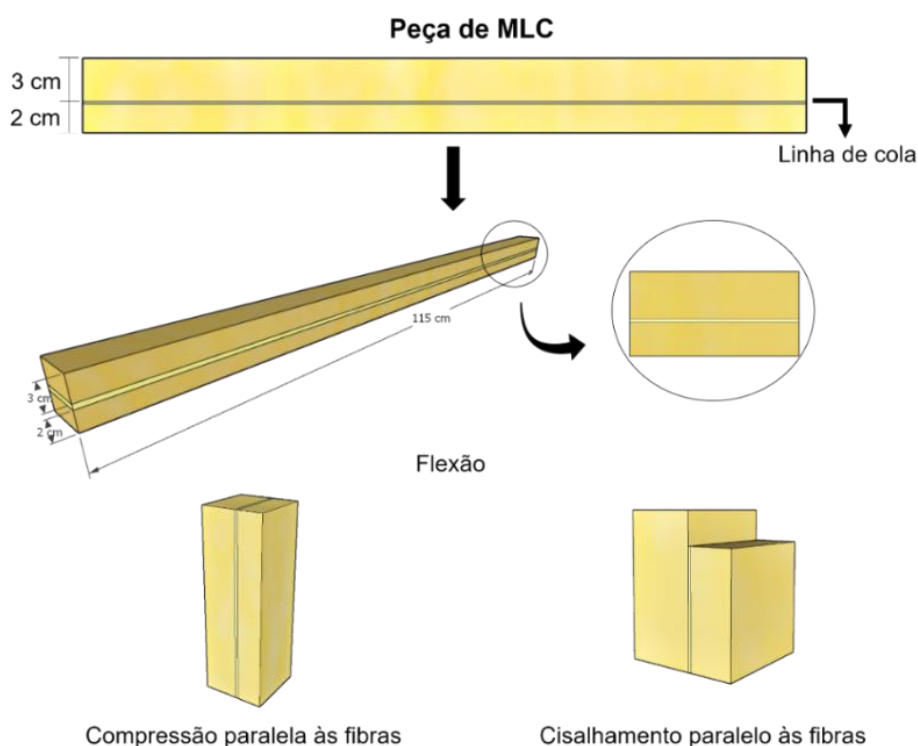
3.8 ENSAIOS DA MADEIRA LAMELADA COLADA

3.8.1 Extração dos corpos de prova

3.8.1.1 Lamelado colado sem fibra carbono

A Figura 38 ilustra a peça de MLC, demonstrando a forma de obtenção dos corpos de prova para os ensaios de flexão (retirados do centro da peça), cisalhamento e compressão paralela, (retirados das extremidades da peça). O comprimento das peças em que os corpos de prova foram retirados variou, conforme o melhor aproveitamento das lamelas, tendo comprimentos de 1,70 m, 1,60 m e 1,50 m.

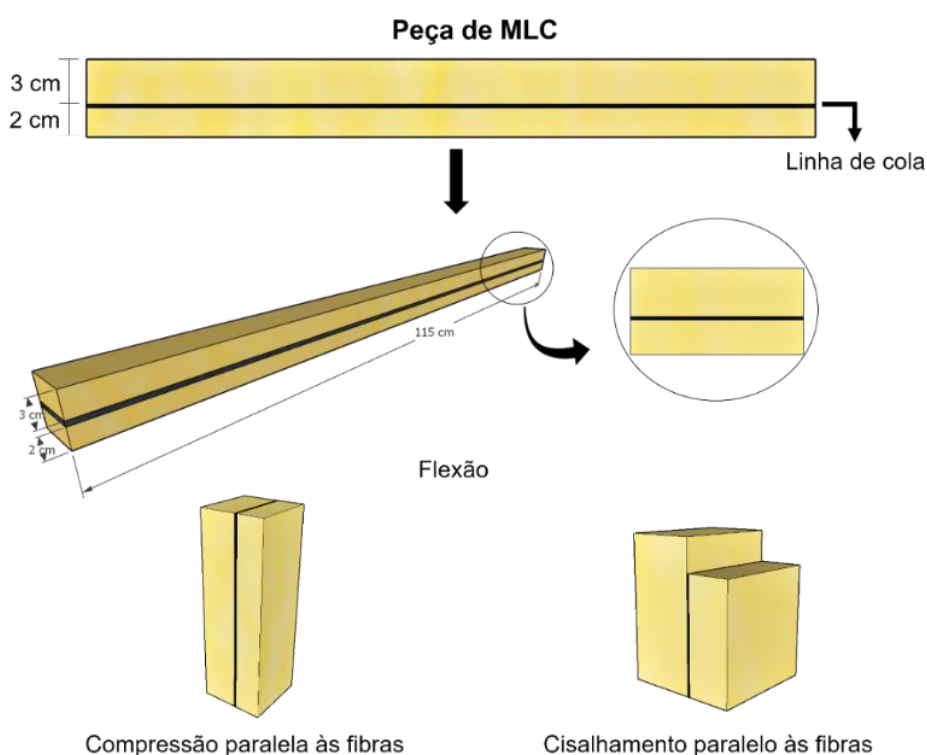
Figura 38 – Peça de MLC sem fibra carbono de seção 5 cm x 5 cm para extração de corpos de prova e seus respectivos comprimentos: flexão de 115 cm, compressão paralela às fibras 15 cm e cisalhamento de 6,4 cm.



3.8.1.2 Lamelado colado com fibra carbono

A fibra carbono ficou disposta entre as duas lamelas com espessuras de 3 cm e de 2 cm, as quais foram coladas para formar espessura de 5 cm. A Figura 39 ilustra a peça de MLC com a fibra carbono.

Figura 39 – Peça de MLC com fibra carbono de seção 5 cm x 5 cm para extração de corpos de prova e seus respectivos comprimentos: flexão de 115 cm, compressão paralela às fibras 15 cm e cisalhamento de 6,4cm.

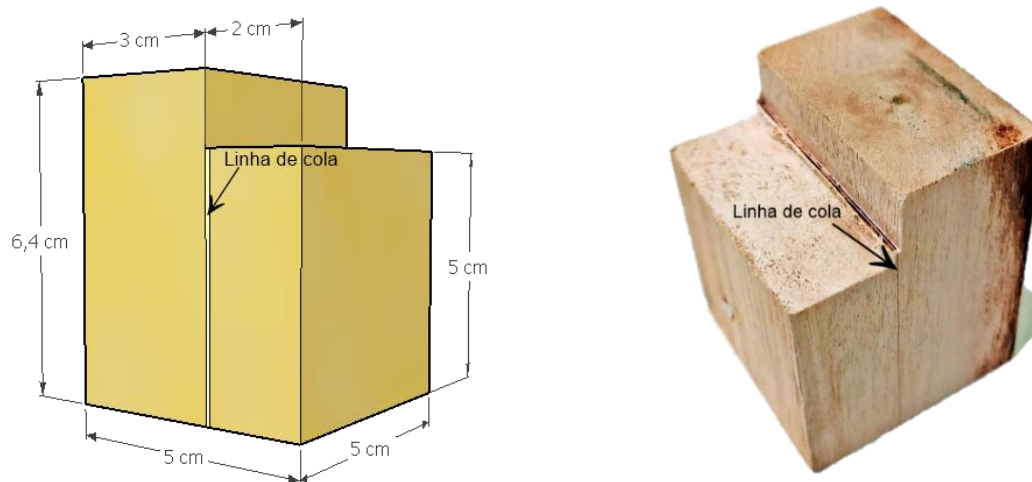


Fonte: Autora (2021).

3.8.2 Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola

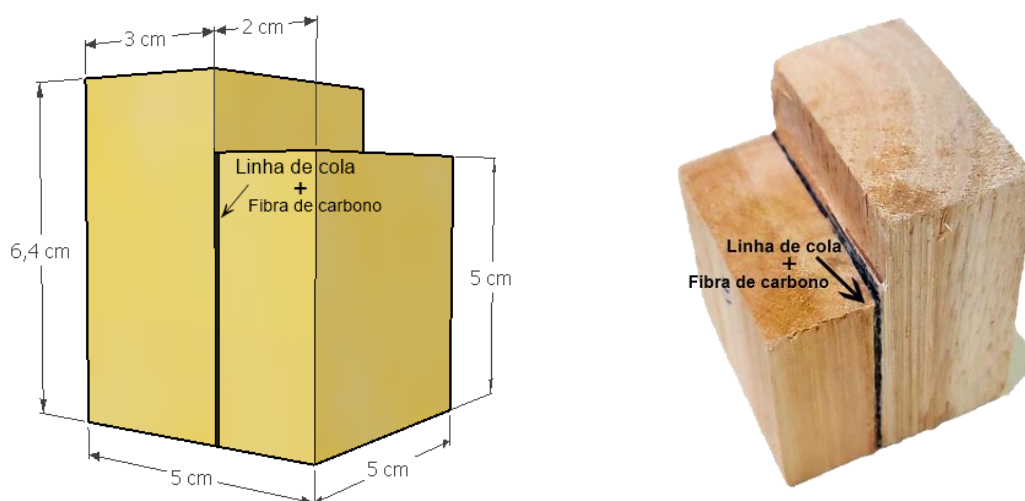
O ensaio de cisalhamento seguiu orientações do documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022) sendo realizado de acordo com o mesmo procedimento de ensaio de cisalhamento para madeira maciça, com corpos de prova de mesmas dimensões indicadas nessa norma. As Figuras 40 e 41 mostram as configurações do corpo de prova.

Figura 40 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento – LSFC.



Fonte: Autora (2021).

Figura 41 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento – LCFC.



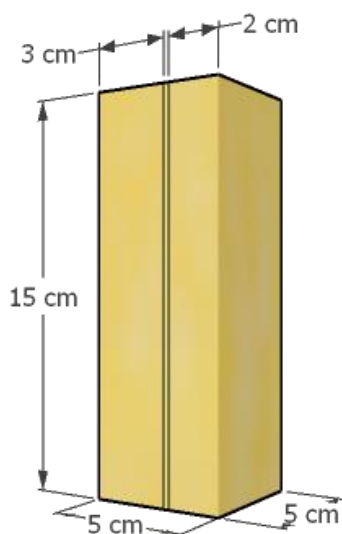
Fonte: Autora (2021).

3.8.3 Ensaio de compressão paralela às fibras

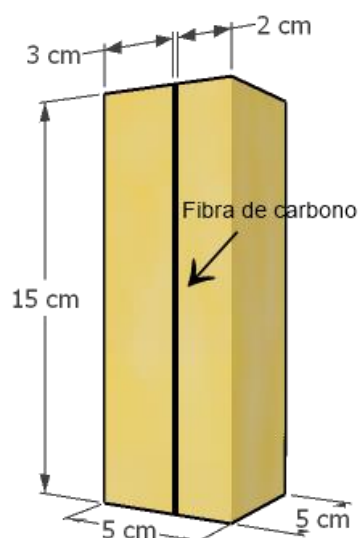
O ensaio de compressão paralela às fibras foi realizado conforme orientações do documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022), cujo objetivo foi determinar a resistência e a rigidez da madeira através do ensaio destrutivo. Para isso, foram retirados corpos de prova de peças de madeira lamelada colada, com dimensões previstas em norma. A configuração dos CP's está apresentada na Figura 42, sendo o primeiro (A) sem fibra carbono e o segundo (B) com fibra carbono.

Figura 42 – Corpos de prova lamelado para o ensaio de compressão paralela às fibras

(A) Lamelado sem fibra carbono



(B) Lamelado com fibra carbono



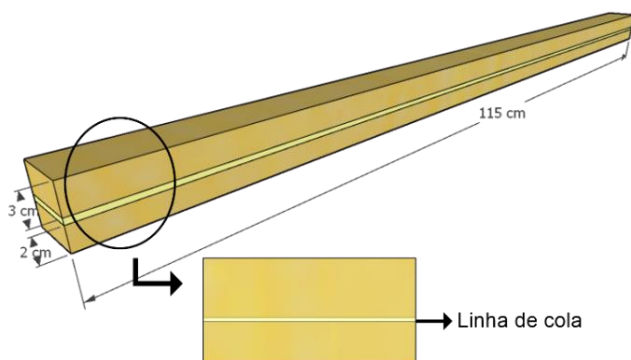
Fonte: Autora (2021).

3.8.4 Ensaio de flexão estática de 3 pontos

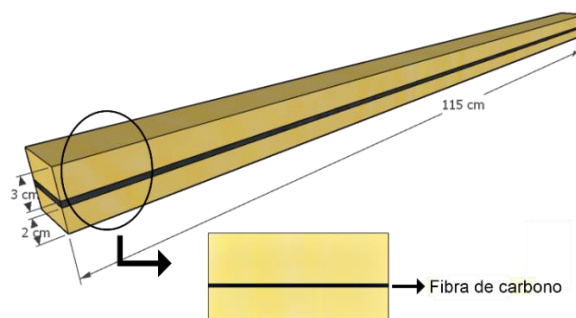
Este ensaio seguiu o mesmo procedimento adotado para o ensaio de flexão feito com madeira maciça. Todavia, o corpo de prova LSFC e LCFC, a linha de cola e a fibra de carbono ficaram localizados abaixo da linha neutra dos corpos de prova. Foram determinadas a resistência e rigidez do lamelado colado, conforme procedimentos do documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022). A Figura 43 expõe as configurações dos corpos de prova, cuja seção transversal é de 5cm x 5cm.

Figura 43 - Corpos de prova lamelado para o ensaio de flexão estática

(A) Lamelado sem fibra carbono.



(B) Lamelado com fibra carbono.



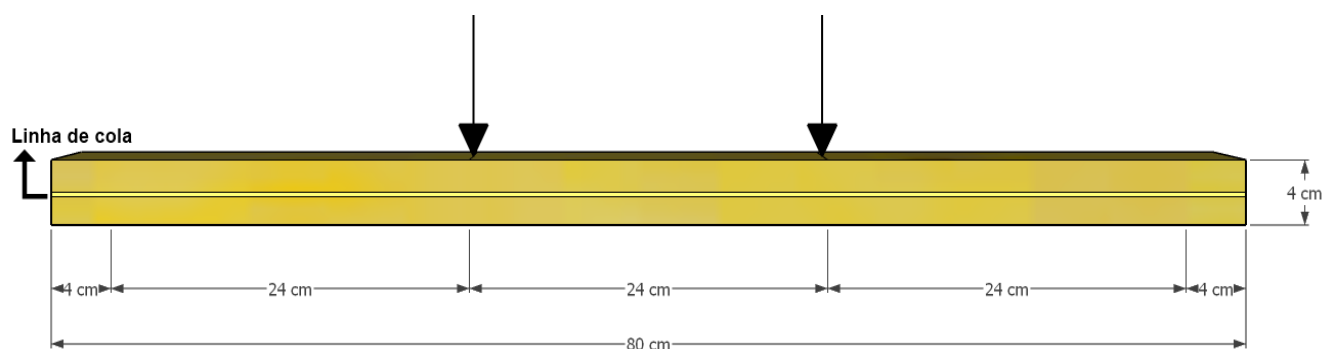
Fonte: Autora (2021).

