



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LORENZO LUBE DOS SANTOS

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA

VITÓRIA – ES
2014

LORENZO LUBE DOS SANTOS

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil na Área de concentração Estruturas.

Orientador: Dr. Walnório Graça Ferreira

Coorientador: Dr. Macksuel Soares de Azevedo

VITÓRIA – ES

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Santos, Lorenzo Lube dos, 1988-
S237a Avaliação estrutural de vigas de madeira laminada colada /
Lorenzo Lube dos Santos. – 2014.
120 f. : il.

Orientador: Walnório Graça Ferreira.
Coorientador: Macksuel Soares de Azevedo.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Vigas de madeira. 2. Estruturas de madeira (Construção civil). 3.
Madeira. 4. Lâminas de madeira. 5. Madeira Laminada Colada (MLC).
I. Ferreira, Walnório Graça. II. Azevedo, Macksuel Soares de. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA

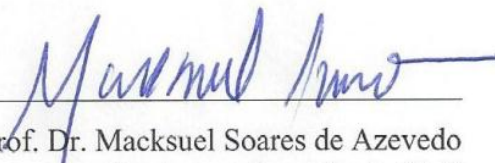
Lorenzo Lube dos Santos

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de

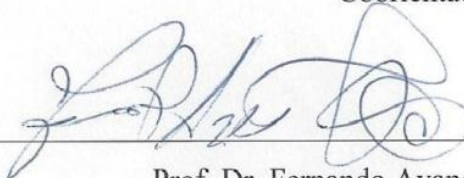
Aprovada no dia **29 de agosto de 2014** por:



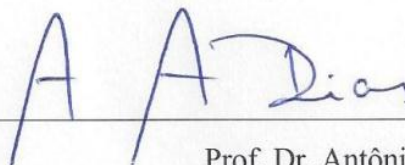
Prof. Dr. Walnório Graça Ferreira
Doutor em Engenharia Civil
Orientador - UFES



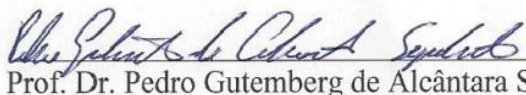
Prof. Dr. Macksuel Soares de Azevedo
Doutor em Engenharia Civil
Coorientador - UFES



Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão
Doutor em Engenharia Civil
Membro Interno - UFES



Prof. Dr. Antônio Alves Dias
Doutor em Engenharia Civil
Membro Externo - USP



Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho
Doutor em Engenharia Civil
Membro Externo - UFES

Aos meus familiares, amigos e mestres.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, pelos recursos disponibilizados e pela oportunidade gerada para a pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela bolsa de estudos concedida.

À REWOOD®, representada pelo Sr. Rogério Fujii, pela doação do material empregado nesta pesquisa.

À CARPINTERIA®, representada pelo Sr. Allan Dias, pelo intermédio e contribuição para a aquisição do material de pesquisa.

Aos amigos Valdir Cintra e Danielli Cintra, pelo apoio nas pesquisas e pela contribuição no transporte das vigas de São Paulo para a capital capixaba.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Walnório Graça Ferreira, por ter aceitado o desafio de iniciar uma pesquisa em estruturas de madeiras em um centro com pouca cultura de trabalho neste material.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Macksuel Soares de Azevedo, pelo apoio, amizade, incentivo, sugestões e pela orientação.

Ao Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, pela notória contribuição nas pesquisas experimentais.

Ao Prof. Fernando Avancini Tristão, por compartilhar valiosos conhecimentos e pela amizade sincera.

Ao amigo Antônio Mario Loriato, pela confiança e disposição para o trabalho, sem a qual nenhum dos ensaios teria sido realizado.

Ao todos os demais professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES pelos momentos de troca de informação e confraternização.

A todos os funcionários do Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção-LEMAC da UFES, que contribuíram direta ou indiretamente no desenvolvimento das pesquisas.

Agradeço a Deus, a minha família, parentes, amigos, e todos que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal.

“O que é preciso, em termos de Brasil, é antes de tudo mudar a mentalidade a respeito da madeira como material de emprego estrutural, mas acima de tudo, deixar de continuar empregando a madeira sem o menor cuidado ou até mesmo, sem o menor conhecimento da potencialidade de suas características físicas e mecânicas. É sem dúvida, o mau emprego de um material, o que mais contribui para a sua depreciação.”

Prof. Dr. Carlos Alberto Szücs.

RESUMO

SANTOS, Lorenzo Lube dos. **Avaliação Estrutural de Vigas de Madeira Laminada Colada**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. Orientador: Walnório Graça Ferreira. Coorientador: Macksuel Soares Azevedo.

Com a escassez de madeiras em dimensões apropriadas para projetos estruturais, uma técnica de adesão de peças de pequenas dimensões para constituição de vigas e pilares robustos foi desenvolvida e tem sido muito estudada em todo mundo. O produto gerado é a MLC - Madeira Laminada Colada, que possui uma série de exigências para sua confecção e determinados cuidados em sua aplicação. Com o objetivo de difundir o conhecimento a respeito deste material, foram avaliadas 24 vigas de MLC adquiridas no mercado brasileiro, sendo 12 confeccionadas com Lyptus® e as demais com *Pinus Elliotti*, madeiras de espécies exóticas oriundas de manejo florestal. O adesivo utilizado na colagem das lâminas de madeira foi à base de Emulsão de Polímero Isocianato – EPI com gramatura fixa de 180g.m^{-2} . Foram realizadas as devidas inspeções visuais nas vigas, assim como ensaios mecânicos em corpos de prova para verificação da resistência à compressão, à tração e ao cisalhamento tanto na madeira quanto no adesivo. As vigas foram avaliadas estruturalmente por métodos de ensaio dinâmicos, obtendo valores para os módulos de elasticidade dinâmicos, que foram comparados com os resultados obtidos pelo método tradicional de flexão estática. Após obtenção das características elásticas, as vigas foram sujeitas a ruptura, tendo as falhas sido avaliadas juntamente com o respectivo módulo de ruptura. De maneira geral, mesmo com desconformidades nas etapas de produção, as vigas de MLC analisadas obtiveram bons resultados e demonstraram que o material é um produto de potencial substituição da madeira maciça em estruturas de alto padrão.

Palavras chave: MLC; emenda denteada; linha de cola; ensaios dinâmicos; madeira.

ABSTRACT

SANTOS, Lorenzo Lube dos. **Evaluation of Structural Glued Laminated Timber Beams**. 2014. Dissertation (Magister Degree in Civil Engineering) – Federal University of Espírito Santo, Vitória, ES. Adviser: Walnório Graça Ferreira. Co-Adviser: Macksuel Soares Azevedo.

With the scarcity of wood in appropriate dimensions for structural designs, a technique of joining small pieces to establish robust pillars and beams was developed and has been extensively studied worldwide. The generated product is called Glulam - Glued Laminated Timber - which owns a number of requirements for their manufacture and certain care for their application. Aiming the spread of the knowledge about this material 24 glulam beams, acquired in the Brazilian market, were evaluated, among which 12 were made of Lyptus® and the other of Pinus Elliotti, exotic species woods arising from handling forest. The adhesive used for bonding the veneers was based on Emulsion Polymer Isocyanate - EPI - with the fixed weight of 180g.m⁻². Appropriate visual inspections were performed on the beams, as well as mechanical tests on specimens to verify the resistance to compression, traction and shear, both in wood and in the adhesive. The beams were structurally evaluated by non-destructive testing methods, obtaining values for the dynamic modules of elasticity which were compared with the results obtained by the traditional method of static bending. After obtaining the elastic characteristics, the beams are subject to breakage, having been evaluated failures along with their modulus of rupture. Overall, even with discontinuities in the stages of production, the analyzed glulam beams obtained good results and demonstrated that the material is a product of potential replacement for solid wood in structures of high standard.

Keywords: glulam; cog amendment; glue line; dynamic test; wood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Viga de madeira laminada colada.	9
Figura 2.2 – Emenda denteada.	14
Figura 3.1 – Dimensões das vigas solicitadas (cm)	22
Figura 3.2 – Estocagem e transporte das vigas de MLC.....	23
Figura 3.3 – Emenda localizada na mesma lâmina de madeira – Viga 03 de Eucalipto.....	25
Figura 3.4 – Emenda localizada na mesma lâmina de madeira – Viga 11 de Pinus.	25
Figura 3.5 – Detalhe de emendas sobrepostas da viga 04 de Eucalipto.....	26
Figura 3.6 – Parâmetros de dimensionamento das emendas	27
Figura 3.7 – Verificação do comprimento dos dentes das emendas.	27
Figura 3.8 – Variação de madeira de cerne (escura) e alburno (clara) de eucalipto.	30
Figura 3.9 – Anéis de crescimento da madeira de pinus.....	30
Figura 4.1 – Aparato de ensaio de cisalhamento na linha de cola.	34
Figura 4.2 – Configuração do corpo de prova de cisalhamento da linha de cola (medidas em milímetros).	35
Figura 4.3 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira (medidas em milímetros).	36
Figura 4.4 – Esquema de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras de madeira.	36
Figura 4.5 – Corpos de prova de cisalhamento na linha de cola e na madeira sólida.....	40
Figura 4.6 - Máquina universal de ensaios.....	40
Figura 4.7 - Aparato de cisalhamento.	41
Figura 4.8 – Exemplo de gráfico “ <i>boxplot</i> ”.....	42
Figura 4.9 – Apresentação da Tensão de Cisalhamento (MPa) no eucalipto em forma de “ <i>boxplot</i> ”. (LC= Linha de Cola; M=Madeira)	45
Figura 4.10 - Apresentação da tensão de cisalhamento (MPa) no pinus em forma de “ <i>boxplot</i> ”. (LC = Linha de Cola; M = Madeira).	47
Figura 4.11 – Malha utilizada para realizar a análise de falha na linha de cola.	50

Figura 4.12 – Percentual de falha na madeira.....	50
Figura 4.13 – Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola seca (E= Eucalipto; P = Pinus).....	51
Figura 4.14 – Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola saturada (E= Eucalipto; P = Pinus).	51
Figura 4.15 – Rupturas anômalas em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola saturada (E= Eucalipto; P = Pinus).....	52
Figura 5.1 – Dimensões em centímetros do corpo de prova de compressão paralela às fibras.	54
Figura 5.2 – Aparato de medição de deformação sugerido pela NBR 7190-97.	55
Figura 5.3 - Ciclo de aplicação de cargas para a compressão paralela às fibras.	56
Figura 5.4 – Equipamento de emissão de ondas ultrassônicas – PUNDIT Lab	59
Figura 5.5 – Corpos de prova de compressão paralela às fibras.	61
Figura 5.6 – Aparato de ensaio de compressão paralela às fibras.....	62
Figura 5.7 – Correlação entre o ensaio estático e dinâmico para a madeira de pinus.....	67
Figura 5.8 - Correlação entre o ensaio estático e dinâmico para a madeira de eucalipto.....	68
Figura 5.9 – Análise de ruptura de corpo de prova.	69
Figura 6.1 – Corpo de prova de tração paralela (A) às fibras da madeira e (B) à emenda denteada. Dimensões em centímetro.....	71
Figura 6.2 – Corpos de prova de tração paralela às fibras da madeira e da emenda denteada nas madeiras de pinus e eucalipto.	73
Figura 6.3 – Dispersão dos resultados de resistência a tração (EC= Emenda colada; M=Madeira).....	74
Figura 6.4 – Rompimento dos corpos de prova sujeitos a tração na emenda colada para (A) Pinus e (B) Eucalipto.	76
Figura 6.5 – Corpos de prova de eucalipto com variação de lenho.....	77
Figura 6.6 – Rompimento dos corpos de prova sujeitos a tração na madeira (A) Pinus e (B) Eucalipto.....	77

Figura 7.1 – Arranjo dos pontos nodais em uma viga bi-apoiada para ensaio de vibrações.....	80
Figura 7.2 – Arranjo de ensaio dinâmico por vibração transversal.....	80
Figura 7.3 – Arranjo de ensaio dinâmico por vibração longitudinal.....	82
Figura 7.4 – Esquema de ensaio de vibração por “ <i>Stress Wave Timer</i> ”.....	84
Figura 7.5 – Esquema de aplicação de carga nas vigas de MLC; P=Carregamento; DEC= Diagrama de Esforços Cortantes; DMF= Diagrama de Momento Fletor.....	85
Figura 7.6 – Posicionamento dos medidores de deformação.....	86
Figura 7.7 – Execução dos ensaios de vibração transversal (A) e longitudinal (B).	89
Figura 7.8 – Execução do ensaio de flexão estática.....	89
Figura 7.9 – Diagrama de carregamento por flecha ΔLb obtido na viga 1 de pinus.....	91
Figura 7.10 – Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estático para a madeira de Eucalipto.....	94
Figura 7.11 – Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estático para a madeira de Pinus.....	97
Figura A1 – Forma de ruptura da Viga 01 de Eucalipto.....	112
Figura A2 – Forma de ruptura da Viga 02 de Eucalipto	112
Figura A3 - Forma de ruptura da Viga 03 de Eucalipto	112
Figura A4 - Forma de ruptura da Viga 04 de Eucalipto	113
Figura A5 - Forma de ruptura da Viga 05 de Eucalipto	113
Figura A6 - Forma de ruptura da Viga 06 de Eucalipto	113
Figura A7 - Forma de ruptura da Viga 07 de Eucalipto	114
Figura A8 - Forma de ruptura da Viga 08 de Eucalipto	114
Figura A9 - Forma de ruptura da Viga 09 de Eucalipto	114
Figura A10 - Forma de ruptura da Viga 10 de Eucalipto	115
Figura A11 - Forma de ruptura da Viga 11 de Eucalipto	115
Figura A12 - Forma de ruptura da Viga 12 de Eucalipto	115
Figura B1 – Forma de ruptura da Viga 01 de Pinus	117
Figura B2 – Forma de ruptura da Viga 02 de Pinus	117
Figura B3 – Forma de ruptura da Viga 03 de Pinus	117
Figura B4 – Forma de ruptura da Viga 04 de Pinus	118

Figura B5 – Forma de ruptura da Viga 05 de Pinus	118
Figura B6 – Forma de ruptura da Viga 06 de Pinus	118
Figura B7 – Forma de ruptura da Viga 07 de Pinus	119
Figura B8 – Forma de ruptura da Viga 08 de Pinus	119
Figura B9 – Forma de ruptura da Viga 09 de Pinus	119
Figura B10 – Forma de ruptura da Viga 10 de Pinus	120
Figura B11 – Forma de ruptura da Viga 11 de Pinus	120
Figura B12 – Forma de ruptura da Viga 12 de Pinus	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Peso das vigas de Pinus (Kg).	32
Tabela 3.2 – Peso das vigas de Eucalipto (Kg).....	32
Tabela 4.1 – Quantidade de corpos de prova de cisalhamento para cada madeira e ensaio realizado.	39
Tabela 4.2 – Resultados do cisalhamento na madeira eucalipto.	44
Tabela 4.3 – Valor-p do pareamento de dados dos corpos de prova de eucalipto.....	46
Tabela 4.4 – Resultados do cisalhamento na madeira pinus.	47
Tabela 4.5 – Valor-p do pareamento de dados dos corpos de prova da madeira de pinus.....	48
Tabela 4.6 – Umidade média e resistência característica do cisalhamento nas madeiras de pinus e eucalipto.	49
Tabela 5.1 – Classes de resistência de madeiras coníferas.	58
Tabela 5.2 – Classes de resistência de madeiras folhosas.....	58
Tabela 5.3 – Quantidade de corpos de prova de compressão paralela às fibras para cada madeira e ensaio realizado.	61
Tabela 5.4 – Módulos de elasticidade obtidos para as madeiras de pinus e eucalipto com ensaio estático de compressão paralela às fibras e dinâmico longitudinal às fibras.....	65
Tabela 5.5 – Valor-p do pareamento de dados dos corpos de prova dos ensaios estático e dinâmico por ultrassom (Pundit Lab).....	67
Tabela 5.6 – Densidade aparente, umidade, resistência média à compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade das madeiras de pinus e eucalipto.	69
Tabela 6.1 – Quantidade de corpos de prova por madeira e ensaio realizado.	72
Tabela 6.2 – Resistência à tração paralela às fibras da madeira e à emenda colada.....	74
Tabela 6.3 – Tensão característica à tração referentes a U=12%.	75
Tabela 6.4 – Valor-p do pareamento de dados dos corpos de prova de tração na madeira e na emenda colada.	76

Tabela 7.1 - Resultados dos ensaios estático e dinâmico nas vigas de Eucalipto.....	92
Tabela 7.2 – Valor-p dos pareamentos de ensaios dinâmicos com o ensaio estático para a madeira de Eucalipto.	93
Tabela 7.3 - Resultados dos ensaios estático e dinâmico nas vigas de Pinus.....	95
Tabela 7.4 – Valor-p dos pareamentos de ensaios dinâmicos com o ensaio estático para a madeira de Pinus.	96

LISTA DE ABREVIÇÕES E SIMBOLOS

A	Área
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ASTM	American society for testing and materials
C_{LLVd}	Módulo de elasticidade dinâmico
CV	Coeficiente de variação
E_{c0}	Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras
$E_{c0,u}$	Módulo de elasticidade ultrassônico por PUNDIT LAB
$E_{c0,m}$	Módulo de elasticidade médio pela compressão paralela às fibras
E_D	Módulo de elasticidade dinâmico
E_E	Módulo de elasticidade estático
$E_{u\%}$	Módulo de elasticidade na umidade ensaiada
E_{12}	Módulo de elasticidade corrigido à 12% de umidade
E_{sw}	Módulo de elasticidade dinâmico pelo <i>Stress Wave Timer</i>
$E_{d_{trans}}$	Módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal
E_l	Módulo de elasticidade dinâmico por vibração longitudinal
E_M	Módulo de elasticidade à flexão
$F_{máx}$	Força máxima suportada pelo corpo de prova
H_0	Hipótese de nulidade estatística
$H_1 ; H_2$	Hipóteses alternativas
I	Momento de inércia
L	Comprimento da viga
L_v	Vão livre de ensaio
L_b	Trecho central da viga
M_S	Massa seca
M_u	Massa úmida
MLC	Madeira Laminada Colada
MOE	Módulo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura
NBR	Norma brasileira regulamentadora
P	Força aplicada

R	Deslocamentos dos relógios comparadores
R^2	Coefficiente de determinação
SQ_{res}	Soma dos quadrados dos resíduos
SQ_{total}	Soma dos quadrados totais
U%	Teor de umidade
V_{LLv}	Velocidade de propagação da onda
W	Peso da viga
b	Base da seção da viga
f_r	Frequência natural de vibração
f	Tensão de resistência
f_k	Resistência característica
f_n	Resistências dos “n” corpos de prova ensaiados
f_{12}	Resistência corrigida à 12% de umidade
$f_{u\%}$	Resistência na umidade u% ensaiada
$f_{c0,est}$	Resistência à compressão paralela às fibras estimada
$f_{c0,m}$	Resistência à compressão paralela às fibras média
$f_{c0,k}$	Resistência à compressão paralela às fibras característica
f_{t0}	Resistência à tração paralela às fibras
$f_{t0,k}$	Resistência à tração paralela às fibras característica
g	Aceleração da gravidade
h	Altura da seção da viga
l	Distancia entre fixação dos relógios
m	Massa do corpo de prova
v	Velocidade da onda na madeira
Δ_{Lb}	Flecha
Δl	Varição do comprimento aferida pelos relógios comparadores
δ	Densidade aparente da madeira
ρ	Densidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	Objetivo geral	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	HIPÓTESES	3
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	A UTILIZAÇÃO DA MADEIRA	5
2.2	A MADEIRA LAMINADA COLADA	8
2.2.1	Breve histórico da Madeira Laminada Colada.....	8
2.2.2	Definição	9
2.2.3	A escolha da madeira para a colagem.....	10
2.2.4	A escolha do adesivo aplicado na colagem	11
2.2.5	Confecção de elementos de Madeira Laminada Colada	13
2.2.6	Pesquisas recentes	15
2.2.7	Considerações da revisão bibliográfica.....	19
3	CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS VIGAS	21
3.1	INTRODUÇÃO	21
3.2	LIMITAÇÕES DE TRABALHO.....	21
3.3	CONFECÇÃO DAS VIGAS	23
3.4	CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS VIGAS	24
3.4.1	Distância entre emendas denteadas na mesma lâmina de madeira.	24
3.4.2	Distância entre emendas denteadas em lâminas adjacentes.....	26
3.4.3	Tamanho das emendas denteadas.....	26
3.4.4	Defeitos e tipos de lenho.	28
3.5	Controle de umidade e massa	31
4	ANÁLISE DO CISALHAMENTO NA MADEIRA E LINHA DE COLA	33
4.1	INTRODUÇÃO	33
4.2	MÉTODOS DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO	33
4.2.1	Cisalhamento na linha de cola.....	34
4.2.2	Cisalhamento nas fibras da madeira.....	35
4.3	CORPOS DE PROVA E ENSAIOS DE CISALHAMENTO	39

4.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	41
4.4.1	Gráfico de caixas – “ <i>Boxplot</i> ”	41
4.4.2	Teste t de médias	43
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.5.1	Resultados e discussão do cisalhamento na madeira de eucalipto.....	44
4.5.2	Resultados e discussão do cisalhamento na madeira de pinus	46
4.5.3	Resistência característica ao cisalhamento	49
4.6	ANÁLISE DE FALHA DO ADESIVO	50
5	ANÁLISE DA COMPRESSÃO NA MADEIRA	53
5.1	INTRODUÇÃO	53
5.2	MÉTODOS DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO.....	53
5.2.1	Compressão Paralela às Fibras	53
5.2.2	Classificação quanto à resistência das madeiras	57
5.2.3	Velocidade de pulsos ultrassonoros.....	59
5.3	CORPOS DE PROVA E ENSAIOS DE COMPRESSÃO.....	60
5.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	63
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
6	ANÁLISE DA TRAÇÃO NA MADEIRA E NA EMENDA COLADA	70
6.1	INTRODUÇÃO	70
6.2	MÉTODOS DE ENSAIOS DE TRAÇÃO	70
6.2.1	Tração paralela às fibras da madeira	70
6.2.2	Tração paralela às emendas denteadas	72
6.3	CORPOS DE PROVA E ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	72
6.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA	73
6.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
7	AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DAS VIGAS.....	78
7.1	INTRODUÇÃO	78
7.2	MÉTODOS DE ENSAIO	79
7.2.1	Ensaio de vibração transversal	79
7.2.2	Ensaio de vibração longitudinal.....	82
7.2.3	Ensaio de impacto por “stress wave”	83
7.2.4	Ensaio de flexão estática	85
7.2.4.1	Obtenção do módulo de elasticidade para flexão estática	86
7.2.4.2	Obtenção do módulo de ruptura	87
7.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	88

7.4 EXECUÇÃO E RESULTADOS.....	88
7.4.1 Resultados das vigas de Eucalipto	91
7.4.2 Resultados das vigas de Pinus	95
8 CONCLUSÕES.....	99
8.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	99
8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
9 REFERÊNCIAS	103
APENDICE A - Forma de ruptura das vigas de Eucalipto	111
APENDICE B - Forma de ruptura das vigas de Pinus.....	116

1 INTRODUÇÃO GERAL

O setor florestal brasileiro desempenhou forte crescimento nos últimos anos, alavancado com pesquisas que contribuem para desmistificar a utilização das madeiras na construção civil, seja nas utilizações menos nobres, como na produção de escoras, formas e tapumes de obras, ou para as mais nobres utilizações, como acabamentos internos, mobília fina e estruturas de edificações.