3.8.5 Ensaio de flexão de 4 pontos

Este ensaio seguiu procedimentos do documento 4 da norma ABNT NBR 7190 (2022), com vão livre de 18 h e carregamento em dois pontos. Os corpos de prova foram de seção de 4 cm x 4 cm e seção 5 cm x 5 cm, com vãos de 72 cm e 90 cm, respectivamente, as Figuras 44 e 45 ilustram tais configurações dos CP's.

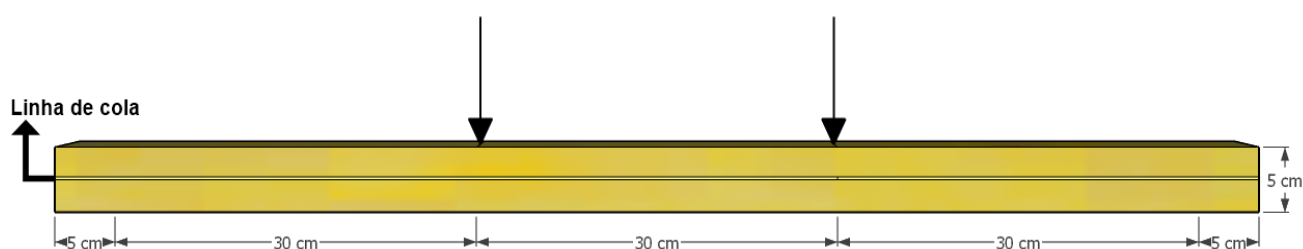
As duas seções transversais englobaram o lamelado colado (LCSF) e lamelado colado com fibra de carbono (LCFC). O lamelado colado foi composto por duas lamelas de espessuras iguais, para a seção de 4 cm x 4 cm, duas lamelas de 2 cm, e para a seção de 5 cm x 5 cm, duas lamelas de 2,5 cm.

Figura 44 – Corpo de prova para ensaio de flexão a 4 pontos com seção de 4 cm x 4 cm.



Fonte: Autora (2021).

Figura 45 – Corpo de prova para ensaio de flexão a 4 pontos com seção de 5 cm x 5 cm.



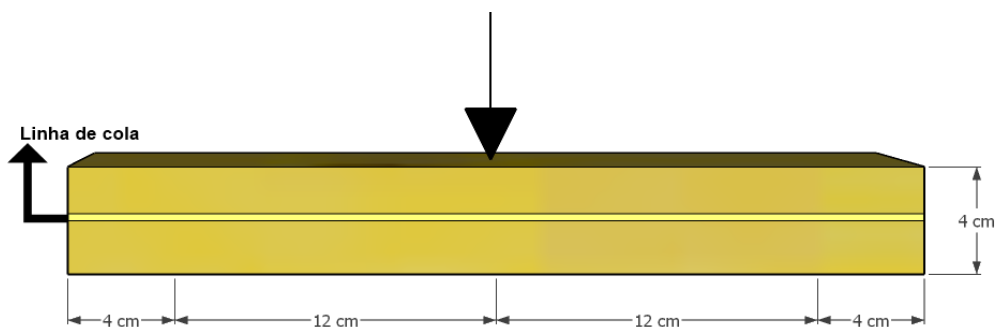
Fonte: Autora (2021).

A resistência à flexão foi calculada através da Equação (14).

3.8.6 Ensaio de cisalhamento

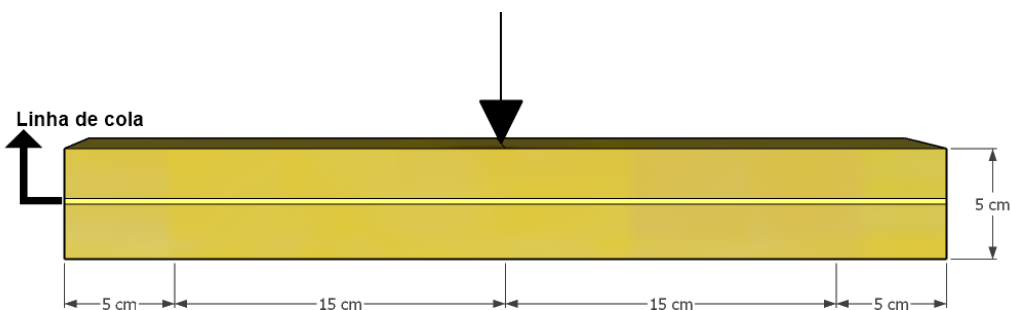
O ensaio de cisalhamento paralelo às fibras foi de acordo com a ABNT NBR 7190-4 (2022), cuja configuração de ensaio e corpo de prova são apresentados nas Figuras 46 e 47.

Figura 46 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento com seção 4 cm x 4 cm.



Fonte: Autora (2021).

Figura 47 – Corpo de prova para ensaio de cisalhamento com seção 5 cm x 5 cm.



Fonte: Autora (2021).

Utilizou-se duas seções transversais para os corpos de prova, a seção de 4 cm x 4 cm e a seção de 5 cm x 5 cm. O lamelado colado, com e sem fibra de carbono, foi composto por duas lamelas de espessuras iguais, com espessura de 2 cm para a seção 4 cm x 4 cm e espessura de 2,5 cm para a seção 5 cm x 5 cm. A resistência ao cisalhamento (f_v) foi calculada através da Equação (17).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios contemplados no programa experimental, que são referentes à caracterização da madeira do clone *Eucalyptus urophylla* COP 1404 e aos ensaios da madeira lamelada colada.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DO CLONE *Eucalyptus urophylla* COP 1404

4.1.1 Caracterização física

A Tabela 8 apresenta a média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) dos dados relativos à umidade, densidade básica (ρ_{bas}), índices de retração longitudinal ($\epsilon_{r,l}$), radial ($\epsilon_{r,r}$), e tangencial ($\epsilon_{r,t}$), em relação às fibras, coeficiente de anisotropia (CA) e índices de inchamento longitudinal ($\epsilon_{i,l}$), radial ($\epsilon_{i,r}$), e tangencial ($\epsilon_{i,t}$), em relação às fibras para a espécie clone 1404 de *Eucalyptus urophylla*.

Tabela 8 - Propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* COP 1404.

		Umidade (%)	ρ_{bas} (kg/m ³)	$\epsilon_{r,l}$ (%)	$\epsilon_{r,r}$ (%)	$\epsilon_{r,t}$ (%)	CA	$\epsilon_{i,l}$ (%)	$\epsilon_{i,r}$ (%)	$\epsilon_{i,t}$ (%)
Alburno	Média	25,12 A	451,35 A	0,23 A	3,85 A	5,58 A	1,45 A	0,23 A	5,23 A	8,35 A
	DP	2,39	18,12	0,06	0,31	0,49	0,12	0,04	0,47	0,51
	CV (%)	9,52	4,01	27,2	8,08	8,69	8,13	17,48	8,96	6,15
Cerne	Média	56,05 B	472,97 A	0,30 A	4,76 B	6,42 B	1,35 A	0,21 A	7,71 B	6,37 A
	DP	9,8	39,09	0,07	0,29	0,99	0,17	0,06	0,6	0,49
	CV (%)	17,49	8,27	22,11	6,2	15,42	11,31	26,58	7,81	7,66
Medula	Média	62,27 B	471,15 A	0,26 A	5,29 C	4,72 C	0,89 B	0,25 A	6,46 C	8,68 B
	DP	3,9	25,8	0,04	0,23	0,52	0,05	0,11	0,45	0,73
	CV (%)	6,26	5,48	14,74	4,36	10,95	5,88	42,24	6,94	8,36

Fonte: Autora (2021).

Nota: As médias acompanhadas da mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si, conforme teste de *Tukey* a 5% de probabilidade.

4.1.1.1 Umidade

O teor de umidade do alburno foi de 25,12%, do cerne 56,05% e da medula 62,27%. Do cerne para o alburno, houve uma redução de 55,18%, da medula para o cerne houve redução de 9,99 %, e da medula para o alburno houve redução de 59,66%. Nota-se que a redução de umidade maior foi do alburno em relação à medula,

tendo logo em seguida a redução do alburno em relação ao cerne. Pode-se perceber que a região do tronco que apresentou o maior teor de umidade foi a do cerne e o menor teor foi a região do alburno.

Observou-se que a umidade apresentou diferença estatisticamente significativa do alburno em relação ao cerne e a medula. Porém, não houve diferença entre o cerne e a medula. Esse fato está associado à heterogeneidade da madeira, fazendo com que o teor de umidade tenha variação dentro de uma mesma árvore (REZENDE; SAGLIETTI; GUERRINI, 1995).

Os dados encontrados apontam para velocidades diferentes na secagem entre as regiões do tronco, demonstrando, assim, a existência de um gradiente de umidade, conforme afirmam Rezende, Saglietti e Guerrini (1995).

Oliveira, Hellmeister e Tomazello Filho (2005) encontraram valores elevados de teor de umidade para o *Eucalyptus urophylla*, 96% de umidade (densidade básica de 540 kg/m³) e *Eucalyptus grandis*, 102% de umidade (densidade básica de 490 kg/m³). Além disso, observaram elevada variabilidade da umidade entre árvores de uma mesma espécie e dentro das árvores, havendo variabilidade também ao longo da altura e no sentido radial do tronco das árvores.

4.1.1.2 Densidade

Em relação à densidade, foi observado que as diferentes regiões do tronco, alburno, cerne e medula não apresentaram diferença significativa entre si, fato que pode ser explicado pela madeira ser jovem. Os autores Githiomi e Kariuki (2010) indicaram que em idades menores (como é o caso da idade das peças deste estudo, de 7 a 10 anos) não há diferenças entre as densidades básicas do alburno e do cerne, visto que a madeira ainda está em estágio de transição com pouca transformação química.

Os valores médios da densidade básica ficaram entre os valores mínimo e máximo encontrados por Silva (2018) de 423 kg/m³ e 552 kg/m³, respectivamente, e ficou próximo da densidade encontrada para o clone COP 1404 do estudo de Paulino e Lima (2018), de 470 kg/m³.

Além disso, a média das densidades (alburno, cerne e medula) de 465,16 kg/m³ está próxima de densidades de espécies utilizadas para produção da madeira lamelada colada (MLC), como Abeto da Noruega (*Picea abies*) com densidade 476 kg/m³

(ANDOR *et al.*, 2015), Abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) 480 kg/m³ (LING *et al.*, 2018), *Pinus sylvestris* com densidade 475 kg/m³, Álamo de rápido crescimento 325 kg/m³ (WANG *et al.*, 2021).

Segundo autores supracitados (OLIVEIRA; HELLMESTER; TOMAZELLO FILHO, 2005), as diferenças na densidade básica da madeira de árvores de eucalipto estão relacionadas à idade, tendo árvores jovens densidades menores em relação às com idade superior, devido à formação de madeira adulta. Tais densidades favorecem à penetração de adesivos na superfície da madeira, tornando a colagem eficiente.

De acordo com Bianche *et al.* (2017), para madeiras de baixa densidade tem-se maior penetração do adesivo, ao contrário do que ocorre em madeiras de alta densidade que possuem baixa permeabilidade ao adesivo.

4.1.1.3 Estabilidade dimensional

As variações dimensionais de retração longitudinal não apresentaram diferenças significativas entre o alburno, cerne e medula, assim como os dados de inchamento longitudinal. A retração longitudinal está dentro dos parâmetros estabelecidos pela literatura, que expõe um índice de retração longitudinal até 0,5%. Na direção longitudinal, a madeira apresenta estabilidade.

O índice de retração radial (4,76) e tangencial (6,42) são relativamente próximos para o cerne. O índice de retração no alburno na direção radial foi de (3,85) e na direção tangencial (5,58), a diferença de retração entre estas duas direções foi semelhante na região do cerne e do alburno.

Na medula, o índice de retração radial (5,29) e na tangencial (4,72) foi menor quando comparado com as regiões do cerne e alburno. Essa característica física influencia na estabilidade dimensional das lamelas durante o processo de secagem, contribuindo para ocorrência de poucos defeitos.

Do ponto de vista estatístico as retrações radial e tangencial apresentaram diferenças significativas entre si, ou seja, entre o alburno, o cerne e a medula. Todavia, o coeficiente de anisotropia apresentou valores inferiores a 1,5, que, segundo os autores Serpa e Vital (2005), indica uma madeira estável.

Essa estabilidade foi constatada durante o processo de secagem da madeira no Laboratório de Madeiras da UFBA, de modo que não se verificou aumento das

rachaduras originadas no processo de desdobro, nem o aparecimento de novas rachaduras. Nesse critério, o clone COP 1404 mostra-se como uma boa madeira para ser empregada na construção civil.

4.1.2 Caracterização mecânica

Os ensaios para determinar as propriedades mecânicas da madeira *Eucalyptus urophylla COP1404* foram feitos com corpos de prova para caracterização à compressão paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e flexão em três e quatro pontos. Esses corpos de provas foram retirados de 13 toras escolhidas aleatoriamente de um lote de 36 toras.

Todavia, como os ensaios foram feitos em tempos diferentes, devido a disponibilidade de uso do equipamento (prensa eletro-hidráulica analógica, modelo WPM Alemã, cuja capacidade é de 30 toneladas), os corpos de provas apresentam umidades diferentes devido a secagem pela qual eles passaram em função da espera para a liberação do equipamento de ensaio.

4.1.2.1 Compressão paralela às fibras

A Tabela 9 apresenta os resultados de resistência à compressão paralela da madeira com teor de umidade próximo ao ponto de equilíbrio ao ar da cidade de Salvador – BA, a qual gira em torno de 16%.

A determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira foi obtida pela máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na seção crítica de um corpo de prova prismático.

Tabela 9 – Resistência à compressão paralela dos corpos de prova maciços (U=12%).

CP	f (MPa)	$f_{12\%}$	E_{c0} (MPa)	$E_{12\%}$
1	34,3	38,3	18214	19599
2	35,9	39,6	-	-
3	36,7	41,2	23831	25785
4	37,7	42	19952	21469
5	37,8	41,8	29557	31685
6	38,3	41,4	22513	23728
7	38,6	42,2	22830	24246
8	39	44,2	-	-
9	39,8	44,9	27083	29358
10	39,9	44	22822	24374
11	40,4	44,4	22536	24023
12	40,6	45,5	21922	23676
13	40,8	44,9	-	-
14	41,6	46,4	25112	27070
15	41,6	44,5	23307	24379
MÉDIA	38,9	43	23307	24949
DP	2,1	2,3	2980	3246
CV	5,5	5,3	13	13
		f_{wk}	43,2	

Fonte: Autora (2022).

A resistência média à compressão na condição - padrão de referência (U = 12%) foi de 43,0 MPa, sendo a média do módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de compressão paralela às fibras de 24.949,2 MPa.