Sendo o Brasil um país de grande extensão territorial, de vasta diversidade climática e culturalmente ligado à produção vegetal, os sistemas de manejo florestal foram introduzidos e ganharam grande destaque mundial com o potencial produtivo. Atualmente o país tem destaque na produção de espécies exóticas, por proporcionar rápido crescimento, sendo um dos principais produtores do gênero arbóreo Eucalipto do mundo, impulsionado pelo mercado de produção de celulose e papel, que investe constantemente em pesquisas de melhoramento genético (BOSCHETTI, 2014).

Ainda assim, algumas espécies nativas brasileiras começaram a entrar em escassez no mercado. O principal motivo para isto é que, além da proteção governamental em determinadas espécies, alguns grupos vegetais demoram muitos anos para serem abatidos e transformados em produtos adequados para o consumo do mercado. Logo, a utilização de florestas exóticas plantadas para o suprimento do mercado antes ocupado pela exploração das florestas nativas tornou-se uma realidade para a maioria dos produtos de madeira.

No entanto, para a confecção de estruturas de madeira, é importante que, além de boas características físicas e mecânicas, a madeira possua dimensões muitas vezes superiores a dos indivíduos arbóreos oriundos das florestas exóticas plantadas. Foi para vencer esta limitação imposta pela dimensão natural das peças de madeira disponíveis no mercado que muitos pesquisadores têm depositado suas expectativas na Madeira Laminada Colada – MLC. Trata-se de um produto “engenheirado” obtido a partir da união de peças de madeiras de pequenas dimensões para a confecção de vigas ou pilares mais robustos, a partir da adesão com adesivos específicos, que devem suportar todos os esforços que a madeira maciça.

Atualmente, são poucas as empresas que confeccionam MLC no Brasil. O país ainda não possui uma norma específica que disponha dos métodos mais adequados para a sua produção, no entanto são muitos os pesquisadores que colaboraram com estudos a cerca do assunto. No estado do Espírito Santo, não há registro de nenhuma empresa produtora, muito menos obras cuja MLC tenha sido aplicada para qualquer finalidade estrutural.

O conhecimento do material e a difusão do conhecimento torna-se uma ferramenta de grande valia para que a MLC possa alcançar o mercado consumidor, visto que há uma real escassez da madeira serrada no mercado para a finalidade estrutural.

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A busca por novas técnicas construtivas e por materiais de construção mais adequados, seja pelas características físicas e mecânicas ou pela disponibilidade no mercado, vem incentivando as pesquisas com a MLC, que entrou no mercado brasileiro de forma inovadora e tem tendência de substituição da madeira maciça no futuro. O mercado capixaba ainda não utiliza o material, que já é produzido e utilizado em construções nos estados de São Paulo e Santa Catarina.

Este trabalho tem por pretensão difundir o conhecimento de MLC principalmente para a comunidade científica capixaba, demonstrando a potencialidade do material e como deve ser procedida uma análise estrutural.

Além disso, é proposta uma avaliação de métodos dinâmicos para a estimativa das características elásticas do material, que podem ser aplicadas em todas as peças antes mesmo que sejam utilizadas na construção. De certo, estes métodos economizam tempo e evitam desperdícios de material.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar estruturalmente 24 vigas de MLC, sendo 12 produzidas com Lyptus[®] e 12 com Pinus Eliotti, adquiridas e produzidas pelo mercado brasileiro.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar estudo sobre a MLC com base em pesquisas realizadas em todo o mundo e identificar os principais centros pesquisa;
- Avaliar as características visuais das peças de MLC adquiridas;
- Avaliar as propriedades mecânicas de compressão, cisalhamento e tração tanto da madeira quanto da linha de cola;
- Classificar as madeiras quanto à sua classe de resistência;
- Verificar a eficiência de métodos de ensaio dinâmicos para a avaliação das vigas e dos corpos de prova de compressão.

1.3 HIPÓTESES

As vigas de madeira laminada colada apresentam resistência satisfatória, tendo o seu módulo de elasticidade valores próximos àqueles das madeiras maciças.

A utilização de métodos dinâmicos facilitará a realização dos ensaios e proverá resultados similares àqueles obtidos pelos métodos estáticos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação classifica-se em uma pesquisa experimental qualitativa e quantitativa, sendo apresentada e dividida em nove capítulos.

No primeiro capítulo foram apresentadas as considerações fundamentais que norteiam esta pesquisa, a importância do estudo com madeiras e a organização geral da pesquisa.

No segundo capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica, a fim de realizar as considerações básicas que motivaram esta pesquisa. São apresentados diversos estudos a respeito de MLC, realizados no Brasil e no exterior, sendo identificados os centros de pesquisa mais influentes para esta pesquisa.

No Capítulo 3 são apresentadas as principais dificuldades encontradas para a realização desta pesquisa, as formas de aquisição e transporte do material, assim como o procedimento de caracterização visual.

Nos Capítulos 4, 5 e 6 são dispostos os procedimentos realizados para a caracterização geral do material, apresentando os procedimentos de norma e os resultados obtidos para ensaios de cisalhamento na madeira e na linha de cola, compressão paralela às fibras da madeira e tração paralela às fibras da madeira e à linha de cola. A partir destas características foi possível aferir a respeito da classificação quanto à classe de resistência das madeiras estudadas.

No capítulo 7 foram apresentados os procedimentos utilizados para a avaliação estrutural das vigas de MLC. São avaliados três métodos dinâmicos e comparados com o método de ensaio estático.

O capítulo 8 fecha a pesquisa, apresentando os resultados finais e as conclusões sobre o trabalho, além de contar com sugestões para trabalhos futuros relacionados ao assunto abordado.

As referências bibliográficas são apresentadas no Capítulo 9.

Esta pesquisa conta com dois apêndices, que dispõem das Figuras da análise de ruptura das 24 vigas rompidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os conceitos necessários para o entendimento do tema desta pesquisa são abordados neste capítulo, tais como: a importância da utilização da madeira, as vantagens da MLC em relação à madeira maciça, as características do material e o modo de confecção. Depois são apresentadas pesquisas recentes, que mostram o que está sendo trabalhado no Brasil e no mundo sobre o material objeto de estudo deste trabalho.

2.1 A UTILIZAÇÃO DA MADEIRA

Desde a sua existência, o homem vem utilizando a madeira para diversas finalidades. Muito se fala que sua primeira utilidade foi na confecção de moradias e armas para a caça, e há registros históricos que comprovam que a cerca de 3 mil anos atrás os egípcios já produziam madeira laminada/serrada. Além disto, a madeira é um dos materiais mais estudados do mundo, já que é matéria prima para diversos produtos e base para a construção civil sustentável.

A origem do nome Brasil provém de uma das principais madeiras nativas do local, o Pau Brasil (*Caesalpinia echinata*), que existia em abundância na época do descobrimento do país e chegou a ser o principal produto comercializado pelos exploradores. Tanto o Pau Brasil quanto outras madeiras, com características fundamentais para alguns produtos como tintas, barcos, naus e utensílios foram protegidas por Leis que limitavam seu corte para os interesses dos exploradores, assim surgiu o termo madeira de lei, que até hoje é utilizado para as madeiras mais valiosas ou nativas.

Desde o descobrimento, as matas brasileiras começaram a ser devastadas sem nenhum cuidado ou planejamento, com a finalidade de suprir as necessidades momentâneas do homem, que acarretou na gradativa escassez deste produto no mercado local.

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2013), a área desmatada na região da Amazônia foi de 27772 mil km² no ano de 2004, chegando ao topo dos anos pesquisados. Este número reduziu

gradativamente, chegando a uma expressiva redução de 80% até o ano de 2012, quando 4656 mil km² foram desmatados, o que demonstra preocupação com as matas nativas, fiscalização de desmatamento e a escassez das florestas naturais.

No trabalho publicado por Aguiar et al. (2012), foi realizada uma estimativa de emissões de carbono pelo desmatamento na região amazônica, que concluiu redução aproximada de 50% de emissões no período de 2004 a 2009 (ano em que desmatou-se 7 mil km²), tendo como principal parâmetros de medida a redução do desmate. Outro parâmetro a ser observado é o cultivo de florestas exóticas, que absorve carbono do ambiente, produz a madeira e evita desmatamentos ilegais.

Oliveira e Hellmeister (1998) salientavam há mais de uma década atrás que a atividade florestal, quando utilizados métodos racionais de exploração, é uma ótima forma de associação entre o desenvolvimento e a qualidade de vida. Os autores consideram que, além da produção de madeiras, o aprisionamento do dióxido de carbono e a liberação de oxigênio são indispensáveis na manutenção do ambiente e da qualidade de vida.

Devido à escassez das madeiras de lei, a preocupação crescente com o ambiente e a necessidade deste material nos mais diversos campos de interação do homem, a utilização de madeiras provenientes de reflorestamento cresceu consideravelmente nos últimos anos, fato explicado também pelo alto nível de padronização deste produto. Este material é obtido em fontes renováveis em curto prazo quando comparadas com espécies naturais. Outra vantagem das madeiras provenientes de reflorestamento é que para cada árvore cortada, uma nova é plantada, garantindo assim um ciclo de extração e suprimento confiável, sustentável e sem danos ao ambiente (LYPTUS Ltd., 2013).

De forma geral, a madeira possui grande versatilidade e muitas características positivas para sua aplicação na construção civil, dentre as quais Brito (2010) destaca o baixo peso, alta resistência mecânica, baixo consumo energético no processamento, disponibilidade no mercado, fácil manuseio e grande vida útil quando utilizadas as devidas técnicas de tratamento na madeira.

Além disso, o Brasil ocupa lugar de destaque mundial no cultivo de espécies exóticas. As madeiras de reflorestamento mais abundantes por aqui são o pinus e o eucalipto (BRITO, 2010), sendo a primeira uma conífera que possui baixa densidade, resistência mecânica reduzida, baixa resistência a organismos xilófagos, fácil trabalhabilidade e secagem. Já o Eucalipto possui densidade média a alta, resistência mecânica superior a do pinus, boa resistência natural a organismos xilófagos, entretanto requer mais atenção no processo de corte e secagem (OLIVEIRA e HELLMEISTER, 1998).

As duas espécies de madeira possuem alto nível de padronização e cada uma possui vantagens específicas. Se utilizadas da maneira correta, com tratamento adequado e com alto grau de tecnologia, podem ter durabilidade superior a muitas madeiras nativas consideradas de lei. Barillari (2002) comprovou em sua pesquisa que o pinus tratado pode resistir mais de 30 anos em contato direto com solo e em pleno serviço, pra tanto a autora estudou a disposição de madeiras com diversos tipos de tratamento em campos de apodrecimento, verificando que aquelas madeiras com tratamento adequado não sofreram perda significativa de massa durante o período de 21 anos.

Quando comparada com outros materiais de construção, Rocco Lahr et al. (2007) destacam que a madeira requer pouca quantidade de energia para produção. Concreto e aço, além de necessitarem de uma enorme quantidade de energia, requerem matérias primas não renováveis e de atividades exploratórias impactantes ao ambiente. Os autores quantizaram a energia para a produção de 1 m³ de madeira serrada, que varia de 600 a 630 MJ, enquanto para carvão e aço chegam a 1920 e 234000 MJ/m³ respectivamente. Além disto, enquanto a madeira é gerada com energia solar e absorve CO₂, concreto e aço necessitam da queima de carvão vegetal, mineral e óleo combustível, que liberam CO₂ e diversas outras substâncias tóxicas na atmosfera.

Por estas características a madeira de reflorestamento é o material construtivo mais indicado quando o assunto é sustentabilidade. Ainda assim todo material tem suas vantagens e desvantagens; entre as desvantagens pode-se citar a grande variabilidade de defeitos, a necessidade de secagem da madeira, a susceptibilidade ao ataque de organismos xilófagos e a sua heterogeneidade, que dificulta bastante o processo de projeto e construção com madeira (BRITO, 2010).

Entre as principais desvantagens da madeira de reflorestamento, a limitação de dimensões afeta diretamente seu uso estrutural, uma vez que, quando submetida a grandes vãos, requer a utilização de seções muitas vezes indisponíveis no mercado ou grande número de ligações. A solução para isto veio na concepção da Madeira Laminada Colada – MLC, que faz parte dos chamados produtos “engenheirados” e utilizam técnicas modernas de engenharia para sua produção (TELES, 2009; CALIL NETO, 2011).

2.2 A MADEIRA LAMINADA COLADA

2.2.1 Breve histórico da Madeira Laminada Colada

A proposta inicial da utilização deste material foi de Friedrich Otto Hetzer no início do século XX, devido a abundância de peças de madeira de pequenas dimensões e a restrição do uso do aço imposta pela Segunda Guerra Mundial. Inicialmente, as peças confeccionadas só podiam ser utilizadas em ambientes secos, devido a limitações dos adesivos, mas com a evolução tecnológica tanto dos adesivos quanto dos processos construtivos, hoje é possível confeccionar peças com mais de 40 metros de comprimento e 2 metros da altura da secção, que suportando as mais diversas exposições químicas e intempéries, podem compor grandes estruturas de pontes, telhados e pavilhões (SENA-CRUZ et al., 2013; MIOTTO, 2009; TELES, 2009; CALIL NETO, 2011).

Azambuja (2006) e Miotto (2009) destacam que a primeira aplicação da MLC na América foi em 1934 na construção de um dos laboratórios do “*Forest Products Laboratory*”, em Wisconsin, EUA. Depois disso, com a publicação de um boletim técnico, a partir do ano de 1939 a MLC passou a ser utilizada na construção de ginásios, igrejas, pontes e principalmente em aplicações não residenciais. Os autores destacam a longevidade das estruturas de pontes, construídas nos EUA durante os anos 60 e que estão em serviço até hoje.

Atualmente este material tem sido estudado por muitos pesquisadores no Brasil, mas o país ainda não possui uma norma clara e forte para a padronização deste produto. Países como a Alemanha, Estados Unidos e Canadá possuem normas específicas que auxiliam na confecção de projetos

diversos com MLC. Calil Neto (2011) atenta para a necessidade de normas e padronizações de ensaios para este material, uma vez que o país é um dos maiores produtores de madeira do mundo, principalmente quando se trata de espécies de reflorestamento como as de Pinus e de Eucalipto.

2.2.2 Definição

Como o próprio nome sugere, a madeira laminada colada (MLC) vem do processo tecnológico da colagem de lâminas de madeira, originando assim um elemento mais robusto. Estas lâminas, que devem ter espessura inferior a 50 mm, são de tamanhos relativamente pequenos quando comparados com a dimensão final da peça e são coladas tendo suas fibras orientadas de forma que estejam paralelas entre si, como pode ser observado na Figura 2.1. (FIORELLI e DIAS, 2011; CALIL NETO, 2011).

Figura 2.1 – Viga de madeira laminada colada.



Fonte: REWOOD (2013).

Anshari et al. (2012) ressaltam que, quando as lâminas de madeira são coladas, há uma redução na variabilidade do produto final, reduzindo o efeito de características negativas da madeira, como os nós. Além disto, os autores

destacam o potencial do material, que pode ser desenvolvido para os mais diversos projetos e com as mais diversas dimensões. Dentre outras vantagens da MLC, Miotto (2009) destaca a variabilidade de formas incluindo peças curvas, possibilidade de aplicação de contra flechas, redução dos defeitos inerentes da madeira e elevação da qualidade final do produto.

Apesar de a madeira ser um material combustível, os elementos estruturais de MLC normalmente são peças robustas, podendo ser utilizados em ambientes com risco de incêndio. Estes elementos, quando submetidos ao incêndio, carbonizam a camada superficial, criando uma camada protetora que reduz consideravelmente a velocidade de propagação do fogo no interior do elemento, assegurando os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 14432:2000 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento.

Por outro lado, a grande desvantagem da MLC é que no Brasil seu custo é elevado, uma vez que depende de um processo tecnológico controlado para que sua qualidade final seja satisfatória. A madeira puramente serrada gera quantidade inferior de resíduos, requer menos energia para ser produzida e é a base para a produção deste produto.

2.2.3 A escolha da madeira para a colagem

Basicamente todas as madeiras podem ser aderidas com adesivos. Entretanto, algumas necessitam de adesivos especiais, que podem inviabilizar o custo do produto final. Uma recomendação encontrada em quase toda a literatura disponível é que as madeiras sejam de mesma espécie, principalmente de coníferas com densidades entre 0,40 a 0,75 g/cm³ ou folhosas com densidades baixas (ZANGIÁCOMO, 2003; FIORELLI, 2005; SZÜCS et al., 2008; CALIL NETO, 2011).

Plaster et al. (2008) realizaram um estudo com a madeira de Eucalipto dividida em três classes de densidade, confirmando que este fator influenciou diretamente na qualidade da adesão. Para tanto, foram utilizados dois adesivos distintos, o resorcinol-formaldeído e o acetato de polivinila, e realizados ensaios de cisalhamento, que testou as linhas de cola.

A norma brasileira ABNT NBR 7190:1997 indica o uso de madeira de Pinus para a confecção de MLC, uma vez que sua densidade média é de 0,50 g/cm³. Entretanto, Zangiácomo (2003) concluiu em seu trabalho que apenas o parâmetro de densidade pode não ser ideal para a escolha da madeira, uma vez que considera a permeabilidade da madeira tão importante quanto a densidade. Frihart e Hunt (2010) vão além da densidade e da porosidade, atentando as propriedades de retratibilidade da madeira, que podem afetar na qualidade da MLC em longo prazo.

Estudos com diversas espécies de madeira e adesivos conduzidos no Brasil e no mundo mostram que algumas espécies fora dos padrões aceitam a adesão com adesivos mais sofisticados, como é o caso do estudo publicado por Carrasco et al. (2012), que utilizou a espécie de *Eucalyptus Citryodora* com densidade de 0,99g/cm³ para análise da qualidade de MLC para dormentes. A tendência geral é que as madeiras de reflorestamento sejam utilizadas.

2.2.4 A escolha do adesivo aplicado na colagem

Frihart e Hunt (2010) explicam que o adesivo é responsável pela adesão das lâminas de madeira, que envolve fatores químicos e mecânicos. Por ser um material poroso, a adesão das lâminas é realizada por um mecanismo de encravamento mecânico, fazendo que os esforços solicitados sejam transmitidos entre os componentes aderidos, aumentando a resistência e a rigidez da madeira. Os autores atentam que o ideal é que a junta entre adesivo e madeira seja tão resistente quanto à própria madeira, sendo importante que o rompimento seja na madeira.

Para Calil Neto (2011), a qualidade da MLC depende diretamente da qualidade dos adesivos utilizados, sendo importante que sua junta seja de alta resistência, não havendo assim deslizamentos significativos entre as lâminas quando solicitadas a esforços. Szücs et al. (2008) atenta para o uso do adesivo em concordância ao uso da estrutura, tomando o ambiente que ela estará exposta como base de referência, ou seja, avaliando dados como temperatura, umidade e exposição a agentes químicos. Além disso, vale a pena observar a

relação entre o custo e o benefício do adesivo, tempo de cura, cor da linha de cola e a durabilidade do mesmo.

Os primeiros adesivos utilizados foram obtidos por volta de 1906, produzidos a base de caseína (oriundos da proteína do leite). Entretanto este adesivo não suportava às intempéries, o que limitou demais seu uso. Com o avanço tecnológico, novos adesivos sintéticos foram criados, possibilitando a confecção de peças maiores e mais resistentes. Alguns adesivos podem suportar grandes variações de umidade e temperatura (PORTAL REMADE, 2003).

Mesmo com adesivos mais resistentes, os adesivos a base de caseína ainda são utilizados pelo baixo custo. Algumas pesquisas, como a de Gao et al. (2010), comprovam que com alguns ajustes e com novas tecnologias, é possível utilizar este adesivo para estruturas que não sofrem grandes variações de umidade.

Segundo Miotto e Dias (2009), os adesivos mais utilizados no Brasil são o fenol-resorcinol-formaldeído (FRF) e o melamina-uréia-formoldeído (MUF) tendo o segundo a vantagem de tempo inferior para a cura e linha de cola transparente após a cristalização. Gao et al. (2010) citam também os adesivos a base de polímeros de isocianato (EPI), acetato de polivinila (PVA), etileno acetato de vinila (EVA) e butadieno estireno (SBR).

Iwakiri (2005) destaca que o adesivo a base de fenol-resorcinol, introduzido comercialmente na década de 30, possui boa resistência à umidade, sendo considerado ideal para uso externo. Este adesivo veio a substituir a caseína, uma vez que permite a utilização de MLC na confecção dos mais diversos tipos de estruturas, como pontes e coberturas (FIORELLI, 2005).

Outro adesivo de destaque é produzido a partir de poliuretano líquido (PUR). Trata-se de um adesivo isento de formaldeído, produzido a partir de solventes e que pode ser aplicado em funções estruturais. Uma grande vantagem do poliuretano líquido é o tempo de cura reduzido, que pode ser de 30 minutos de aplicação mais 75 minutos de prensagem (PURBOND, 2013).

Dentre as várias opções de adesivos disponíveis no mercado, existem pesquisas de desenvolvimento de novos adesivos, como é o caso do adesivo

produzido a base de resina extraída da mamona, desenvolvido por pesquisadores da Universidade de São Paulo-USP (AZAMBUJA, 2006).

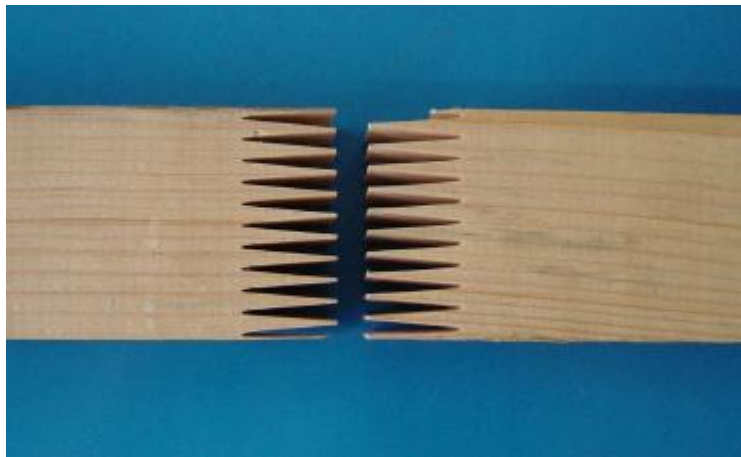
2.2.5 Confecção de elementos de Madeira Laminada Colada

Uma vez selecionada a madeira e o adesivo, para que o processo de produção da MLC seja adequado, algumas etapas devem ser seguidas. Miotto (2009) resume este processo em 4 etapas: secagem e classificação das lâminas; execução de emendas; colagem das lâminas e a etapa de acabamentos.