A resistência característica à compressão paralela foi de 43,2 MPa, o que enquadra o lote estudado, da espécie clonal de *Eucalyptus urophylla* COP 1404 na classe de resistência D 40 das classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos, conforme critérios de caracterização simplificada dispostos no documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022).

Ainda, a espécie *E. Urophylla* apresenta resistência à compressão paralela às fibras de 46 MPa, próxima a do clone COP 1404 (43 MPa). Percebe-se que o clone guarda semelhança com as propriedades do eucalipto de origem (*urophylla*).

A média da resistência à compressão paralela às fibras foi 43 MPa para o teor de umidade de 12%, aproximando-se da encontrada por Silva (2018) para o clone 1404, que foi de 37 MPa.

A Tabela 10 apresenta valores característicos de resistências obtidos por meio das relações do documento 3 da norma NBR 7190 (ABNT, 2022), da caracterização simplificada, tal qual relaciona a resistência à compressão paralela a outras resistências. Sendo assim, a resistência à compressão normal às fibras ($f_{c90,k}$) obtida foi de 10,8 MPa, a resistência à tração paralela às fibras ($f_{t0,k}$) foi de 56,1 MPa e a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v0,k}$) foi de 5,2 MPa.

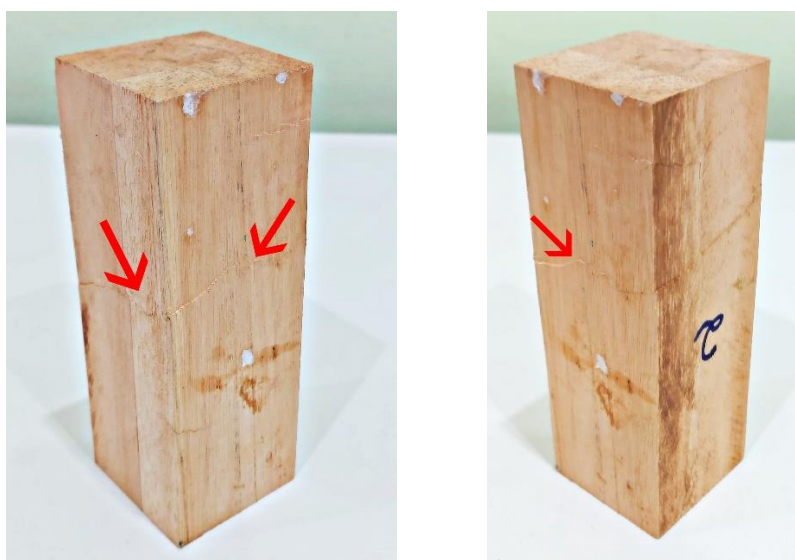
Tabela 10 – Valores característicos de resistências.

$f_{c0,k}$ (MPa)	43,2
$f_{c90,k}$ (MPa)	10,8
$f_{t0,k}$ (MPa)	56,1
$f_{v0,k}$ (MPa)	5,2

Fonte: Autora (2022).

A Figura 48 apresenta os corpos de prova rompidos por compressão paralela. A ruptura dos corpos de provas se caracterizou por dobramento das fibras, com direcionamento da ruptura nos nós ou nos pontos de fixação das cantoneiras para fixação dos relógios comparadores. Pode-se perceber semelhança no modo de falha da madeira relatado por André, Kliger e Olsson (2013).

Figura 48 – Corpos de prova rompidos por compressão paralela



Fonte: Autora (2022).

4.1.2.2 Cisalhamento paralelo às fibras (NBR 7190 – 3)

A Tabela 11 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira maciça. A média das resistências na condição-padrão de umidade (U = 12%) foi de 9,3 MPa, sendo a resistência característica de 8,3 MPa.

Tabela 11 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova maciços (U=12%).

CP	f_{v0} (MPa)	$f_{12\%}$
1	5,9	6,3
2	7	7,9
3	7,2	7,8
4	7,4	8,1
5	7,5	8,4
6	7,6	8,4
7	7,6	8,5
8	7,8	8,8
9	8	9
10	8,2	9,2
11	8,2	9,1
12	8,3	9,1
13	8,3	9,3
14	8,6	9,3
15	8,7	9,6
16	8,9	10
17	9,1	10
18	9,2	10,2
19	9,4	10,5
20	9,4	10,3
21	9,7	10,7
22	9,7	10,8
23	9,8	11,1
24	9,9	11,1
MÉDIA	8,4	9,3
DV	1	1,2
CV (%)	12,3	12,7
	f_{wk}	8,3

Fonte: Autora (2022).

Segundo a Tabela 2 do documento 1 da NBR 7190 (ABNT,2022), para a classe D40 de resistência de espécies de florestas nativas, a resistência característica ao cisalhamento é 6 MPa. Todavia, a resistência característica do clone COP 1404 foi de

8,3 MPa, tendo um aumento percentual de 38,3% em relação ao valor de referência da norma para classe D40. Com relação à resistência característica ao cisalhamento obtida através da relação da caracterização simplificada (5,2 MPa), houve um aumento percentual da resistência (8,3 MPa) por meio do ensaio de 59,6%.

A Figura 49 apresenta os corpos de prova rompidos por cisalhamento paralelo às fibras. As rupturas se caracterizaram por deslizamento das fibras na direção da aplicação da força.

Figura 49 – Corpos de prova maciços rompidos por cisalhamento.



Fonte: Autora (2021).

4.1.2.3 Cisalhamento paralelo às fibras (NBR 7190 - 4)

Os resultados de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras realizado conforme documento 4 da NBR 7190 são apresentados na Tabela 12. O valor médio da resistência na condição-padrão de umidade ($U = 12\%$) foi de 6,5 MPa.

Tabela 12 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova maciços.

CP	f_{v0} (MPa)	$f_{12\%}$
1	5,3	5,7
2	5,3	5,7
3	6,1	6,4
4	6,3	6,7
5	6,7	7,1
6	7,1	7,4
MÉDIA	6,1	6,5
DP	0,7	0,7
CV (%)	11,8	11,1

Fonte: Autora (2022).

Comparando-se o valor médio (6,5 MPa) com o obtido através do ensaio de cisalhamento paralelo conforme documento 3 da NBR 7190, cuja média foi 9,3 MPa, percebe-se uma redução percentual de 30,1%.

Matos e Molina (2016) compararam resultados de resistência ao cisalhamento obtidos pela NBR 7190-3 (ABNT,2022) e pela norma europeia, cujo procedimento é o mesmo do documento 4 da ABNT NBR 7190 (2022). Para o *Eucalyptus saligna* com 12% de umidade, os autores encontraram uma diferença de 35%, sendo os valores obtidos pela norma brasileira maiores em relação aos valores encontrados por meio da norma europeia. Já para o *Pinus elliottii* a diferença foi maior (65%).

Pode-se perceber que essa diferença entre as normas encontrada por Matos e Molina (2016) para o eucalipto condiz com a diferença encontrada para o COP 1404, de modo que a média da resistência obtida através dos procedimentos descritos no documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022) também foi maior que à encontrada pelos métodos do documento 4 da NBR 7190 para o ensaio de cisalhamento.

A Figura 50 apresenta a ruptura predominante obtida mediante ensaio de cisalhamento que foi caracterizada por tração nas fibras inferiores, no meio do corpo de prova. Conforme Matos e Molina (2016), neste tipo de ruptura a madeira não esgota sua capacidade resistente ao cisalhamento. Ainda, os autores mencionaram que essa forma de ruptura foi predominante para a madeira de Eucalipto.

Figura 50 – Ruptura dos corpos de prova obtidas no ensaio de cisalhamento.



Fonte: Autora (2022).

4.1.2.4 Flexão estática de 3 pontos

A Tabela 13 expõe a umidade das amostras, a resistência à flexão e o módulo de flexão estática. O Quadro 3 mostra dois tipos de ruptura observados no ensaio de flexão, tração simples e tração desviada, de modo que não foi observada relação entre o tipo de ruptura e a resistência à flexão do corpo de prova, ou seja, não foi notado aumento ou diminuição da resistência em função do tipo de ruptura. Como a madeira estava úmida, foi possível saber a resistência neste estado, acima de 30%.

Tabela 13 – Resistência à flexão e módulo de elasticidade dos corpos de prova maciços.

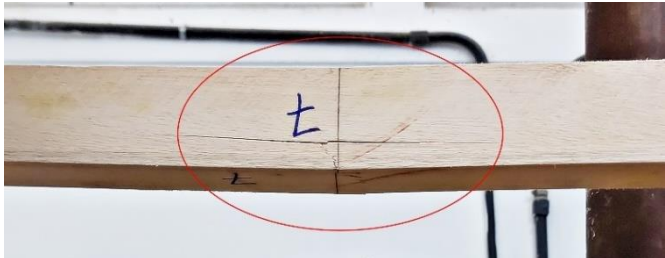
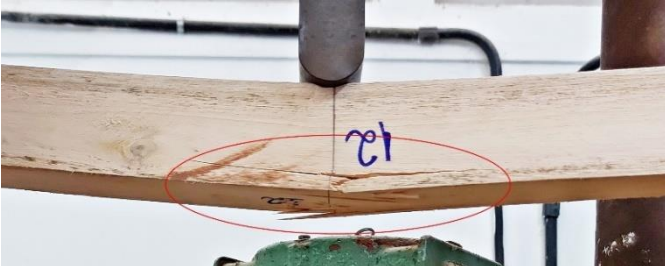
CP	f_m (MPa)	E_{m0} (MPa)	U (%)
1	51,9	5412,7	48,8
2	55,6	5105,4	48,6
3	53,1	3809,8	53,7
4	55,6	6347,7	45,4
5	51,9	5272,0	60,4
6	53,1	-	56,6
7	51,9	4190,0	63,5
8	55,6	6102,8	54,0
9	48,2	3515,4	49,2
10	56,8	4809,4	38,9
11	59,3	5276,7	49,3
12	48,2	2607,6	59,4
MÉDIA	53,4	4768,2	52,3
DP	3,3	1749,0	7,0
CV (%)	6,3	36,7	13,3

Fonte: Autora (2021).

Os dados referentes à resistência à flexão da madeira foram com a umidade acima do ponto de saturação das fibras (30%). Sabe-se que o uso da madeira não é indicado nessa condição. Porém, na Bahia, vende-se madeira verde para uso na construção civil, o que motivou a realização desse ensaio com a madeira úmida, a fim de ter um parâmetro de resistência.

Essa madeira apresentou valores relativamente baixos de módulo de elasticidade e de resistência à flexão, por ser madeira jovem com idade de 7 a 10 anos e umidade acima de 30% no momento do ensaio.

Quadro 3 – Tipos de ruptura do ensaio de flexão e porcentagem de ocorrência no lote ensaiado.

TIPO DE RUPTURA	IMAGEM	FREQUÊNCIA (%)
TRAÇÃO SIMPLES		33,33
TRAÇÃO DESVIADA		66,67

Fonte: Autora (2021).

4.1.2.5 Flexão de 4 pontos

A Tabela 14 apresenta os resultados de resistência à flexão de 4 pontos realizado conforme documento 4 da ABNT NBR 7190 (2022). As médias da resistência e do módulo de elasticidade foram de 69,2 MPa e 9.734 MPa, respectivamente. O coeficiente de variação (CV) foi de 21,9%, o que não caracteriza um lote homogêneo, apesar do valor próximo a 20%, que consideraria a homogeneidade do lote.

Tabela 14 – Resistência à flexão de 4 pontos e módulo de elasticidade de corpos de prova maciços.

CP	U (%)	f_m (MPa)	E_0 (MPa)
1	13,6	55,0	8156
2	14,5	61,4	7230
3	14,2	68,2	10153
4	13,8	72,7	11681
5	14,1	79,0	12660
6	13,7	79,2	8526
MÉDIA	14,0	69,2	9734
DP	0,3	9,7	2133
CV (%)	2,5	14,1	22

Fonte: Autora (2022).

Em relação ao módulo de elasticidade médio ($E_0 = 9.734 \text{ MPa}$) obtido através do ensaio de flexão de 4 pontos foi próximo de valores encontrados para outras espécies empregadas na produção de MLC, como 9.800 MPa para o *Pinus sylvestris* (LING *et al.*, 2020), 9.760 MPa para o Álamo de rápido crescimento (LU *et al.*, 2015), 10.434 MPa para o *Pinus elliottii* (DONADON *et al.*, 2020).

A Figura 51 apresenta a ruptura típica observada nos corpos de prova, a qual foi caracterizada por tração das fibras inferiores, esmagamento pronunciado na região dos apoios e nos pontos de aplicação das forças. Quanto à presença de defeitos, quando houve, afetou mais a zona de tração, como relatou Khelifa *et al.* (2015).

Figura 51 – Ruptura à flexão de 4 pontos.



Fonte: Autora (2022).

4.2 OBSERVAÇÕES ACERCA DA MADEIRA CLONE DE *Eucalyptus urophylla*

4.2.1 Processo de secagem

Antes da secagem, observou-se o aparecimento de rachaduras nos extremos das lamelas, após o desdobro. Todavia, esses defeitos não evoluíram no decorrer do processo de secagem, ou seja, não houve aparecimento de rachaduras e empenamentos durante a secagem das lamelas.

Os defeitos que surgiram antes da secagem podem ter sido provenientes de tensões de crescimento, por se tratar de madeira de Eucalipto. Segundo Beltrame *et al.* (2015), são defeitos provenientes da liberação das tensões de crescimento: as fendas e rachaduras nos extremos das toras, os empenamentos e rachaduras longitudinais durante o desdobro de toras e pranchões e o cerne quebradiço, por conta da excessiva tensão de compressão em torno da medula.

Os autores Lima e Stape (2017) relataram que, para o COP 1404, o índice de rachadura de extremidade de tábua seca (IRTS) foi de 14,1 cm, sendo 12,85% menor

do que o índice encontrado para o lote de madeira deste estudo, que foi de 16,18 cm. Segundo os autores, as rachaduras e empenamento são os principais defeitos, devido às elevadas tensões de crescimento nas árvores que, após serem derrubadas, liberam estas tensões que são aliviadas parcialmente, gerando a maioria das rachaduras de topo de tora.

Durante o desdobro, rachaduras adicionais podem ocorrer, podendo se tornar intensas, de modo que se acentuem durante a secagem. Com isso, essas tensões podem gerar defeitos, fazendo com que haja redução das dimensões das peças obtidas, sobretudo o comprimento.

4.2.2 Rachaduras após o desdobro das toras

As rachaduras surgiram após o processo de desdobro, de modo que não se observou a continuidade dessas rachaduras durante o período de 4 meses de secagem, em ambos processos de secagem. Este fato pode estar relacionado com a boa estabilidade dimensional apresentada através dos ensaios de caracterização física da madeira, cuja relação entre o índice de retração tangencial e radial foi mais próxima de 1. A Figura 52 mostra alguns defeitos que surgiram após o corte em lamelas.