Inicialmente a madeira deve estar com um teor de umidade controlado e homogêneo, sem haver grandes gradientes de umidade na mesma peça e em peças adjacentes, para Szücs et al. (2008) este gradiente não deve ser superior a 5%. O “*American Institute of Timber Construction*” (AITC) através da norma ANSI A 190.1 (2007) estipula um limite máximo de 16% de umidade na maior parte das aplicações. Estando dentro destes limites, as peças passam por classificação mecânica e visual, em conformidade com a norma, atendendo assim a primeira etapa.

A segunda etapa consiste no processo e união de topo das lâminas de madeira, uma vez que o comprimento final desejado é superior ao das lâminas iniciais. A emenda mais comum é do tipo “*finger joint*”, também conhecida como emenda denteada ou de entalhes múltiplos e pode ser observada na Figura 2.2. Esta emenda é unida com a aplicação do mesmo adesivo escolhido para a peça, que é aplicado e prensado para a obtenção da cura. Espera-se com isso que a emenda obtenha o mínimo de 75% da resistência da madeira sem defeitos, classificando a emenda como de alto desempenho (SZÜCS et al., 2008).

Figura 2.2 – Emenda denteada.



Fonte: MIOTTO (2009).

Após a união de topo, as superfícies das novas lâminas devem ser aplainadas e as características mecânicas da junta devem ser tomadas. As mesmas são dispostas entre si para averiguar o distanciamento das juntas na configuração da peça, aceitando os seguintes espaçamentos propostos por Szücs et al. (2008):

- O espaçamento das juntas nas lâminas externas deve ser superior a 20 vezes a espessura da lâmina de madeira;
- O espaçamento das juntas nas lâminas centrais deve ser superior a 12 vezes a espessura da lâmina de madeira;
- Em um comprimento de 30,5 cm o número de emendas não deve ser superior a soma de lâminas dividido por 4.

Fiorelli (2005) recomenda ainda que quando houver emendas na mesma lâmina, deve haver um distanciamento de 1800 mm entre as mesmas e distanciamento de 150 mm de emendas em laminas adjacentes, enquanto a ABNT NBR 7190:1997 preconiza espaçamento mínimo de 25 vezes a espessura da lâmina.

Tendo em vista que a configuração das lâminas de madeira aceitam as exigências supracitadas, a etapa de colagem das lâminas pode ser executada após acabamento final das peças. Para esta etapa, aplica-se o adesivo na gramatura especificada pelo fabricante, de forma a manter uma linha de cola

homogênea para toda a peça, sendo que a gramatura pode variar com cada adesivo. O mesmo acontece com o processo de prensagem e cura do adesivo. Após a cura do adesivo, é realizado o aplainamento de todas as faces da peça, retirando a cola que escorre das lâminas e retirando qualquer irregularidade da peça (MIOTTO, 2009).

Para Calil Neto (2011), é necessário que todo o processamento e manipulação dos materiais adesivos tenham um controle de qualidade rigoroso, uma vez constatada a sensibilidade dos resultados quanto a gradientes de umidade, temperatura, tempo e pressão. Vale ressaltar também que cada conjunto de materiais utilizados merece uma atenção diferenciada, uma vez que a madeira é um material heterogêneo e as características dos adesivos são completamente diferentes.

2.2.6 Pesquisas recentes

Entre algumas pesquisas brasileiras, pode ser citada as pesquisas de Zangiácomo (2003), que testou a MLC de diferentes espécies nativas com densidade de até 0,75 g/cm³, tais como Envira Branca (*Xylopiá sp.*), Cambará (*Moquinia polymorpha*), Castanheira (*Bertholetia excelsa*) e Cedrinho (*Erisma sp.*). Além disto, o autor testou dois adesivos, um a base de resina resorcinol e o outro um adesivo poliuretânico a base de resinas extraídas da mamona. O autor conclui em seu trabalho que é possível a confecção de MLC com as espécies citadas, dando destaque ao Cedrinho, que obteve os melhores resultados mesmo tendo a densidade inferior no conjunto de madeiras testadas.

Issa e Kmeid (2004) estudaram as propriedades da MLC produzido com pinus com e sem reforço sujeita a ensaios de flexão, conduzidos via ASTM D-198:1994. Para o estudo, foram confeccionadas vigas coladas com reforço de polímeros de fibra de carbono e com reforço de placas metálicas, sendo três unidades com cada tipo de reforço e outras três sem reforço, tendo todas as vigas sido dimensionadas com 6x11x176 cm. A conclusão dos autores foi que as vigas reforçadas obtiveram além de resistências maiores uma ductilidade maior do que as vigas sem reforço.

Fiorelli (2005) avaliou o efeito da utilização de polímeros reforçados com fibras de vidro nas propriedades de rigidez e de resistência de elementos estruturais de MLC. O autor testou a MLC utilizando a madeira de pinus com e sem o reforço. Concluiu-se que as fibras trouxeram resultados positivos para as propriedades da MLC, uma vez aplicadas na parte inferior das vigas confeccionadas, onde elas são mais tracionadas. Outra observação realizada a partir de ensaios de delaminação, é que a adição de fibras de vidro trouxe maior confiabilidade em relação ao módulo de ruptura das peças.

Davids et al. (2005) estudaram o efeito do reforço de polímeros de fibra de vidro no desempenho de vigas de MLC sujeitas a ensaio de flexão, verificadas pelo método proposto pela ASTM D-2915:2000. Os autores destacam que o reforço utilizado aumenta até 100% da resistência da linha de cola e reduz a variabilidade das vigas. Para este trabalho, foram confeccionadas nove vigas com dimensões 13x30,5x670 cm de largura. Ao testar as vigas, os autores chegaram as conclusões de melhoria dimensional, menor variação entre as vigas e que as vigas com reforço resistem significativamente mais. A madeira utilizada foi o pinus.

Azambuja (2006) testou a MLC de Pinus e Eucalipto com diferentes tipos de adesivos, tendo como finalidade indicar o melhor custo benefício entre os mesmos. O autor utilizou os adesivos poliuretânico e a base de resina de mamona, produzido pelos pesquisadores da Universidade de São Paulo, que foi bastante adequado quando comparado com outros adesivos mais caros. Vale ressaltar que a utilização de adesivos alternativos pode ser uma saída para os altos custos da produção da MLC, principalmente aqueles oriundos de fontes renováveis, como é o caso da resina de mamona.

Teles (2009) avaliou a eficiência da MLC produzida com a madeira de Louro Vermelho, cuja densidade aparente média era de 0,76 g/cm³, com diferentes gramaturas de adesivo. O autor constatou que a madeira pode ser empregada com bons resultados na confecção da MLC e que existe uma gramatura de cola diferenciada das estipuladas pelo produto, que agrega colagem ideal para a espécie. O Louro Vermelho é uma espécie tropical nativa brasileira que possui grande quantidade de extrativos e pouca porosidade, logo, merece um tratamento diferenciado quanto as condições de colagem.

Miotto (2009) realizou uma extensa pesquisa com vigas mistas de MLC e concreto, formando viga do tipo “T”. O autor realizou diversos experimentos com MLC de Lyptus com densidade aproximada de 0,78 g/cm³, utilizando reforço de fibra de vidro. No processo de confecção destas vigas, foi colocada uma camada de fibra de vidro na parte superior da última lâmina de madeira. O autor constatou que as peças confeccionadas com reforço obtiveram resultados melhores do que aquelas sem as fibras, principalmente no que diz respeito à rigidez e à resistência.

Bortoletto Junior (2009) realizou um estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas da MLC produzida com Pinus (*Pinus merkusii*) e a própria madeira serrada, cuja densidade média era de 0,44 g/cm³. O autor constatou que a resistência da MLC foi superior em relação a madeira serrada, de 11% a 18%, e houve um ganho de rigidez que variou de 14% a 29%. Além disso, foi possível verificar que a MLC tornou-se mais estável e homogênea.

Terezo e Szücs (2010) avaliaram o desempenho de vigas confeccionadas com a madeira de Paricá (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex. Ducke), que possui baixa densidade e baixa resistência mecânica, mas agrega a facilidade de colagem. Os autores testaram dois tipos de adesivos, o FRF e o API, chegando a resultados que podem classificar a MLC testada como de classe de resistência C20, tendo desempenho compatível com vigas de madeira serrada. Os dois adesivos não influenciaram significativamente nos valores de resistência e rigidez, e o cisalhamento foi realizado na madeira, sendo a linha de cola mais resistente.

Cunha e Matos (2010) observaram o efeito de três adesivos, o FRF, o MUF e o PUR, utilizando a madeira de Pinus (*Pinus taeda*), além de testar vigas “I” compostas por alma de painel de OSB (Orientend Strand Board) e duas mesas de MLC. Os autores verificaram que o PUR apresentou desempenho ligeiramente melhor quando comparado com os outros, e as vigas “I” confeccionadas com o PUR apresentaram desempenho estatisticamente superior àquelas com os demais adesivos.

Na pesquisa realizada por Calil Neto (2011) foram utilizadas as madeiras de Pinus, Teca e Lyptus, com tratamentos químicos diferenciados e dois tipos de adesivos, o PUR e o FRF. O autor propôs uma metodologia de ensaios para

combinações espécie-adesivo-tratamento, na qual a madeira que mais se destacou com resultados positivos foi a de pinus. Isto ocorreu devido a sua menor densidade e maior porosidade, além de madeiras coníferas aceitarem tratamentos químicos com maior facilidade. Observou-se que a madeira de teca utilizada pelo autor possuía lenho juvenil, uma vez que a medula estava exposta e havia ausência de cerne nas lâminas coladas.

Entre outros autores que trabalharam com os polímeros a base de fibras de vidro, podem ser citados Gentry (2011), que analisou a eficiência das fibras com ensaios de flexão e cisalhamento, Guan et al. (2005), que estudaram e validaram o efeito das fibras de vidro utilizando o método dos elementos finitos. Por fim, Lindyberg et al. (2012) validaram o estudo com vigas com reforço destas fibras através de um modelo estatístico não linear, que utilizou noventa corpos de prova, sendo que a aplicação de 3% de polímeros de fibra de vidro na viga pode aumentar 100% da resistência a flexão da mesma. Novamente a madeira utilizada foi o pinus.

Segundinho et al. (2012) avaliaram a eficácia de métodos de ensaios baseados em frequências naturais de vibração a fim de compará-los com os métodos estáticos tradicionais. Em sua pesquisa utilizaram madeira serrada de pinus e eucalipto e constatou-se haver boa correlação de resultados entre o método de ensaio de flexão estática e o método de vibrações longitudinais.

A pesquisa desenvolvida por Carrasco et al. (2012) teve por objetivo avaliar o comportamento estrutural de dormentes confeccionados com a MLC de Eucalipto citriodora (*Eucalyptus citriodora*), cuja densidade média era de $0,99 \text{ g/cm}^3$. Os autores realizaram ensaios de cargas estáticas e compararam os resultados com um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos, realizado no programa ANSYS. Eles concluíram que a MLC avaliada teve desempenho elevado e carga de ruptura 110% superior a valores preditos por outros pesquisadores.

Na pesquisa de De Luca e Marano (2012) foram confeccionadas vigas protendidas de MLC com duas barras de aço no sentido das fibras da madeira, utilizando a madeira de Pinus. Os resultados foram bastante promissores, uma vez comparados com os resultados da MLC sem reforço, as propriedades de rigidez, carga de ruptura e ductilidade elevaram-se 25,9%, 48,1% e 43,8% respectivamente. Alamsyah et al. (2008) estudaram o comportamento da MLC

produzida com Acácia (*Acacia mangium*) aderida com adesivo a base de FRF, observando os efeitos dos extrativos da madeira na colagem. Os autores concluíram que uma combinação de tempo de cura e aplicação de metanol na superfície de lâminas pode melhorar o desempenho de colagem, reduzindo os efeitos negativos dos extrativos. A espécie de Acácia é conhecida pela grande oleosidade e quantidade de extrativos, que podem entrar em contato com o adesivo e interferir diretamente na colagem. A técnica do uso de metanol foi justamente para reduzir este efeito.

Wang et al. (2012) realizaram um estudo experimental do possível tipo de fraturas que podem ocorrer na viga de MLC, sendo ela dentro da lamina de madeira ou na junta de cola. Os autores chegaram a conclusão de que os anéis de crescimento podem influenciar no tipo de fratura que a madeira pode sofrer, assim como o ângulo das fibras.

2.2.7 Considerações da revisão bibliográfica

Observadas as colocações deste capítulo, verificou-se que o assunto é de suma importância para a construção civil. A Madeira Laminada Colada poderia ser padronizada, fabricada em série e comercializada em maiores proporções. Por isso, faz-se necessário que estudos comparativos com as principais madeiras utilizadas com fins estruturais sejam realizados, principalmente quando produzida com madeiras oriundas de reflorestamento, a baixo custo e com a melhor configuração para sua utilização.

Observou-se também que a MLC é fabricada com destinação específica, feita sob projeto, o que pode elevar bastante os custos finais. Vale ressaltar que a produção em série pode reduzir os custos, além da possibilidade de suprimento da madeira serrada que é um recurso cada vez mais escasso do mercado.

A madeira mais indicada e mais utilizada nos trabalhos pesquisados foi o Pinus, no entanto o Eucalipto também se mostrou bastante pesquisado. As duas madeiras são oriundas de fontes renováveis e disponíveis com abundância no mercado brasileiro. A madeira de Pinus, por sua vez, é mais comum de ser encontrada em tábuas, sendo pouco utilizada para fins

estruturais no Brasil, enquanto o eucalipto é utilizado para as mais diversas situações.

De forma geral, as pesquisas se dividem em três partes. A primeira parte é objetivada na melhoria do desempenho da MLC, efetuando estudos com reforços nas peças. A segunda parte estuda a relação entre o custo e o benefício com a finalidade de viabilizar o produto. Por fim, os demais estudos apresentam o uso de diferentes madeiras e adesivos em tratamentos ainda não pesquisados.

A partir do trabalho de Lindyberg et al. (2012) foi possível destacar um dos maiores centros de referência de estudos em MLC no mundo, localizado em a Universidade de Maine, em Orono, solo Norte Americano,. Nos Estados Unidos ainda temos a APA – Associação de Engenharia da Madeira, que promove estudos diversos em madeiras, e conseqüentemente em MLC. Além disso, pode-se perceber que cientistas do mundo inteiro mostram interesse na área, focando os Europeus e Asiáticos. No Brasil, a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - EESC-USP aparece com grande destaque internacional, possuindo também pesquisas importantes na Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG e na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

3 CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS VIGAS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as primeiras inspeções realizadas nas vigas de madeira laminada colada de forma a verificar suas características de acordo com a revisão bibliográfica apresentada no capítulo 1. Além disso, é realizada uma discussão a respeito das dificuldades de realização do trabalho e das limitações encontradas nas etapas iniciais, que explicam a maneira que a pesquisa foi executada.

Os métodos de ensaios escolhidos para a realização desta pesquisa serão devidamente mencionados nesta etapa e posteriormente serão analisados detalhadamente junto ao capítulo destinado a cada ensaio. Vale ressaltar que cada método foi escolhido de acordo com a disponibilidade de materiais e equipamentos do centro de pesquisa, sendo este um gargalo que limita determinados experimentos.

Como o material de trabalho foi adquirido no mercado brasileiro, não houve acompanhamento na produção. No entanto o fabricante informou as características básicas do produto, que foi inspecionado visualmente a fim de quantificar possíveis informações que possam ser relevantes na avaliação estrutural das vigas, objetivo principal desta pesquisa.

3.2 LIMITAÇÕES DE TRABALHO

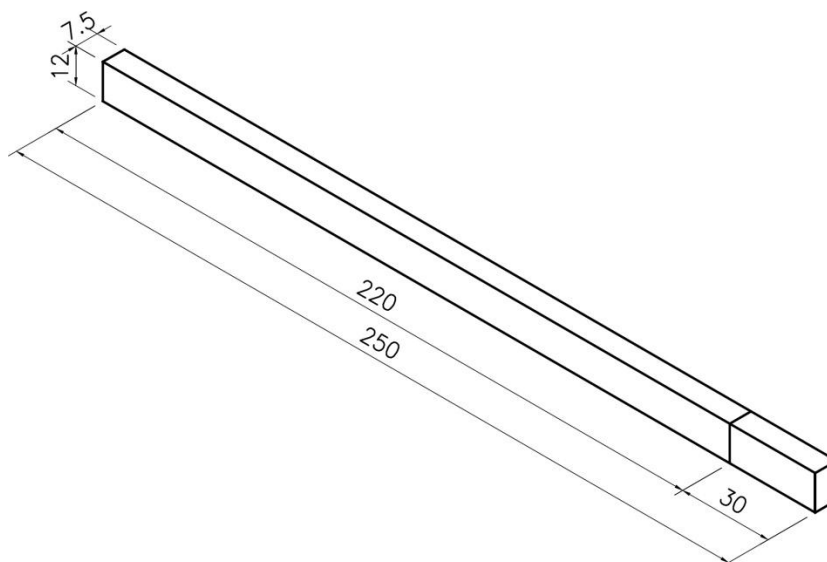
No início da pesquisa foram constatadas algumas limitações do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção – LEMAC do CT-UFES. Dentre estas, a principal está relacionada a realização de avaliação da rigidez em flexão estática, limitada a realização de ensaios com vigas de vão máximo equivalente a 2 metros. Esta limitação está relacionada a prensa hidráulica disponível no laboratório, que possui barramento de comprimento limitado.

Outra dificuldade encontrada foi que nenhuma empresa local comercializa ou produz MLC, assim como a confecção de peças com características estruturais seria impossível nas dependências do LEMAC-

UFES. A solução encontrada foi a aquisição de vigas produzidas por uma empresa localizada no estado de São Paulo, disponibilizadas pelo fabricante por meio de doação. No entanto, a distância da empresa até o laboratório resultou em mais uma dificuldade: o transporte. Uma carga muito grande ou muito pesada seria, além de muito cara, de difícil locomoção de um estado para o outro.

De acordo com as limitações acima descritas, foi estipulada uma quantidade de 24 vigas para este trabalho, em dimensões iguais a 7,5 x 12 x 250 cm. Destas, a metade seria confeccionada com madeira de eucalipto e as demais com pinus, madeiras de reflorestamento utilizadas pela referida empresa e muito observadas nas pesquisas analisadas na revisão bibliográfica. Como o limite de barramento do equipamento laboratorial disponível é de 2 metros, estipulou-se a necessidade de um segmento de 30 cm de comprimento para obtenção de corpos de prova para caracterização do material, restando uma peça de 2,20 m destinada ao ensaio de flexão estática com vão livre de 2 metros. As dimensões das vigas podem ser observadas na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Dimensões das vigas solicitadas (cm)



Fonte: Autor

3.3 CONFECÇÃO DAS VIGAS

Cada viga foi confeccionada a partir da adesão de 4 lâminas de madeira com seção retangular de 7,5 x 3 cm, prensadas com o adesivo “Koyo Bond”, que é a base de emulsão de polímero isocianato (EPI). A gramatura utilizada pela empresa fabricante foi igual a 180 g/m², assim como especificado pelo fabricante do adesivo. A empresa não informou a respeito da prensagem e das temperaturas ambiente e de cura, apenas disse que segue as normas especificadas pelo fabricante.

Como se tratou de um material adquirido por doação, não foram impostas exigências referentes ao padrão de confecção ou montagem das vigas. Desta forma, o material tornou-se uma amostra das vigas de MLC que a empresa comercializa no mercado brasileiro. Nesta pesquisa tratou-se de uma caracterização limitada a um determinado tipo de vigas, não tendo efeito de comparação com outros materiais, no entanto, torna a pesquisa mais real, podendo destacar fatores positivos e negativos, que podem ser corrigidos no processo de confecção deste material.

Após confecção das vigas, estas foram armazenadas e posteriormente transportadas de Taboão da Serra – SP para Vitória – ES por meio de veículos de transporte abertos. Vale ressaltar que no período de transporte não houve precipitação de chuvas e que o material encontrava-se embalado e protegido, como pode ser observado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Estocagem e transporte das vigas de MLC.



Fonte: Autor.

Assim que o material chegou em Vitória-ES, foi devidamente armazenado em ambiente fechado e seco, no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo – LEMAC-CT-UFES. As vigas foram identificadas e alocadas separadamente, a fim de possibilitar que o teor de umidade da madeira equalize-se com o do meio ambiente.

3.4 CARACTERIZAÇÃO VISUAL DAS VIGAS

Com as vigas devidamente armazenadas no LEMAC, foram medidas as suas respectivas massas por meio de uma balança digital durante 3 semanas, com o objetivo de verificar a estabilização da umidade das peças com a umidade do ambiente. Foram realizadas medidas das distâncias entre emendas denteadas e das dimensões dos dentes. Também foram observadas a presença de defeitos na madeira e as variações de lenho tardio e juvenil nas mesmas vigas. Estas avaliações preliminares tiveram como base o Projeto ABNT NBR 7190:2011.

3.4.1 Distância entre emendas denteadas na mesma lâmina de madeira.

Observaram-se desconformidades das vigas de acordo com as recomendações encontradas na revisão bibliográfica, principalmente com o que está relacionado no Projeto ABNT NBR 7190:2011. O projeto de norma determina a distância mínima entre as emendas denteadas de 80 cm para lâminas dispostas nas quartas partes mais afastadas do eixo baricêntrico horizontal e de 50 cm para as lâminas que compõem o centro da viga. Fiorelli (2005) foi ainda mais conservador, estipulando distanciamento mínimo de 180 cm. Já para Szücs et al. (2008), o distanciamento poderia ser de 20 vezes a espessura da lâmina para as tábuas dispostas mais externas ao centro da viga e 12 vezes a espessura das lâminas para aquelas dispostas no centro da

mesma, tais distâncias, para o material avaliado, seriam respectivamente 60 e 36 cm.

Nenhuma das vigas adquiridas possuía conformidade com a literatura ou com a norma referente a este quesito, que pode ser constatado nas amostras expostas nas Figuras 3.3 e 3.4. Observa-se que para a melhor visualização das emendas, foi realizado um círculo em volta de cada uma delas. A Figura 3.3 ilustra um segmento da viga 03 de Eucalipto, e nela pode ser observado, na terceira lâmina de cima para baixo, uma distância de aproximadamente 35 cm entre as emendas, enquanto na Figura 3.4, que ilustra a viga 11 de Pinus, pode ser observada uma distância aproximada de 40 cm entre as emendas da segunda lâmina de cima para baixo. Uma das possíveis explicações para esta desconformidade é a ausência de nós e defeitos das madeiras. Observa-se que todos os nós foram retirados, gerando pequenos segmentos de madeira, que são unidos por meio de emendas denteadas a fim de gerar o maior aproveitamento da madeira.