Figura 52 – Exemplos de defeitos das lamelas – rachaduras após o desdobro das toras em lamelas.



Fonte: Autora (2021).

4.2.3 Degradação biológica

O lote de madeira utilizado em todo o programa experimental foi composto de 32 toras de madeira. Desse total, 10 toras foram atacadas superficialmente por cupins de terra (*Nasutitermes corniger*), sendo que uma tora foi atacada tanto na região do

alburno como no cerne. O início do ataque ocorreu nos topos das toras, na região do alburno.

Para deter o ataque desses insetos, foi aplicado, por pincelamento, uma demão do inseticida conhecido com o nome comercial “Penetrol Cupim” (deltametrina e que-rosene). Esse tipo de tratamento se caracteriza por ser superficial e de pouca penetração na madeira, ficando superficialmente na região do alburno.

Todavia, no processo de ajuste da seção circular para a seção quadrada para produção das lamelas esse produto foi retirado, não interferindo no processo de cola-gem.

O ataque de térmitas de solo ao Clone *Eucalyptus urophylla* COP 1404 demonstra a suscetibilidade desta espécie a esse tipo de inseto. A Figura 53 apresenta uma lamela retirada da tora atacada na região do cerne por térmita de solo.

Figura 53 – Ataque de térmita de solo ao Clone *Eucalyptus urophylla* COP 1404 na região do cerne e alburno.



Fonte: Autora (2021).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS LAMELAS

4.3.1 Classificação visual e mecânica

Os dados referentes às classificações visual e mecânica de lamelas de espessuras 2 cm e 3 cm são apresentados nas Tabelas 15 e 16, respectivamente. A classe de resistência de cada peça do lote de madeira é considerada a menor das duas classes, a visual e mecânica.

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

Tabela 15 – Classificação visual e mecânica de lamelas com 2 cm de espessura.

ESPESSURA - 2 CM								
LAMELA	VISUAL		$\rho_{test} (kg/m^3)$	ρ_{12}	CLASSE	E_0 (MPa)	$E_{12\%}$	CLASSE
	CLASSE							
1	3		503,3	489,9	3	13311	13578	2
2	2		517,8	504,6	2	7156	7729	3
3	1		523,1	518,5	3	15075	15980	1
4	3		543,8	530,4	3	10245	10860	3
5	3		546,8	537,2	3	10047	10851	3
6	2		547,6	537,6	3	10934,97	11591	3
7	3		551,1	530,7	3	9960	10756	3
8	1		556,4	543,8	3	8417	9427	3
9	2		560,1	549,8	3	10660	12153	3
10	1		562,9	553,8	3	9670	10637	3
11	1		565,3	554,0	3	12174	14122	1
12	3		566,5	556,8	3	19295	20453	1
13	3		573,6	555,3	3	10520	11361	3
14	3		575,3	558,6	3	12753	14029	1
15	2		581,5	570,2	3	12222	13444	2
16	2		603,8	592,7	3	14791	15679	1
17	3		611,4	584,0	3	15777	16724	1
18	2		685,5	669,6	2	13946	14783	1
MÉDIA			565,3	552,1	-	12053	13009	-
DV			40,4	38,8	-	2958	3041	-
CV (%)			7,2	7,0	-	25	23	-
				ρ_k	487,1	E_k	7376	

Fonte: Autora (2022).

Segundo critérios de classes de resistência apresentados na Tabela 3 do documento 1 da norma NBR 7190 (ABNT, 2022) para folhosas, as peças estruturais de 2 cm de espessura, de acordo com a densidade característica ($\rho_k = 487,10 \text{ kg/m}^3$), podem ser classificadas como D 24 ($\rho_k = 485 \text{ kg/m}^3$). Com base no módulo de elasticidade médio, a classificação é D40 e pelo módulo de elasticidade característico, D18.

Comparando a média dos resultados da densidade básica do alburno, cerne e medula ($465,16 \text{ kg/m}^3$) obtida através do ensaio descrito no documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022) com a média das densidades das peças ($565,33 \text{ kg/m}^3$), nota-se que houve um aumento percentual de 21,5%.

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

Tabela 16 – Densidades de lamelas com 3 cm de espessura.

ESPESSURA - 3 CM							
LAMELAS	VISUAL	ρ_{test} (kg/m ³)	ρ_{12}	CLASSE	E_0 (MPa)	$E_{12\%}$	CLASSE
	CLASSE						
1	1	504,9	492,3	3	12434	13678	2
2	1	509,1	506,0	3	9707	9902	3
3	2	520,2	514,8	3	12885	13401	2
4	2	540,3	523,4	3	12348	13830	2
5	3	545,8	537,1	3	14359	15221	1
6	1	546,3	535,6	3	14364	15226	1
7	1	555,9	542,7	3	12811	13836	2
8	2	560,7	551,5	3	13885	14719	1
9	3	574,5	550,2	3	14795	17163	1
10	2	574,5	559,0	3	13870	15257	1
11	3	581,4	565,7	3	14549	16004	1
12	3	586,5	573,3	3	15421	16655	1
13	3	588,1	572,0	3	12517	13768	2
14	3	589,1	578,2	3	15777	16724	1
15	1	592,3	580,2	3	15731	16990	1
16	2	598,5	581,4	3	14063	15469	1
17	2	606,7	589,1	3	11456	12601	3
18	3	625,3	608,2	2	15198	16718	1
MÉDIA		566,7	553,4	-	13676	14842,19	-
DV		33,8	31,1	-	1607	1857	-
CV (%)		6,0	5,6	-	12	13	-
			ρ_k	488,0	E_k	11192	

Fonte: Autora (2022).

De acordo com os critérios de classes de resistência apresentados na Tabela 3 da ABNT NBR 7190-1 (2022) para folhosas, as peças estruturais de 3 cm de espessura, de acordo com a densidade característica ($\rho_k = 488,05 \text{ kg/m}^3$), são classificadas como D 24 ($\rho_k = 485 \text{ kg/m}^3$). A classificação pelo módulo de elasticidade médio é D50 e pelo módulo de elasticidade característico, D40.

Comparando, também, a média dos resultados da densidade básica do alburno, cerne e medula ($465,2 \text{ kg/m}^3$) obtida através do ensaio descrito no documento 3 da NBR 7190 (ABNT, 2022) com a média das densidades básicas das peças ($566,7 \text{ kg/m}^3$), nota-se que houve um aumento percentual de 21,8%.

O documento 1 da ABNT NBR 7190 (2022) orienta que a madeira de lamelas para formar peças de madeira colada devem ter densidade aparente ($U = 12\%$) entre $0,40 \text{ g/cm}^3$ e $0,75 \text{ g/cm}^3$. Sendo assim, pode-se afirmar que as densidades a 12% de umidade das peças estão dentro do intervalo descrito pela norma, podendo ser aplicada para a produção de peças de madeira lamelada colada.

4.4 ENSAIOS DA MADEIRA LAMELADA COLADA

4.4.1 Cisalhamento paralelo às fibras (NBR 7190 – 3)

4.4.1.1 Lamelado colado sem fibra carbono (LSFC)

A Tabela 17 apresenta os resultados das resistências ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono (LSFC). A resistência média ($f_{12\%}$) foi de 8,6 MPa e a resistência característica (f_{wk}) de 6,7 MPa.

Tabela 17 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono (LSFC).

CP	f_{v0} (MPa)	$f_{12\%}$
1	5,9	6,6
2	5,9	6,8
3	6,1	6,8
4	6,2	6,9
5	6,4	7,0
6	6,5	7,3
7	6,5	7,4
8	6,6	7,4
9	6,8	7,8
10	7,1	7,9
11	7,2	7,9
12	7,2	8,0
13	7,6	8,5
14	8,0	8,8
15	8,1	9,0
16	8,2	9,3
17	8,4	9,5
18	8,6	9,6
19	8,6	9,7
20	8,8	9,6
21	8,8	9,9
22	9,0	10,1
23	9,1	10,1
24	9,4	10,4
25	9,5	10,7
26	9,6	10,9
MÉDIA	7,7	8,6
DV	1,2	1,4
CV (%)	15,9	15,8
	f_{wk}	6,7

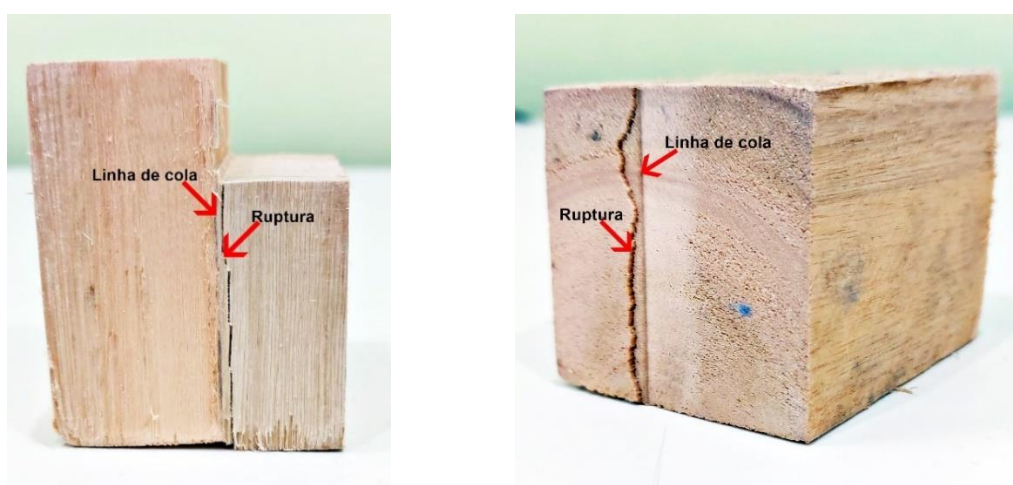
Fonte: Autora (2022).

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

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

O ensaio de cisalhamento comprovou a eficiência da cola, uma vez que o CP se comportou como um CP maciço, tendo a ruptura ocorrido na madeira (Figura 54). Além disso, a classificação visual das lamelas permite uma seleção das peças e uma melhor uniformização dos defeitos.

Figura 54 – Corpo de prova lamelado sem fibra carbono rompido ao cisalhamento paralelo às fibras.



Fonte: Autora (2021).

Nadir *et al.* (2014) avaliaram a ligação adesivo/madeira através da força de cisalhamento, a resistência ao cisalhamento para a madeira de borracha (*Hevea brasiliensis*, densidade 605 kg/m^3) com o adesivo PVA foi de $8,59 \text{ MPa}$, com porcentagem de falha na madeira de 99,7%, já o maciço (amostra de controle) teve resistência de $13,45 \text{ MPa}$.

Comparando-se os resultados, observa-se que a resistência média ($f_{12\%} = 8,6 \text{ MPa}$) do lamelado colado (LSFC) da espécie clonal COP 1404 com adesivo poliuretano foi praticamente a mesma encontrada pelos autores (8,59 MPa) para a madeira de borracha com 20 anos de idade. Já para o maciço, as resistências médias ficaram próximas ($f_{12\%} = 12,7 \text{ MPa}$), sendo a do COP 1404 5,6% menor em relação à madeira de borracha.

Os valores encontrados também foram compatíveis com Bianchi (2020) que encontrou para o mesmo adesivo poliuretano bicomponente, usado nessa pesquisa, uma resistência variando de 6 a 8 MPa. Ainda, Bianchi *et al.* (2017) obtiveram para o mesmo adesivo 7,6 MPa de resistência ao cisalhamento na linha de cola para a gramatura de 200 g/m² e 8,1 MPa para a gramatura de 250 g/m². Também compatível com os dados obtidos (Tabela 17).

4.4.1.2 Lamelado colado com fibra de carbono (LCFC)

A Tabela 18 apresenta os resultados das resistências ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado com fibra carbono (LCFC). A resistência média ($f_{12\%}$) foi de 8,1 MPa e a resistência característica (f_{wk}) de 7,6 MPa.

Tabela 18 – Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado com fibra carbono (LCFC).

CP	f_{v0} (MPa)	$f_{12\%}$
1	6,1	6,9
2	6,4	7,1
3	6,4	7,2
4	6,6	7,4
5	6,8	7,7
6	6,8	7,6
7	7,1	7,9
8	7,3	8,3
9	7,6	8,3
10	8,2	9,3
11	8,2	9,2
12	8,9	10,2
MÉDIA	7,2	8,1
DV	0,9	1
CV (%)	12,1	12,4
	f_{wk}	7,6

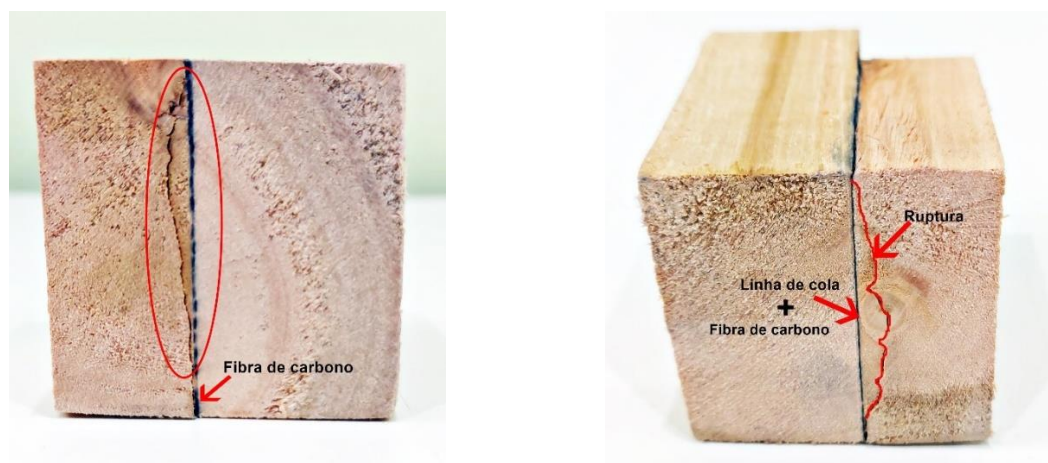
Fonte: Autora (2022).

Percebe-se uma redução percentual da resistência média ($f_{12\%} = 8,1 \text{ MPa}$) do LCFC de 36,2% em relação à média da resistência ao cisalhamento do maciço ($f_{12\%} = 12,7 \text{ MPa}$). E uma redução de 8,4% da resistência característica ($f_{wk} = 7,6$) do LCFC em relação ao maciço ($f_{wk} = 8,3$).

Os resultados de cisalhamento do lamelado colado com fibra (LCFC) apresentaram diferenças estatisticamente significativas em relação aos resultados de cisalhamento do maciço, cujo valor de F (9,28) dado pela análise estatística ANOVA, foi maior do que o valor de F crítico (4,13), resultando na existência de diferença estatística.

Apesar dessa diferença, o ensaio de cisalhamento do LCFC também comprovou a eficiência da cola, uma vez que o CP se comportou como um CP maciço, do modo que a ruptura ocorreu na madeira, como se pode observar na Figura 55.