Figura 3.3 – Emenda localizada na mesma lâmina de madeira – Viga 03 de Eucalipto.



Fonte: Autor.

Figura 3.4 – Emenda localizada na mesma lâmina de madeira – Viga 11 de Pinus.



Fonte: Autor.

3.4.2 Distância entre emendas denteadas em lâminas adjacentes.

O Projeto ABNT NBR 7190:2011 recomenda que a distância entre emendas de lâminas adjacentes não seja inferior a 20 cm, o que não foi constatado, novamente, em nenhuma das vigas analisadas. Szücs et al. (2008) também recomendam que num comprimento de 30,5 cm, o número de emendas deve ser inferior à quarta parte do número de lâminas presentes na viga, que deveria ser de uma emenda para o material analisado.

Todas as vigas apresentaram desconformidades em relação à literatura e ao projeto de norma quando foram analisadas as distâncias entre emendas em lâminas adjacentes. Observou-se nas Figuras 3.3 e 3.4 várias emendas em um trecho relativamente curto. Em algumas situações, como o caso da viga 04 de Eucalipto ilustrada na Figura 3.5, observou-se emendas sobrepostas uma acima da outra, caracterizando um ponto claro de fragilidade da viga.

Figura 3.5 – Detalhe de emendas sobrepostas da viga 04 de Eucalipto.



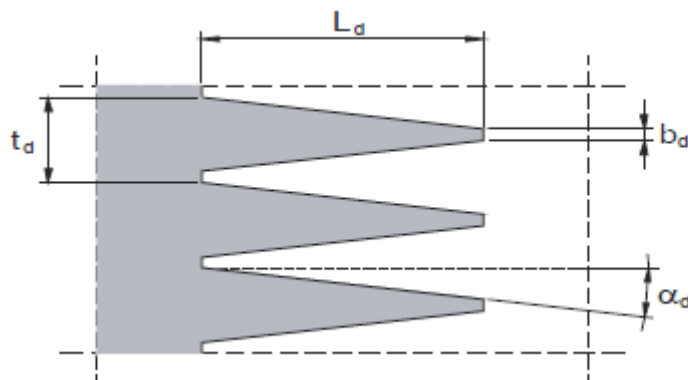
Fonte: Autor.

3.4.3 Tamanho das emendas denteadas.

O Projeto ABNT NBR 7190:2011 faz menção ao dimensionamento dos dentes de forma que o comprimento destes devem ser compatíveis com os esforços solicitantes. Além do comprimento dos dentes (L_d), devem ser observadas a espessura da extremidade dos dentes (b_d), o passo do dente (t_d), o grau de inclinação dos flancos dos dentes (α_d) e o grau de enfraquecimento

ocasionado pelos dentes (b_d / t_d), sendo estas dimensões observadas na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Parâmetros de dimensionamento das emendas



Fonte: Projeto ABNT NBR 7190:2011

O projeto de norma ainda recomenda duas geometrias de dentes, uma com comprimento estipulado em 2,8 cm e a outra com 2,1 cm. Tomando estes comprimentos como base de comparação, mediu-se com um paquímetro digital o comprimento das emendas das vigas pesquisadas, que podem ser observados na Figura 3.7 e tem valor de 1,4 cm, sendo os demais os parâmetros da norma atendidos.

Figura 3.7 – Verificação do comprimento dos dentes das emendas.



Fonte: Autor.

Em pesquisa de mercado, constatou-se que o dimensionamento de emendas denteadas utilizadas por empresas brasileiras de movelaria e de

produção de painéis sarrafeados utiliza o mesmo perfil de serras encontrado nas vigas estudadas, ou seja, com comprimento de dente aproximado de 1,4 cm.

Conclui-se que, pela facilidade de obtenção de peças para serras, o processo produtivo fica menos oneroso com estes parâmetros de dentes, uma vez que a incidência dos mesmos nas vigas é muito grande. Esta ideia está de acordo com o que preconiza Szücs et al. (2008), no entanto, os pesquisadores alertam a necessidade de montagem das lâminas de forma a colocar emendas simples em locais onde as cargas são mais amenas, como a região da linha neutra das vigas.

Este tamanho pode reduzir significativamente a resistência da emenda, o que torna a resistência da viga inferior também.

3.4.4 Defeitos e tipos de lenho.

As vigas analisadas possuíam ausência de quaisquer tipos de defeitos provenientes da madeira. Todas as vigas encontravam-se nas medidas corretas, com variações milimétricas, decorrente da variabilidade dimensional natural da madeira.

É importante destacar a ausência de nós nas vigas. As madeiras de reflorestamento de pinus e eucalipto possuem característica de grande quantidade de nós nas tábuas geradas na serraria. A explicação para a ausência de nós nas vigas é conclusiva a respeito da grande quantidade de emendas denteadas: a empresa prefere seccionar a seção da tábua com nó, retirando o mesmo, e unir estas seções com uma emenda colada. Esta ação pode ser positiva, pelo fato de retirar um defeito que gera uma fragilidade na madeira, mas também negativa, justamente porque aumenta os custos do produtor com um processo a mais. Como as emendas também possuem comprimentos relativamente pequenos, talvez fosse melhor optar pela permanência dos nós nas lâminas de madeira mais próximas da linha neutra, onde os efeitos são mais amenos, onerando menos o processo produtivo.

Quando observados os tipos de lenho empregados nas vigas, conclui-se que a heterogeneidade das madeiras empregadas foi expressiva. Vale

ressaltar que, como são de espécies de gêneros diferentes, Eucalipto e Pinus têm diferentes características visuais. A primeira é proveniente do gênero angiosperma, também conhecida como folhosa, tendo bem definida a variação entre lenho de alburno e cerne, enquanto a segunda, proveniente do gênero gimnosperma, ou conífera, possui anéis de crescimento bem visíveis. Estas características são fundamentais para as primeiras inspeções, uma vez que permitem avaliar a respeito da homogeneidade da madeira. Madeiras provenientes do alburno das folhosas possuem densidade relativamente inferior à mesma madeira de cerne, enquanto madeiras provenientes de coníferas com anéis de crescimento mais próximos uns dos outros são de melhor qualidade do que aquelas cujos anéis encontram-se mais distantes.

O projeto de norma preconiza que a classificação do módulo de elasticidade das vigas deve ser realizada periodicamente sempre que o lote de madeiras for renovado e tiver valores com variação superior a 10% do módulo de elasticidade do anterior. Avalia-se, com esta premissa, a necessidade de um lote homogêneo de madeiras, o que não é observado nas vigas obtidas de eucalipto, justamente pela grande variação de lenho de alburno mesclado com lenho de cerne.

Outro fato a ser considerado é o gradiente de densidades que estas madeiras podem ter, assim como o gradiente de densidades encontrados nas vigas de eucalipto, que possuem valores expressivos e serão analisados no Capítulo 4. Logo, esta análise constata uma característica negativa, que provavelmente refletirá na heterogeneidade dos resultados, assim como no aparecimento de pontos de fragilidade provocados pelo tipo de lenho nas vigas de eucalipto. Pode ser observada na Figura 3.8 a variação das madeiras de cerne e alburno a partir da coloração diferenciada, característica da madeira de eucalipto. A madeira de coloração rosa/avermelhado escuro reflete a madeira de cerne, enquanto a rosa clara remete a presença de alburno.

Figura 3.8 – Variação de madeira de cerne (escura) e albúrneo (clara) de eucalipto.



Fonte: Autor.

Quanto às vigas de Pinus, observou-se um lote mais homogêneo, avaliado a partir da quantidade, das distâncias dos anéis de crescimento e da proporção entre madeira clara e escura que as tábuas apresentavam separadamente, como ilustrado na Figura 3.9. A grande maioria seguia um padrão, o que pode ser avaliado como um ponto positivo. No entanto, como foram observadas apenas as extremidades das vigas, não pode ser concluído nada a respeito das madeiras empregadas no interior de cada viga.

Figura 3.9 – Anéis de crescimento da madeira de pinus.



Fonte: Autor.

3.5 Controle de umidade e massa

Antes que qualquer ensaio ou procedimento fosse executado, foi realizado um controle de massa das vigas, a fim de saber se a umidade de cada uma delas havia estabilizado com a umidade ambiente, uma vez que estas vigas foram fabricadas em Taboão da Serra – SP e transportadas para Vitória – ES. Para esta etapa, foi utilizada uma balança digital de capacidade 150 kg e resolução de 0,05 kg. Os valores encontrados para as massas podem ser observados nas Tabelas 1 e 2.

Para aferição da umidade, também foi utilizado um equipamento digital da marca japonesa Keet, modelo HM 530, que tem resolução de 0,5%. O aparelho solicita um valor de densidade básica das madeiras, que foi calculado a partir do peso obtido dividido pelo volume de cada peça, valores estes de 0,5 e 0,65 g/cm³ para o pinus e para o eucalipto, respectivamente. A medição foi executada em quatro pontos médios, traçados em todas as vigas.

Os resultados obtidos pelo método digital mostraram-se ineficazes, uma vez que a variação interna era superior a 15% de umidade em algumas vigas, diferença provocada pela elevada variação de densidade das madeiras empregada nas mesmas. Sendo estas medidas inexpressivas, apenas os valores das massas foram utilizados para determinação da estabilidade em relação à umidade das vigas.

Como pode ser observado nas Tabelas 3.1 e 3.2, não houve variação significativa de massas para a maioria das vigas, sendo que aquelas que apresentaram esta variação tiveram apenas 0,05 kg de diferença. A partir destas informações, concluiu-se que a umidade havia estabilizado. Somente depois desta pesagem que foi inicializada a etapa de confecção de corpos de prova e tiveram início os ensaios envolvidos nesta pesquisa, que serão discutidos nos próximos capítulos deste trabalho.

Tabela 3.1 – Peso das vigas de Pinus (Kg).

Pinus	Pesagem dia	Pesagem dia
	29/05/2013	18/06/2103
P1	12,30	12,30
P2	11,45	11,45
P3	10,85	10,85
P4	12,00	12,00
P5	12,60	12,60
P6	11,65	11,65
P7	12,30	12,30
P8	11,25	11,25
P9	12,00	12,00
P10	11,55	11,50
P11	11,15	11,15
P12	10,95	10,95

Fonte: Autor.

Tabela 3.2 – Peso das vigas de Eucalipto (Kg).

Eucalipto	Pesagem dia	Pesagem dia
	29/05/2013	18/06/2103
E1	15,75	15,75
E2	14,30	14,30
E3	15,65	15,65
E4	15,50	15,50
E5	14,95	14,90
E6	15,40	15,40
E7	14,55	14,55
E8	15,20	15,20
E9	15,80	15,80
E10	14,45	14,45
E11	16,20	16,20
E12	13,50	13,55

Fonte: Autor.

4 ANÁLISE DO CISALHAMENTO NA MADEIRA E LINHA DE COLA

4.1 INTRODUÇÃO

Quando uma viga está sujeita a carregamentos que geram momentos fletores e esforços cortantes, esforços internos aparecem distribuindo as tensões normais, de tração e compressão e também cisalhantes pela seção da viga. Com o objetivo de avaliar estruturalmente vigas de MLC submetidas a estes carregamentos, antes do estudo da ruptura das mesmas, neste capítulo serão realizados ensaios mecânicos com a finalidade de quantificar as tensões de cisalhamento em corpos de prova oriundos das vigas pesquisadas.