Figura 55 - Corpo de prova lamelado com fibra carbono rompido ao cisalhamento paralelo às fibras.



Fonte: Autora (2021).

A resistência média ao cisalhamento dos CP'S sem fibra de carbono (LSFC) apresentou aumento percentual de 6,2% em relação à média dos CP'S com fibra de carbono (LCFC). Tal diferença não foi estatisticamente significativa, de modo que F (1,38) foi menor que o F crítico (4,11), conforme ANOVA (fator único).

Os CP'S romperam na madeira e não na linha de cola, fato que demonstra que o adesivo tem desempenho estrutural, mantendo o mesmo desempenho ainda com aplicação da fibra carbono. Fato condizente com Nadir *et al.* (2014) os quais afirmam que a falha na madeira é geralmente tomada como uma indicação da força do vínculo de cola, indicando que as ligações de cola são mais fortes do que a própria madeira.

Azambuja (2006) obteve resistência ao cisalhamento na lâmina de cola para o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, para a madeira de *Eucalyptus grandis*, de 8,4 MPa, em corpos de prova isentos de defeitos. Valor próximo ao das resistências do LSFC (8,6 MPa) e LCFC (8,1 MPa).

Nadir *et al.* (2016) submeteram amostras ao teste de cisalhamento com o adesivo PVA, cujo o mínimo de resistência adesiva considerada da madeira lamelada colada foi de 5,4 MPa, sendo as resistências médias ao cisalhamento desse estudo superiores (8,6 MPa LSFC e 8,1 MPa LCFC).

4.4.2 Cisalhamento paralelo às fibras (NBR 7190-4)

4.4.2.1 Lamelado colado sem fibra carbono (LSFC)

A Tabela 19 apresenta os resultados das resistências ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono (LSFC). A resistência média a 12% de umidade foi de 6,9 MPa.

Tabela 19 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono (LSFC).

CP	f_{v0} (MPa)	$f_{12\%}$
1	7,0	7,6
2	6,6	6,9
3	6,0	6,6
4	5,8	5,9
5	5,5	5,8
6	6,5	6,9
7	8,0	8,5
8	5,6	6,1
9	5,6	6,0
10	6,8	7,2
11	6,9	7,6
12	7,2	7,9
MÉDIA	6,5	6,9
DP	0,8	0,9
CV (%)	11,9	12,5

Fonte: Autora (2022).

Comparando com a média da resistência ao cisalhamento obtida pelo documento 3 da NBR 7190 para o LSFC de 8,6 MPa, houve uma redução percentual de 19,8%. Em relação ao resultado do maciço (6,5 MPa) obtido pelo documento 4 da

NBR 7190, houve um aumento percentual de 6,2%. Porém, essa diferença não foi estatisticamente significativa, de modo que $F (1,28)$ foi menor que F crítico (4,41).

A Figura 56 apresenta a ruptura típica predominante nos corpos de prova LSFC. Tal modo de ruptura foi semelhante ao discutido para o maciço (tópico 4.1.2.3) que se caracterizou por tração nas fibras inferiores, localizada na parte central do corpo de prova.

Figura 56 – Ruptura típica ao cisalhamento paralelo dos corpos de prova LSFC.



Fonte: Autora (2022).

4.4.2.2 Lamelado colado com fibra carbono (LCFC)

A Tabela 20 apresenta os resultados das resistências ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado com fibra carbono (LCFC). A resistência média a 12% de umidade foi de 6,0 MPa.

Tabela 20 - Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova lamelado colado com fibra carbono (LCFC).

CP	f_{v0} (MPa)	$f_{12\%}$
1	5,8	5,9
2	5,9	6,0
3	5,9	5,9
4	6,0	5,8
5	5,9	5,9
6	6,2	6,3
7	5,5	5,3
8	6,0	6,0
9	6,5	6,2
10	6,2	6,7
MÉDIA	6,0	6,0
DP	0,3	0,4
CV (%)	4,5	6,0

Fonte: Autora (2022).

A resistência média ao cisalhamento pelo procedimento do documento 3 da NBR 7190 para o LCFC foi de 8,1 MPa. Comparando-se com o resultado médio (6,0 MPa) obtido por meio do ensaio descrito no documento 4 da NBR 7190, houve uma redução percentual de 25,9%. Em relação ao LSFC (6,9 MPa), houve redução de 13,0%, representando diferença estatisticamente significativa ($F > F$ crítico). Todavia, a ruptura típica predominante nos corpos de prova LCFC também ocorreu tal qual nos corpos de prova LSFC, fora da linha de cola.

4.4.3 Compressão paralela às fibras

4.4.3.1 Lamelado colado sem fibra carbono (LSFC)

Os resultados da resistência à compressão paralela às fibras dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono (LSFC) são apresentados na Tabela 21. A média da resistência à compressão paralela do LSFC ($f_{12\%}$) foi de 45,3 MPa e a resistência característica foi de 44,7 MPa. O módulo de elasticidade médio a 12% de umidade foi de 22.506 MPa.

Tabela 21 – Resistência à compressão paralela dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono (LSFC).

CP	f_{c0} (MPa)	$f_{12\%}$	E_{c0} (MPa)	$E_{12\%}$ (MPa)
1	32,7	36,1	23713	25372
2	38,4	42,8	14403	15497
3	38,7	42,8	22224	23780
4	39,6	43,4	19368	20607
5	39,6	44,7	15561	16909
6	40,5	46,9	18346	20265
7	40,8	44,9	-	-
8	40,8	45	22899	24456
9	40,8	45,2	27343	29312
10	41	45,7	22429	24164
11	41,1	46,4	20583	22354
12	41,7	45,9	21853	23312
13	42	47,6	15395	16756
14	42,9	48,6	24217	26362
15	47,4	54,1	23729	25959
MÉDIA	40,5	45,3	20862	22506
DP	3	3,8	3797	4040
CV (%)	7,5	8,3	18	18
	f_{wk}	45		

Fonte: Autora (2022).

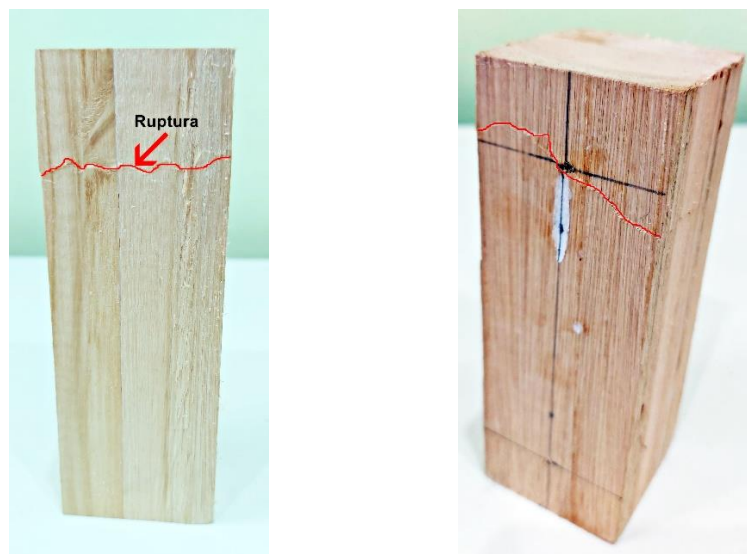
Comparando-se a resistência média à compressão paralela do LSFC (45,3 MPa) com a resistência média do maciço (43 MPa), tem-se um aumento percentual de 5,3%, em relação à resistência característica (44,7 MPa), também houve um aumento percentual de 3,5% em relação ao maciço (43,2 MPa). Em relação ao módulo de elasticidade na condição-padrão de umidade ($U=12\%$), houve uma redução do LSFC (22.506,2 MPa) de 9,8% em relação ao maciço (24.949,2 MPa).

A análise de variância (ANOVA) atestou que não existe diferença estatística significativa entre o LSFC e o maciço. Isso indicou que o corpo de prova lamelado colado se comportou como um corpo maciço. A pequena diferença de resistência mecânica pode estar relacionada ao emprego de lamelas com maior resistência mecânica na produção do corpo de prova.

Em relação à ruptura, o furo criado para prender os relógios direcionou a ruptura de alguns corpos de prova, entretanto predominou a ruptura de um corpo único. Não houve ruptura na linha de cola.

A Figura 57 mostra a ruptura dos corpos de prova sem fibra carbono, caracterizada pelo dobramento das fibras. Quando os CP'S possuíam defeitos, interferiram na ruptura, quando essa ocorria próxima ao defeito, que dependendo da solicitação, o defeito pode interferir mais ou menos. Fato relatado por Khelifa *et al.* (2015), cuja presença de defeitos como nós, por exemplo, influencia no comportamento mecânico da madeira. Ainda, esse comportamento da madeira no ensaio de compressão paralela foi apresentado por André, Kliger e Olsson (2013).

Figura 57 - Corpo de prova lamelado sem fibra carbono rompido à compressão paralela às fibras.



Fonte: Autora (2021).

4.4.3.2 Lamelado colado com fibra carbono (LCFC)

A Tabela 22 apresenta os resultados de resistência à compressão paralela dos corpos de prova lamelado com fibra carbono (LCFC). A resistência média do LCFC foi de 48,6 MPa e o módulo de elasticidade médio foi de 26.641 MPa.

Tabela 22 - Resistência à compressão paralela dos corpos de prova lamelado colado com fibra carbono (LCFC).

CP	f_{c0} (MPa)	$f_{12\%}$	E_{c0} (MPa)	$E_{12\%}$ (MPa)
1	46,7	53,3	-	-
2	41	46,7	-	-
3	42,3	46,1	29890	31665
4	47,8	53,2	21591	23232
5	41,9	48,6	23767	26296
6	42,8	48,4	26222	28529
7	40	44	22016	23483
MÉDIA	43,2	48,6	24697	26641
DP	2,9	3,5	3427	3554
CV	6,7	7,2	14	13

Fonte: Autora (2021).

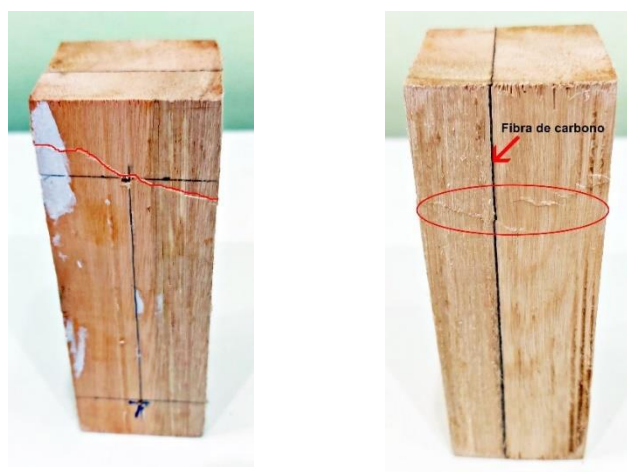
A média dos resultados referente à resistência à compressão paralela às fibras dos corpos de prova LCFB (48,6 MPa) foi maior 7,3% em relação aos corpos de prova LSFC (45,3 MPa) e em relação ao maciço (43 MPa) foi 13% maior.

Quanto ao módulo de elasticidade, foi maior para os CP'S com fibra carbono (26.641 MPa), representando um aumento de 18,4% em relação aos CP'S sem fibra carbono (22.506 MPa). Em relação ao maciço (24.949 MPa), o módulo do LCFC foi 6,8% maior.

Com base na análise estatística ANOVA, não houve diferença estatisticamente significativa entre os resultados do ensaio do LSFC e do LCFC, sendo o valor de F (3,74) menor que o valor de F crítico (4,35).

A Figura 58 mostra a ruptura dos corpos de prova do LCFC, também caracterizada pelo dobramento das fibras, tendo ruptura próxima aos defeitos, quando os CP'S possuíam defeitos.

Figura 58 - Corpo de prova lamelado com fibra carbono rompido à compressão paralela às fibras.



Fonte: Autora (2021).

4.4.4 Flexão de 3 pontos

4.4.4.1 Lamelado colado sem fibra carbono (LSFC)

Os resultados da resistência à flexão dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono são apresentados na Tabela 23. A média da resistência à flexão na condição-padrão de umidade ($U = 12\%$) foi de 79,8 MPa e a resistência característica foi de 78,8 MPa.

Tabela 23 - Resistência à flexão dos corpos de prova lamelado colado sem fibra carbono (LSFC).

<i>CP</i>	<i>f_m (MPa)</i>	<i>f_{12%}</i>
1	64,3	72,9
2	66,2	74,6
3	66,8	75,4
4	68	76,9
5	68	77,3
6	69,3	79,2
7	69,9	79,2
8	71,8	83,1
9	71,8	82,8
10	73,1	80,6
11	75,6	83,4
12	83,2	92,3
MÉDIA	70,7	79,8
DV	5,1	5,2
CV (%)	7,2	6,5
	<i>f_{wk}</i>	78,8

Fonte: Autora (2022).

O resultado médio da resistência à flexão do LSFC (70,7 MPa) foi 32,3% maior em relação ao corpo de prova maciço (53,4 MPa), havendo diferença estatística significativa, fato atestado pela análise ANOVA, cujo valor de F (96,84) foi maior que o F crítico (4,30) e o valor-P < 0,05.

Essa diferença se deve ao fato da redução da umidade da madeira do LSFC em relação ao maciço, de modo que a secagem e a colagem interferiram nos resultados, pois a colagem foi feita com a madeira em torno de 15% de umidade, além da colagem favorecer a descontinuidade e uniformização dos defeitos, fato já previsto por Thorhallsson *et al.* (2017), ao afirmar que os produtos de MLC apresentam os defeitos naturais distribuídos de maneira uniforme ao longo das seções. Pois, as peças são selecionadas através da classificação visual e mecânica.

4.4.4.2 Lamelado colado com fibra carbono (LCFC)

A Tabela 24 apresenta os resultados da resistência à flexão dos corpos de prova com fibra de carbono (LCFC).

Tabela 24 - Resistência à flexão dos corpos de prova lamelado colado com fibra carbono (LCFC).

CP	f_m (MPa)	$f_{12\%}$
1	56,7	64,2
2	64,3	70,8
3	69,3	79,1
4	71,8	81,6
5	79,4	88,0
6	89,5	101,1
MÉDIA	71,8	80,8
DP	11,5	13,0
CV (%)	16,0	16,0

Fonte: Autora (2021).

A resistência média à flexão do LCFC (71,8 MPa) foi 1,6% maior que a do LSFC (70,7 MPa). A posição da fibra de carbono foi definida em função do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras. Como a fibra de carbono foi colocada próxima à linha neutra, não gerou contribuição para o ganho de resistência, mas não provocou descontinuidade da peça.

Não houve descolamento da fibra. No ensaio de flexão também se verificou a aderência da fibra às lamelas. Foi testada a aderência entre as duas lamelas, não houve descolamento, a peça se comportou como uma peça maciça, sendo assim pode-se considerar a linha neutra estando a 2,5 cm (no meio da peça).

A peça de MLC apresentou a ruptura clássica, encurtamento no bordo comprimido, sendo a ruptura por dobramento das fibras no bordo comprimido e ruptura frágil no bordo tracionado (Figura 59B).

Tal ruptura ocorreu conforme Fiorelli (2002), tendo esmagamento na região comprimida e ruptura por tração e/ou cisalhamento da madeira. Conforme o autor, esse comportamento é adequado para garantir maior segurança estrutural, de modo que a ruptura é anunciada pelos deslocamentos na proximidade da ruptura.

Figura 59 - Ensaio à flexão estática

(A) Corpo de prova sendo ensaiado



(B) Ruptura do corpo de prova



Fonte: Autora (2021).

4.4.5 Flexão de 4 pontos

4.4.5.1 Lamelado colado sem fibra carbono (LSFC)

A Tabela 25 e a Tabela 26 apresentam os resultados de resistência à flexão do lamelado com a seção transversal de 5 cm x 5 cm e resultados de resistência e módulo de elasticidade com seção transversal de 4 cm x 4 cm, respectivamente. Foram ensaiados um total de 19 corpos de prova. O tempo médio até a ruptura dos corpos de prova foi de 3,5 min.

A resistência média à flexão foi de 98,6 MPa. Comparando com a média da resistência do lote do maciço (69,2 MPa), houve um aumento percentual de 42,5%. A análise de variância ANOVA atestou diferença estatística significativa, pois $F(20,9) > F_{\text{crítico}}(4,8)$. Tal fato indica melhoria do produto engenheirado em relação à madeira maciça, visto que se tem uma seleção das peças (classificação visual) e a colagem possibilita a uniformização da peça.

Tabela 25 – Resistência à flexão dos corpos de prova lamelados sem fibra (LSFC) com seção transversal de 5 cm x 5 cm.

CP	<i>U (%)</i>	<i>f_m (MPa)</i>
1	16,1	82,1
2	15,5	82,1
3	15,6	94,0
4	14,3	103,7
5	14,9	103,7
6	15,8	112,3
7	15,4	112,3
MÉDIA	15,4	98,6
DP	0,6	12,9
CV (%)	3,9	13,1

Fonte: Autora (2022).

Para a seção transversal de 4 cm x 4 cm a resistência média à flexão foi de 71,9 MPa e média do módulo de elasticidade de 6 corpos de prova foi 12.862 MPa. Comparando com o maciço, apesar da seção transversal ser diferente, houve um aumento de 3,9%, e para o módulo de elasticidade o aumento foi de 32,1%.

Tabela 26 – Resistência à flexão dos corpos de prova lamelados sem fibra (LSFC) com seção transversal de 4 cm x 4 cm.

CP	<i>U (%)</i>	<i>f_m (MPa)</i>	<i>E₀ (MPa)</i>
1	16,3	54,3	-
2	16	55,7	-
3	15,2	58,4	-
4	12,3	64,1	10330
5	10,1	64,1	11410
6	15,9	65,7	-
7	16	66	-
8	12,5	70,9	11652
9	10,5	81	16567
10	11	84,4	13104
11	10,7	94,5	14107
12	15,6	104,1	-
MÉDIA	13,5	71,9	12862
DP	2,5	15,8	2250
CV (%)	18,7	21,9	18

Fonte: Autora (2022).

4.4.5.2 Lamelado colado com fibra carbono (LCFC)

Os resultados de resistência à flexão e módulo de elasticidade, dos lamelados com as seções transversais de 5 cm x 5 cm e de 4 cm x 4 cm, são apresentados nas Tabelas 27 e 28, respectivamente. Foram ensaiados um total de 18 corpos de prova.

A média da resistência para a seção de 5 cm x 5 cm foi de 115,4 MPa, tendo um aumento percentual de 17,1% em relação ao LSFC (98,6 MPa), esse aumento foi estatisticamente significativo, $F(6,1) > F$ crítico (4,7). Em relação ao maciço (69,2 MPa) o aumento foi maior, 66,8%, a análise de variância ANOVA também indicou diferença estatística significativa, $F(53,2) > F$ crítico (4,8).

Tabela 27 - Resistência à flexão dos corpos de prova lamelados com fibra (LCFC) com seção transversal de 5 cm x 5 cm.

CP	U (%)	f_m (MPa)
1	17,3	103,7
2	15,8	103,7
3	15,8	103,7
4	18,1	116,6
5	16,4	116,6
6	16,2	131,8
7	16,2	131,8
MÉDIA	16,55	115,41
DP	0,85	12,59
CV (%)	5,13	10,91

Fonte: Autora (2022).

Para a seção transversal de 4 cm x 4 cm, a média da resistência à flexão foi 68,6 MPa, sendo a média dos módulos de cinco corpos de prova 12.854 MPa. Comparando com o LSFC com a mesma seção (71,9 MPa), o LCFC (68,2 MPa) apresentou uma redução de 4,6%, sendo a diferença entre os módulos de elasticidade menor que 0,1%. Analisando as duas amostras através do teste estatístico ANOVA não houve diferença estatística entre o LSFC e o LCFC, pois $F(0,39) < F$ crítico (4,32).

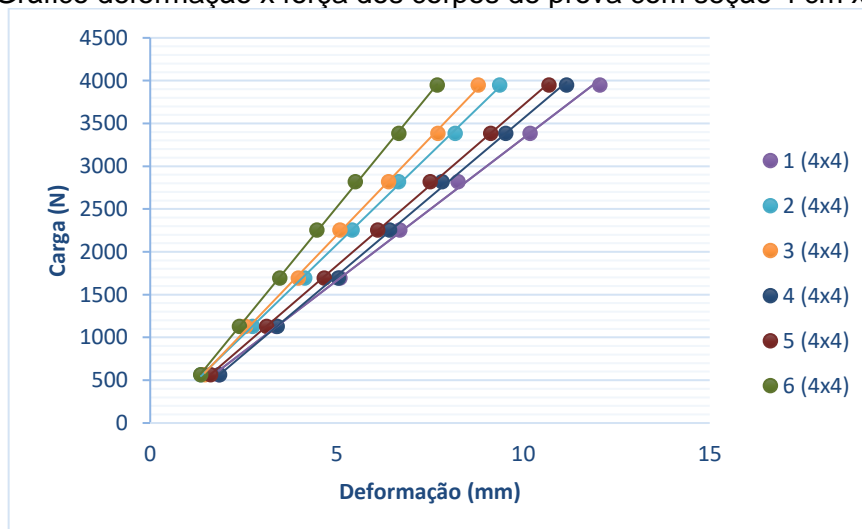
Tabela 28 - Resistência à flexão dos corpos de prova lamelados com fibra (LCFC) com seção transversal de 4 cm x4 cm.

CP	U (%)	f_m (MPa)	E_0 (MPa)
1	16,2	48,3	
2	15,1	64,1	13069
3	16,2	64,1	12831
4	15	67,6	-
5	15,6	70	-
6	15	70,9	11235
7	11,2	70,9	14033
8	14,7	72,4	-
9	16,3	74,3	13102
10	15,1	75,9	-
11	16,3	76,4	-
MÉDIA	15,2	68,6	12854
DP	1,5	7,9	169
CV (%)	9,6	11,6	1

Fonte: Autora (2022).

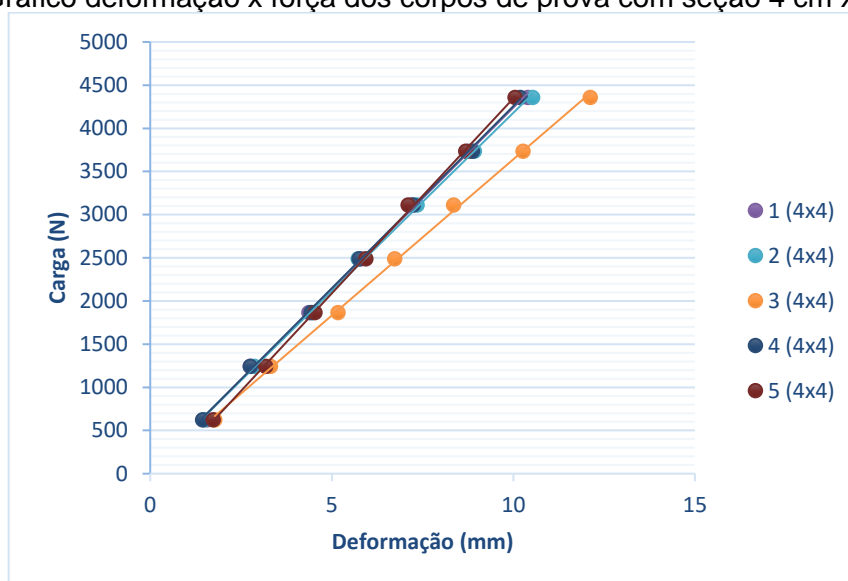
As Figuras 60 e 61 apresentam os resultados das cargas (N) e dos deslocamentos verticais (mm) no meio do vão até 70% da carga de ruptura, considerando a fase elástica no intervalo de 10% e 40%.

Figura 60 – Gráfico deformação x força dos corpos de prova com seção 4 cm x 4 cm (LSFC).



Fonte: Autora (2022).

Figura 61 - Gráfico deformação x força dos corpos de prova com seção 4 cm x 4 cm (LCFC).



Fonte: Autora (2022).

Observa-se um comportamento linear de deflexão de carga, cuja falha típica foi de tração na parte inferior. Fato também relatado por Brunetti *et al.* (2019) que expuseram diferença de comportamento entre vigas reforçadas e não reforçadas, sendo o comportamento com reforço caracterizado por curvas com uma fase não linear, evidenciando ductilidade.

Todavia, Basterra *et al.* (2017) afirmaram que todas as vigas de MLC, independente de reforço, apresentaram comportamento essencialmente elástico linear até a ruptura, com a falha iniciando em defeitos ou irregularidades da madeira. Esse comportamento foi observado para os resultados apresentados (Figuras 60 e 61).

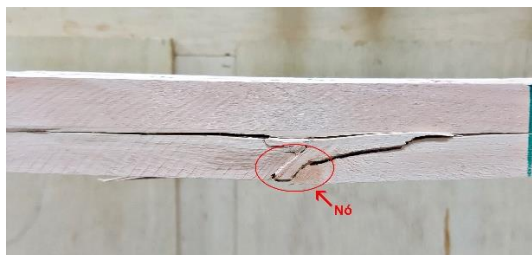
Vale ressaltar que a diferença de comportamento entre as peças LSFC e LCFC não foi percebida, pois a localização da fibra de carbono não foi para reforçar a peça, mas para avaliar se o adesivo poliuretano à base de mamona seria capaz de colar a fibra à madeira, sendo a fibra colocada na linha de cola.

4.4.5.3 Rupturas

A Figura 62 apresenta a presença de defeitos (nós) em algumas peças de MLC, tais defeitos, como previsto, exerceram influência na ruptura, de modo que ela se iniciou no defeito.

Figura 62 – Nós presentes nas peças lameladas.

(A) LSFC



(B) LCFC



Fonte: Autora (2022).

As lamelas para compor a MLC foram escolhidas com base na classificação visual das peças, visto que tal classificação promove a seleção das peças. Todavia, por se tratar de madeira jovem com diâmetro da tora pequeno, não foi possível eliminar os defeitos e nem descartar as lamelas com a presença de nós em locais desfavoráveis, pois o descarte seria maior que o aproveitamento, prejudicando o cunho sustentável que a madeira favorece.

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

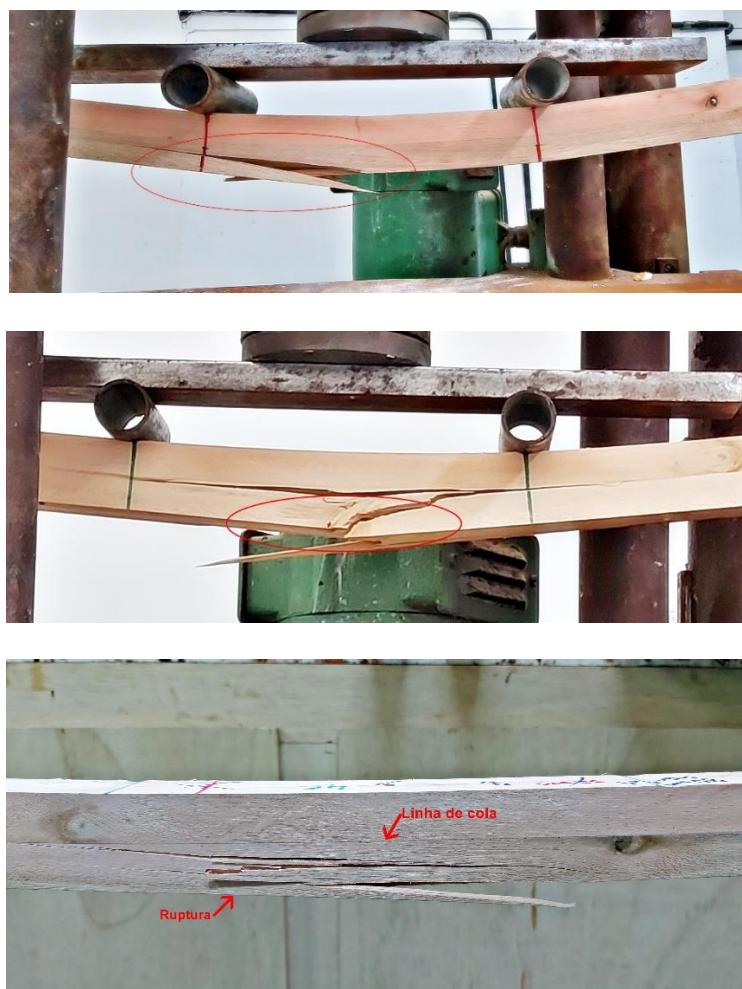
Mesmo assim, observou-se que com a laminação, os defeitos foram mais distribuídos, criando uma peça mais uniformizada, que é obtida por meio da classificação visual e mecânica da peça, de modo que é feita a seleção e melhor posicionamento de lamelas na seção transversal em função da sua classificação.

Esse aspecto promove a melhoria do produto engenheirado, conforme afirmam os autores Nadir e Nagarajan (2014), cuja técnica de colagem é eficaz para reduzir ou eliminar as propriedades negativas das madeiras de florestas plantadas.

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

A Figura 63 apresenta rupturas típicas dos corpos de prova, caracterizadas por falha típica de tração na parte inferior, e na presença de defeitos, a falha foi iniciada a partir de nós.

Figura 63 - Rupturas dos corpos de prova à flexão de 4 pontos.



Fonte: Autora (2022).

O mesmo comportamento de ruptura foi relatado por Brunetti *et al.* (2019) e por Basterra *et al.* (2017) que também não observaram falhas de adesão encontradas na linha de cola.

Pode-se observar que a ruptura não se deu na linha de cola, tanto para o LSFC e para o LCFC, assim como o comportamento de ruptura foi semelhante ao corpo de prova maciço. Khelifa *et al.* (2013) descreveram uma continuidade cinemática entre adesivo e madeira dos elementos à flexão com reforço de fibra de carbono. Fato observado nas rupturas (Figura 63), cuja falha se deu na madeira.

5 CONCLUSÕES

Considerando resultados obtidos por meio do programa experimental foi possível concluir que:

- a densidade da madeira do clone COP 1404 encontrada tanto por meio do documento 3 da ABNT NBR 7190 (2022) quanto pelo documento 2 da ABNT NBR 7190-2 (2022) está dentro da faixa da densidade recomendada para a produção de MLC;
- a madeira do clone COP 1404 apresentou boa estabilidade dimensional, mostrando-se como uma boa opção para ser empregada na construção civil. Além disso, as distorções dimensionais estavam dentro dos parâmetros aceitáveis, mostrando boa estabilidade da madeira em relação a empenos, rachas e torcidos;
- a classificação predominante das lamelas por meio da densidade característica foi classe 3, de modo que classificou a madeira como D24. Com base no módulo de elasticidade, a classificação predominante para lamelas de 2 cm foi classe 3 e para lamelas de 3 cm foi classe 1;
- o clone COP 1404 guardou semelhanças com as propriedades do Eucalipto de origem *urophylla* (D40);
- o adesivo poliuretano à base de mamona foi eficiente na colagem da madeira do clone COP 1404 (LSFC), de modo que o cisalhamento ocorreu na madeira. Fato também ocorrido para o LCFC, que teve sua ruptura também na madeira, no ensaio de cisalhamento na linha de cola;
- o ensaio de cisalhamento realizado conforme o documento 4 da NBR 7190 para o LSFC e o LCFC indicou o comportamento de um corpo único, semelhante ao maciço, cuja ruptura caracterizou-se por tração nas fibras inferiores no meio do corpo de prova;
- no ensaio de compressão paralela o LSFC se comportou com um corpo maciço, assim como o LCFC, de modo que não houve diferença estatística entre eles;
- no que se refere à aderência do adesivo, baseando-se nas três verificações (cisalhamento paralelo às fibras, compressão paralela às fibras e flexão), foi

eficiente, visto que a ruptura não ocorreu na linha de cola e os corpos de prova comportaram-se como uma peça única;

- a fibra de carbono aderiu à madeira através do adesivo poliuretano bicomponente;
- o adesivo poliuretano mostrou-se eficiente para a colagem tanto da madeira da espécie clonal COP 1404, quanto da fibra de carbono.
- as resistências à flexão de 3 pontos do LSFC e do LCFC não apresentaram diferenças, pois a posição da fibra não foi favorável ao ganho de resistência. Entretanto, também, constatou-se comportamento de um corpo de prova maciço, de maneira que a linha de cola não provocou descontinuidade da peça;
- as resistências à flexão de 4 pontos do LSFC e do LCFC não diferiram estatisticamente entre si, para a seção transversal de 4 cm x 4 cm, para a seção de 5 cm x 5 cm houve uma pequena diferença estatística. Em relação ao maciço, tanto LSFC e o LCFC apresentaram diferença estatística significativa. Entretanto o modo de ruptura foi o mesmo, falha típica de tração da parte inferior;
- o desempenho mecânico da MLC produzida através da madeira COP 1404 foi satisfatório, de modo que essa madeira se mostrou adequada à colagem;
- em relação aos defeitos presentes no clone COP 1404, existem duas opções de uso: na madeira engenheirada, pode-se eliminar os nós e reconstituir os segmentos, através das emendas denteadas (*finger joint*); na madeira sem a retirada dos nós, pode-se destinar as peças para elementos estruturais menos solicitados.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados obtidos, identificou-se vertentes para ampliação do conhecimento acerca da espécie clonal COP 1404, assim como parâmetros relacionados à produção da madeira lamelada colada a serem aprofundados. Por isso, recomenda-se:

- avaliar o comportamento da madeira do COP 1404 e da MLC à tração paralela e normal às fibras;
- investigação da aderência de tratamentos preservativos à madeira COP 1404;
- investigação de tratamentos contra o fogo aplicados à madeira COP 1404;

- avaliação da delaminação das linhas de cola da MLC feita com a madeira COP 1404;
- avaliação da aderência do adesivo poliuretano à base de mamona na madeira COP 1404 com tratamento preservante;
- avaliação de diferentes gramaturas de adesivo no desempenho da MLC feita da madeira COP 1404;
- avaliação de diferentes pressões de colagem para MLC da madeira COP 1404;
- investigação do desempenho de emendas denteadas (*finger joint*) da madeira COP 1404 com e sem fibra de carbono;
- avaliar diferentes posicionamentos da fibra de carbono na peça de MLC com o objetivo de promover o reforço;
- desenvolvimento de modelagem computacional para análise de comportamento da MLC da espécie COP 1404.

REFERÊNCIAS

- ANDOR, K.; LENGYEL, A.; POLGÁR, R.; FODOR, T.; KARÁCSONYI, Z.. Experimental and statistical analysis of spruce timber beams reinforced with CFRP fabric. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 99, p. 200-207, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.026>.
- ANDRÉ, A.; KLIGER, R.; OLSSON, R.. Compression failure mechanism in small-scale wood specimens reinforced with CFRP: an experimental study. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 41, p. 790-800, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.038>.
- ASSIS, Teotônio Francisco de. **ESTRATÉGIAS DE MELHORAMENTO PARA A OBTENÇÃO DE MADEIRA DE QUALIDADE PARA LAMINAÇÃO E SERRARIA**. [S.I.]: Klabin Riocell, 2007. 18 p.
- ASSIS, Teotônio Francisco de; ABAD, Júpter Israel Muro; AGUIAR, Aurélio Mendes. Melhoramento Genético do Eucalipto. In: VIERA, Márcio; SCHUMACHER, Mauro Valdir. **Silvicultura do Eucalipto no Brasil**. [S.I.]: Editora Ufsm, 2016. Cap. 7. p. 225-247.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 81 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-2: NBR7190-2: Projeto de estruturas de madeira - Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 15 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-3: NBR7190-3: Projeto de estruturas de madeira - Parte 2: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 42 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-4: NBR7190-4: Projeto de estruturas de madeira - Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização peças estruturais**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 19 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-6: NBR7190-6: Projeto de estruturas de madeira - Parte 6: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Por dentro do eucalipto**. [S.I.]: Abraf, 2012. 14 p.
- AZAMBUJA, Maximiliano dos Anjos. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. 159 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- BAHIA SPECIALTY CELLULOSE (BSC); COPENER FLORESTAL (org.). **Relatório de Sustentabilidade**. [S.I.]: Bsc/copener, 2013. 80 p.

- BALMORI, J.A.; BRANCO, J.M.; BASTERRA, L.A.. Behaviour of the adhesive bond between low-grade wood and GFRP reinforcements using epoxy resin. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 271, p. 121516, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121516>.
- BASTERRA, L.A.; BALMORI, J.A.; MORILLAS, L.; ACUÑA, L.; CASADO, M.. Internal reinforcement of laminated duo beams of low-grade timber with GFRP sheets. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 154, p. 914-920, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.007>.
- BELTRAME, R.; PERES, M. L. ; DELUCIS, R. A.; FREITAS, D. L.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R.. Tensões de crescimento longitudinais e propriedades mecânicas da madeira de clones de Eucalyptus spp. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 20, n. 4, p. 1061-1074, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620150004.0108>.
- BIANCHE, Juliana Jerásio *et al.* Cisalhamento na Linha de Cola de Eucalyptus sp. Colado com Diferentes Adesivos e Diferentes Gramaturas. **Floresta e Ambiente**, Viçosa, Mg, v. 24, n. 00077114, p. 1-9, 2017.
- BIANCHI, Natália Andrade. **Avaliação da delaminação e da resistência da linha de cola de elementos de MLC com base no projeto de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013 considerando madeiras de reflorestamento tratadas com CCA e sem tratamento preservativo**. 2020. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.
- BRACELL. **Processo produtivo do eucalipto**. Disponível em: <https://bracell.com/nossos-negocios/operacoes-florestais/>. Acesso em: 15 out. 2020.
- BRUNETTI, Michele; CHRISTOVASILIS, Ioannis P; MICHELONI, Michelangelo; NOCETTI, Michela; PIZZO, Benedetto. Production feasibility and performance of carbon fibre reinforced glulam beams manufactured with polyurethane adhesive. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 156, p. 212-219, jan. 2019.
- CALIL NETO, Carlito. A Madeira Laminada Colada. **Revista da Madeira**, Caxias do Sul, v. 124, p.1-5, jul. 2010. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>, 2010>. Acesso em: 19 set. 2019.
- CALIL NETO, Carlito. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciências de Materiais, Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- CALIL NETO, Carlito; CHRISTOFORO, André Luis; RIBEIRO FILHO, Sérgio Luiz Moni; LAHR, Francisco Antonio Rocco; CALIL JUNIOR, Carlito. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E À DELAMINAÇÃO EM MADEIRA LAMINADA COLADA. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 4, p. 987-994, dez. 2014.
- CARRASCO, Edgar Vladimiro Mantilla. **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada (MLC)**. 1989. 347 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.
- CARREIRA, Marcelo Rodrigo. **Crítérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus sp.** 2003. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de

Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2003.
doi:10.11606/D.18.2003.tde-02082003-215557. Acesso em: 2022-08-18.

CERCHIARI, Aline Maria Faria. **Aprimoramento do poliuretano a base de óleo de mamona na manufatura de Madeira Laminada Colada (MLC) de Cupressus lusitanica, Corymbia maculata e Hevea brasiliensis**. 2013. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

COSTA, Bruna Viana; CHAHUD, Eduardo; VAZ, Joana Valle Quintão; MAGALHÃES, Luciana Nunes de; NEVES, Peterson Lopes. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO EUCALIPTO GRANDIS COM A UTILIZAÇÃO DE ADESIVOS À BASE DE RESINA MENANINA E URÉIA E À BASE DE EMULSÃO ACRÍLICA POLIMERIZADA COM ISOCIANATO. **Revista Construindo**, Belo Horizonte, v. 10, n. 01, p. 92-99, jan. 2018.

DONADON, Bruno F.; MASCIA, Nilson T.; VILELA, Ramon; TRAUTWEIN, Leandro M.. Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 202, p. 109818-109829, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109818>.

FERREIRA, André Dominghetti; SERRA, Ademar Pereira; MELOTTO, Alex Marcel; BUNGENSTAB, Davi José; LAURA, Valdemir Antônio. Manejo das árvores e propriedades da madeira em sistema de ILPF com eucalipto. In: EMBRAPA (Distrito Federal). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília: Embrapa, 2019. Cap. 28. p. 455-471.

FERREIRA, Ruan L.s.; ANJOS, Marcos A.s.; NÓBREGA, Andreza K.C.; PEREIRA, Jéssyca E.s.; LEDESMA, E.F.. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 208, p. 601-612, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.058>.

FIBERTEX LOUVEIRA PRODUTOS TÊXTEIS LTDA. **Informações de produto**. Louveira: Fibertex, 2018. 1 p.

FIORELLI, Juliano. **Utilização de Fibras de Carbono e de Fibras de Vidro para reforço de vigas de madeira**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FIORELLI, Juliano. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

GITHIOMI, Jk; KARIUKI, Jg. (2010, January). Wood basic density of eucalyptus grandis from plantations in central rift valley, kenya: variation with age, height level and between sapwood and heartwood. **Journal Of Tropical Forest Science**, 3 (22), 281-286.

HÄNSEL, Andreas; SANDAK, Jakub; SANDAK, Anna; MAI, Juana; NIEMZ, Peter. Selected previous findings on the factors influencing the gluing quality of solid wood products in timber construction and possible developments: a review. **Wood Material Science & Engineering**, [S.L.], v. 17, n. 3, p. 230-241, 12 maio 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2021.1925963>.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **RELATÓRIO ANUAL**. São Paulo: Ibá, 2019. 80 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **RELATÓRIO ANUAL**. São Paulo: Ibá, 2020. 66 p.

JESUS, José Manoel Henriques de. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamonha em Madeira Laminada Colada (MLC)**. 2000. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

KHELIFA, M.; LOPERENA, N. Vila; BLERON, L.; KHENNANE, A.. Analysis of CFRP-strengthened timber beams. *Journal Of Adhesion Science And Technology*, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 1-14, 9 jul. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2013.815096>.

KHELIFA, M.; AUCHET, S.; MÉAUSOONE, P.-J.; CELZARD, A.. Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 101, p. 364-375, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.046>.

LATORRACA, João Vicente de F.; ALBUQUERQUE, Carlos Eduardo C. de. EFEITO DO RÁPIDO CRESCIMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES DA MADEIRA. **Floresta e Ambiente**, [S.I.], v. 7, n. 1, p. 279-291, dez. 2000.

LIMA, Celiana Kátia Pereira; MORI, Fábio Akira; MENDES, Lourival Marin; CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira. CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS E QUÍMICA DA MADEIRA DE CLONES DE Eucalyptus 123 E SUA INFLUÊNCIA NA COLAGEM. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 123-129, abr. 2007.

LIMA, Israel Luiz de; STAPE, José Luiz. Caracterização da madeira serrada em clones de Eucalyptus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S.L.], v. 37, n. 89, p. 55-62, 31 mar. 2017. Embrapa Florestas. <http://dx.doi.org/10.4336/2017.pfb.37.89.1113>.

LING, Zhibin; YANG, Huifeng; LIU, Weiqing; ZHU, Shijun; CHEN, Xin. Local bond stress-slip relationships between glue laminated timber and epoxy bonded-in GFRP rod. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 170, p. 1-12, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.052>.

LING, Zhibin; LIU, Weiqing; SHAO, Jingsong. Experimental and theoretical investigation on shear behaviour of small-scale timber beams strengthened with Fiber-Reinforced Polymer composites. **Composite Structures**, [S.L.], v. 240, p. 111989, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111989>.

LU, Weidong; LING, Zhibin; GENG, Qifan; LIU, Weiqing; YANG, Huifeng; YUE, Kong. Study on flexural behaviour of glulam beams reinforced by Near Surface Mounted (NSM) CFRP laminates. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 91, p. 23-31, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.050>.

MATOS, Gabriela da Silva; MOLINA, Julio Cesar. Resistência da madeira ao cisalhamento paralelo às fibras segundo as normas ABNT NBR 7190: 1997 e iso 13910. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 1069-1079, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160004.0098>.

MIOTTO, José Luiz. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 357 f. Tese

(Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, 2009.

NADIR, Yashida; NAGARAJAN, Praveen. The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber wood. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 55, p. 398-405, mar. 2014. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.032>.

NADIR, Yashida; NAGARAJAN, Praveen; AMEEN, Mohammed; M, Muhammed Arif. Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 112, p. 547-555, jun. 2016. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>.

NOGUEIRA, Rodrigo de Souza. **Proposta de um método de ensaio para controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL**. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

OLIVEIRA, José Tarcísio da Silva; HELLMEISTER, João Cesar, TOMAZELLO FILHO, Mário. 2005. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, 29, (1), 115-127.
<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622005000100013>.

PALMA, Hernando Alfonso Lara; BALLARIN, Adriano Wagner. Propriedades de contração na madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. *Scientia Forestalis*, [s. l.], v. 64, n. [], p. 13-22, dez. 2003. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/67547>. Acesso em: 30 jul. 2022.

PAMAR, J. Dhanraj; NAIK, B. Balu; LATHA, O. Hema; AHMED, G.M. Sayeed. Experimental Investigation of Bi Directional Carbon Fiber Composite. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 2, n. 4-5, p. 3008-3016, 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.285>.

PAULINO, Patrícia da Silva; LIMA, Israel Luiz de. Densidade básica e dimensões celulares da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla*, aos oito anos de idade. **Revista Ciência da Madeira - Rcm**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 9-18, 1 mar. 2018. *Revista de Ciência de Madeira*. <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n1p9-18>.

PETRAUSKI, Sandra Maria Ferreira Couri; CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira; PETRAUSKI, Mateus Couri; PETRAUSKI, Alfredo. Avaliação de juntas coladas com adesivos poliuretanos. **Remade: Revista da Madeira**, [S.L.], v. 125, n. [], p. 1-10, nov. 2010. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1495&subject=Adesi-vo&title=Avalia%E7%E3o%20de%20juntas%20coladas%20com%20adesivos%20poliuretanos. Acesso em: 22 out. 2020.

PLEVRIS, Nikolaos; TRIANTAFILLOU, Thanasis C.. FRP-Reinforced Wood as Structural Material. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 300-317, ago. 1992. American Society of Civil Engineers (ASCE).
[http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(1992\)4:3\(300\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(1992)4:3(300)).

RAFTERY, Gary M.; WHELAN, Conor. Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 52, p. 209-220, fev. 2014. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.044>.

RAFTERY, Gary M.; RODD, Peter D.. FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 91, p. 116-125, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.026>.

RESCALVO, Francisco J.; TIMBOLMAS, Cristian; BRAVO, Rafael; VALVERDE-PALACIOS, Ignacio; GALLEGO, Antolino. Improving ductility and bending features of poplar glued laminated beams by means of embedded carbon material. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 304, p. 124469, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124469>.

REZENDE, Marcos Antonio de; SAGLIETTI, José Roberto Corrêa; GUERRINI, Ivan Amaral. 1995. **Estudo das interrelações entre massa específica, retratibilidade e umidade da madeira do Pinus caribaea var. hondurensis aos 8 anos de idade**. Ipef: Research Paper, 49, (48), 133-141.

ROCHA, Maria Fernanda Vieira. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de Eucalyptus grandis x Eucalyptus camaldulensis para energia**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

SANTOS, Arthur Cabeçoni dos et al. FORMIGAS CORTADEIRAS NA CULTURA DO EUCALIPTO. **Revista Conexão Eletrônica**, Três Lagoas, v. 14, n. 1, p. 535-547, [S.l.] 2017.

SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcântara; GONÇALVES, Fabricio Gomes; GAVA, Geanine Costa; TINTI, Vinícius Peixoto; ALVES, Sabrina Daré; REGAZZI, Adair José. Eficiência da colagem de madeira tratada de Eucalyptus cloeziana F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Matéria** (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 22, n. 2, p. 1-13, 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170002.0140>.

SENA-CRUZ, José; JORGE, Marco; BRANCO, Jorge M.; CUNHA, Vítor M.C.F.. Bond between glulam and NSM CFRP laminates. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 40, p. 260-269, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.089>.

SERPA, Pedro Nicolau; VITAL, Benedito Rocha. 2005. Propriedades da madeira de Pinus elliottii. **Revista da Madeira**, 89, 1-5. http://www.remade.com.br/br/revistada-madeira_materia.php?num=735&subject=Pinus&title=Propriedades.

SILVA, Gabriel Alcântara Dourado de Oliveira e. **Reforço de cavilhas de madeira com resina polimérica e fibra de carbono para aplicação estrutural**. 2020. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

SILVA, Julia Cruz da. (2018). **Parâmetros Construtivos Para Painéis Verticais Adaptados Do Sistema Wood Frame em Madeira de Eucalipto Jovem**. [dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia]. <https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/29237>.

SOUTO, Felipe; CALADO, Veronica; PEREIRA JUNIOR, Nei. Fibras de carbono a partir de lignina: uma revisão da literatura. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 100-114, mar. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620150001.0012>.

SUN, Xiaofeng; HE, Minjuan; LI, Zheng. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: state-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 249, p. 118751, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118751>.

SVITÁK, Martin; RUMAN, Daniel. TENSILE-SHEAR STRENGTH OF LAYERED WOOD REINFORCED BY CARBON MATERIALS. **Wood Research**, Czech Republic, v. 62, n. 2, p. 243-252, maio 2017.



THORHALLSSON, Eythor Rafn; HINRIKSSON, Gudmundur Ingi; SNÆBJÖRNSON, Jonas Thor. Strength and stiffness of glulam beams reinforced with glass and basalt fibres. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 115, p. 300-307, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.074>.

VAHEDIAN, Abbas; SHRESTHA, Rijun; CREWS, Keith. Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: full-scale experiments. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 164, p. 377-389, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.007>.

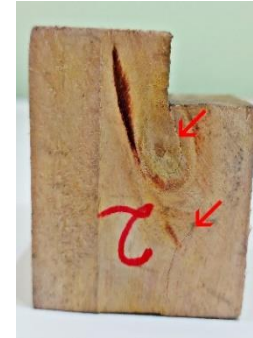
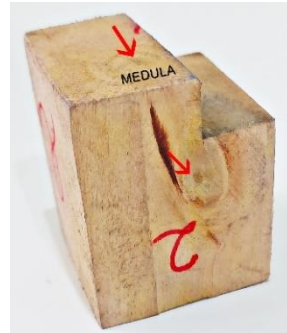
WANG, Yuzhuo; HOU, Qian; XU, Tianguai; QU, Shuang; ZHANG, Bingjie. The bending-shear behaviors of steel reinforced fast-growing poplar glulam beams with different shear-span ratios. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 300, p. 124008, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124008>.

YANG, Huifeng; LIU, Weiqing; LU, Weidong; ZHU, Shijun; GENG, Qifan. Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: experimental and theoretical evaluation. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 106, p. 550-563, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.135>.

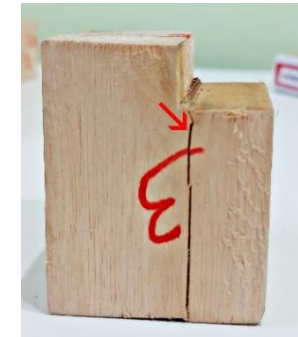
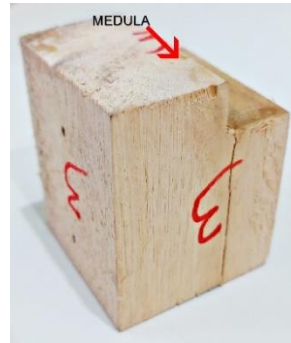
APÊNDICE A – Descrição dos defeitos dos corpos de prova.

AMOSTRAS	DESCRIÇÃO	
1	<p>Presença de medula. Nó na parte frontal (larg. 10,36 mm e comp. 17,09 mm). Nó na parte inferior (larg. 8,76 mm e comp. 12,57 mm)</p>	
2	<p>Composto em sua maior parte por albuno, não apresentou defeitos</p>	

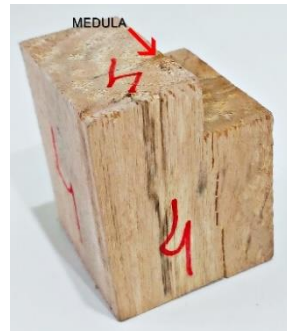
3 Presença de medula. Nó (larg. 11,76 mm e comp. 18,46 mm) em uma lateral.



4 Presença de medula.

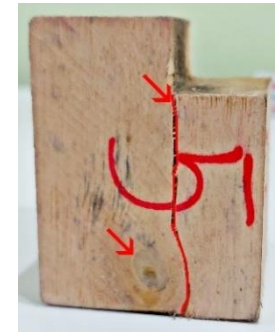
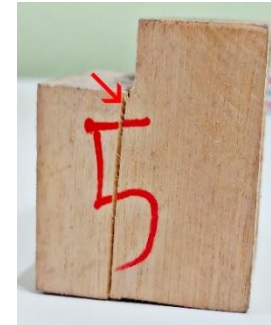
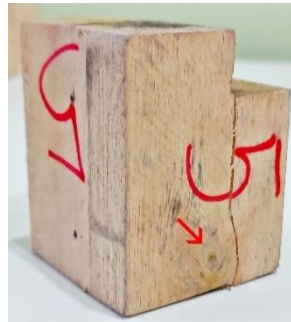


5 Presença de medula.



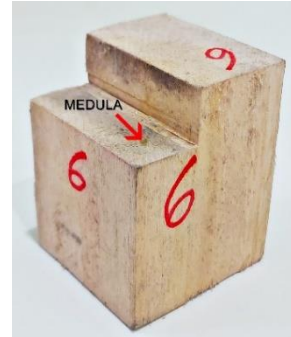
6

Presença de medula. Nó em uma lateral (larg. 6,75 mm e comp. 9,78 mm). A ruptura foi influenciada pelo nó.



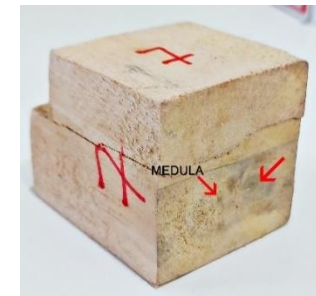
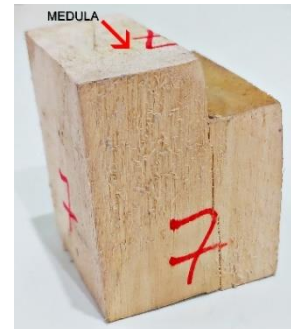
7

Presença de medula. Composto em sua maior parte de cerne.



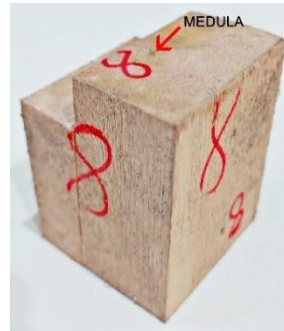
8

Presença de medula. Nó na parte inferior (larg. 7,38 mm e comp. 11,74 mm).



9

Presença de medula. Nó em uma lateral (larg. 8,15 mm e comp. 12,10 mm).



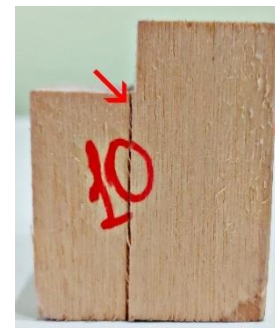
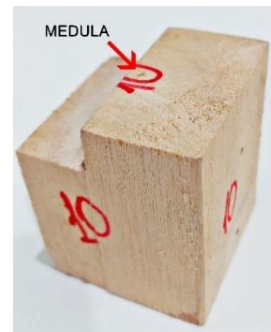
10

Presença de medula. Nó presente em duas faces, inferior e fundo (larg. 10,97 mm e comp. 13,11 mm).



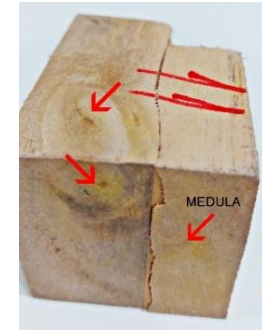
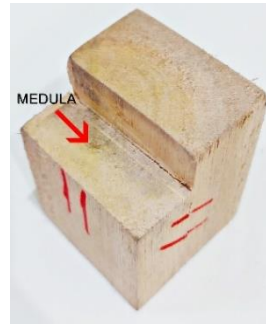
11

Presença de medula. Nó presente em uma lateral (larg. 6,34 mm e comp. 10,03 mm).



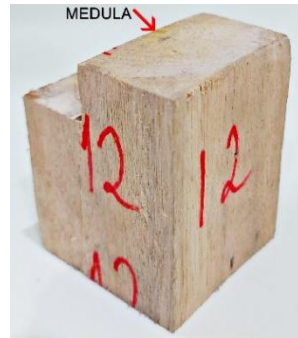
12

Presença de medula. Nó em uma lateral (larg. 15,68 mm e comp. 24,11 mm) e parte inferior (larg. 9,13 mm e comp. 8,47 mm).



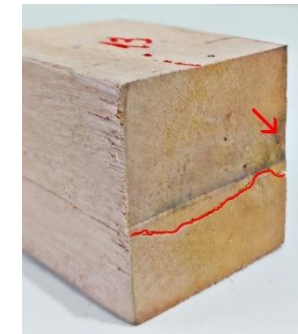
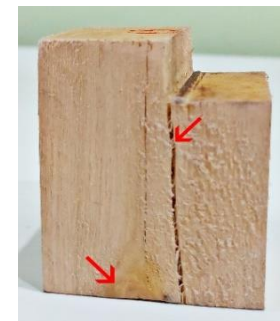
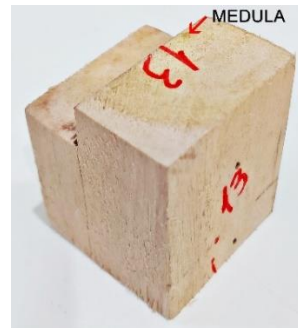
13

Presença de medula.



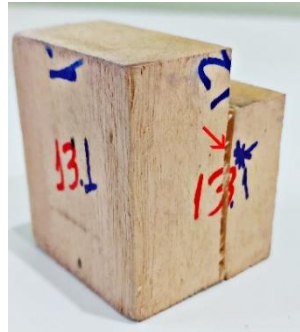
14

Presença de medula. Nó passando da lateral para a parte inferior (larg. 8,18 mm e comp. 7 mm).



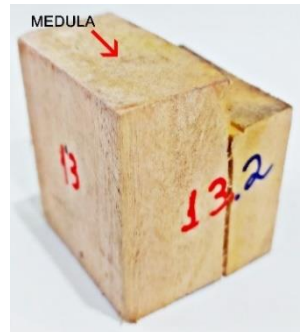
15

Nó na parte inferior (larg. 8,34 mm e comp. 11,34 mm). O nó influenciou na ruptura.



16

Presença de medula bem próxima ao nó. Nó na parte inferior (larg. 8,15 mm e comp. 9,38 mm).



17

Nó na parte inferior (larg. 12,39 mm e comp. 13,49 mm). Esse nó influenciou na ruptura. Além desse, nó na parte superior (larg. 9,11 mm e comp. 10,63 mm). Nó na parte lateral (larg. 8,77 mm e comp. 18,21 mm)