Serão apresentados os métodos e os resultados dos ensaios realizados para obtenção das tensões de cisalhamento dos corpos de prova retirados das 24 vigas analisadas. Como se trata de madeira laminada cola, o cisalhamento pode ocorrer na madeira ou na linha de cola. Logo, foram realizados ensaios de cisalhamento na linha de cola e na madeira sólida, com objetivo de efetuar comparações entre a resistência do adesivo utilizado e a resistência natural da madeira.

Além disto, estes ensaios foram realizados em condições ambientais de umidade e com corpos de prova saturados, a fim de demonstrar a perda de resistência da madeira e do adesivo no cisalhamento em situações de umidade elevada, que servirá para concluir a respeito da qualidade e da utilização do adesivo para fins estruturais, uma vez que em determinadas situações, as estruturas podem estar sujeitas a precipitações pluviométricas diretas.

4.2 MÉTODOS DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO

Para a realização dos ensaios foram utilizados os procedimentos preconizados pela “American Society for testing and Materials”- ASTM D-905 (2009) para cisalhamento da linha de cola, e ASTM D-143 (2009), para o cisalhamento na madeira. Além disso, foram utilizadas as recomendações da

ABNT NBR7190:1997 para obtenção da resistência característica da madeira ao cisalhamento.

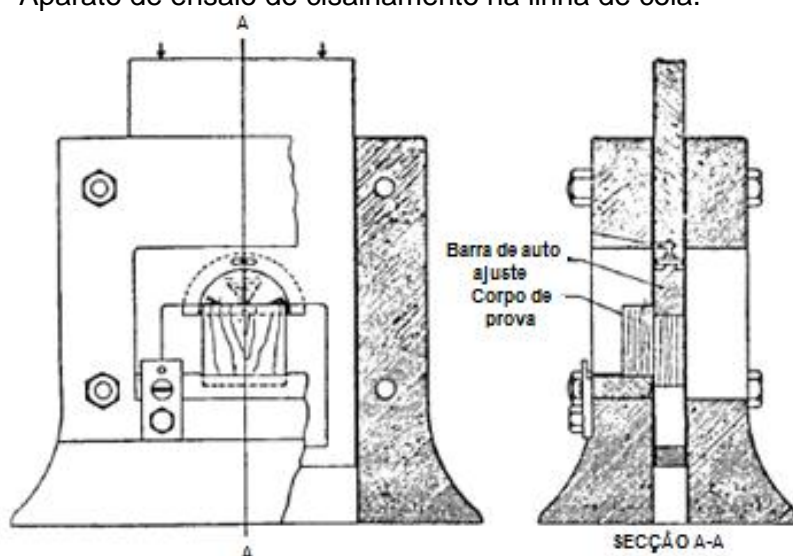
4.2.1 Cisalhamento na linha de cola

Segundo a ASTM D-905 (2009), as condições do processo de prensagem são os principais fatores para que os resultados obtidos sejam confiáveis e precisos, tais como: umidade da madeira, mistura dos adesivos, condições da aplicação do adesivo, aplicação da pressão, temperatura da sala de prensagem e as condições da cura do adesivo. Uma vez que o processo de confecção do material não foi acompanhado nesta pesquisa, as condições foram asseguradas pelo fabricante, sendo as mesmas utilizadas no processo de produção industrial.

Além disto, a norma em questão faz menção às condições do ensaio, dando importância a quantificação de fatores como a temperatura ambiente e a umidade dos corpos de prova.

Quanto ao aparato de ensaio, a norma especifica que a máquina universal não deve ter capacidade inferior a 6810 kgf em compressão, devendo ser utilizado um aparato de cisalhamento com aplicação lateral de carga de forma uniforme, como pode ser observado na Figura 4.1.

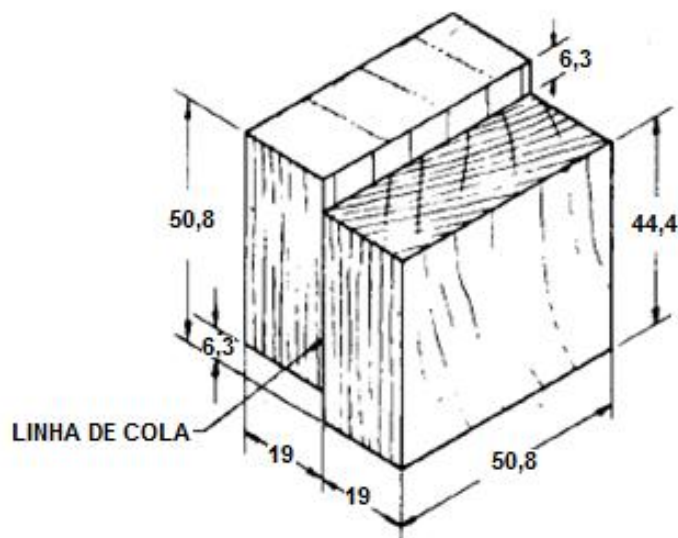
Figura 4.1 – Aparato de ensaio de cisalhamento na linha de cola.



Fonte: ASTM D-905 (2009).

Em relação às dimensões dos corpos de prova, a norma transmite de forma visual como deve ser confeccionado e quais as dimensões adequadas do mesmo, conforme pode ser observado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Configuração do corpo de prova de cisalhamento da linha de cola (medidas em milímetros).



Fonte: ASTM D-905 (2009)

A ASTM D-905 (2009) menciona também que a velocidade de aplicação de carga do ensaio deve ser de $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ para que o corpo de prova não rompa por impacto. Os métodos de obtenção da umidade de ensaio e da tensão de ruptura são descritos no item 4.2.2.

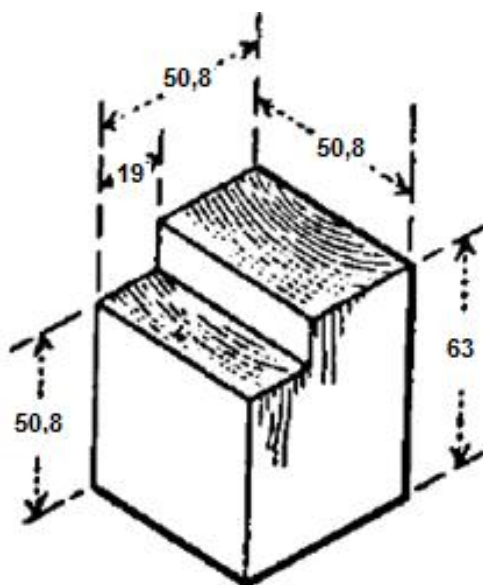
4.2.2 Cisalhamento nas fibras da madeira

A norma ASTM D-143 (2009) ressalta a importância da utilização de corpos de prova de pequenas dimensões para a caracterização física e mecânica das mais diversas espécies de madeira. É uma prática que existe, uma vez que há a tendência de unificar os métodos utilizados em todos os países para que sejam obtidos resultados confiáveis e uniformes, permitindo correlação dos dados de ensaios realizados em madeiras ao redor do mundo.

Dentre os diversos métodos de ensaios apresentados pela norma, o de cisalhamento paralelo às fibras da madeira encontra-se no item 14 da referida norma, no qual constam informações simplificadas sobre o formato de corpo de

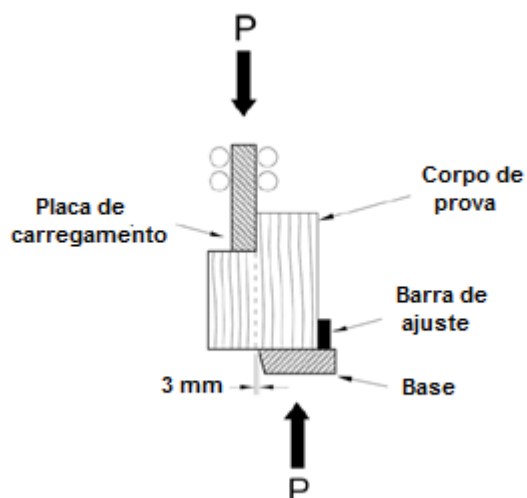
prova, o aparato de ensaio, os procedimentos e a velocidade do ensaio. Quanto ao formato do corpo de prova, observa-se uma pequena diferença em relação ao mencionado na ASTM D-905 (2009) analisado na Figura 4.2, mas em dimensões próximas, como pode ser observado na Figura 4.3. Este formato permite que o aparato de fixação do corpo de prova para realização do ensaio também seja semelhante, conforme apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.3 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira (medidas em milímetros).



Fonte: ASTM D-143 (2009).

Figura 4.4 – Esquema de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras de madeira.



Fonte: ASTM D-143 (2009).

Quanto ao procedimento de ensaio, a norma determina que o aparato de ensaio possibilite deslocamento de 3 milímetros da parte cisalhante do corpo de prova, para que seja avaliada o tipo de falha ocorrida. A velocidade do ensaio deve ser constante e aproximadamente de $0,6 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, não devendo ultrapassar 25% deste valor.

Após a realização dos testes de cisalhamento descritos pelas normas ASTM D-905 e ASTM D-143, é necessário obter a umidade em que os corpos de prova foram ensaiados, tomando a massa dos mesmos logo após o ensaio e posteriormente após a secagem em estufa ($103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) até massa constante. A fórmula para a obtenção da umidade é apresentada na Equação 4.1.

$$U\% = \frac{(MU-MS)}{MS} * 100 \quad (4.1)$$

Sendo:

U% = Teor de umidade do corpo de prova;

MU = Massa úmida (obtida logo após o ensaio); e

MS = Massa seca (obtida após a secagem em estufa).

Já para a obtenção da tensão resistente de cisalhamento f_v , é utilizada a Equação 4.2, que é oriunda do método clássico de resistência dos materiais (NASH, 1982), também descrita pela ABNT NBR7190:1997, que pode ser utilizada tanto para os ensaios de cisalhamento quanto para quaisquer outros ensaios de tração ou compressão dos Capítulos 5 e 6.

$$f = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad 4.2$$

Sendo:

f = compressão paralela às fibras (Pa);

$F_{m\acute{a}x}$ = Força máxima suportada pelo corpo de prova (N);

A = Área da superfície do corpo de prova (m^2).

Como a ASTM D-143 (2009) preconiza corpos de prova de cisalhamento na madeira com dimensões iguais à ABNT NBR 7190:1997, serão obtidos os valores de resistência característica ao cisalhamento f_{vk} a partir da norma brasileira, que preconiza a Equação 4.3. Após a obtenção do valor característico, é importante afixar uma umidade padrão $U=12\%$ a partir da Equação 4.4. Estas adequações serão realizadas apenas para os resultados do cisalhamento na madeira na condição seca ao ar, que serão utilizados na caracterização quanto a resistência das madeiras, descrita no Capítulo 5.

$$f_k = \left\{ 2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - f_{\frac{n}{2}} \right\} * 1,1 \quad 4.3$$

$$f_{12} = f_{u\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad 4.4$$

Sendo:

f_k = Resistência característica (MPa);

f_n = Resistências dos “n” corpos de prova ensaiados (MPa);

f_{12} = Resistência à compressão corrigida à 12% de umidade;

$f_{u\%}$ = Resistência à compressão na umidade ensaiada;

$U\%$ = Umidade da madeira ensaiada;

Para a Equação 4.3 referente à resistência característica, f_1 , f_2 e f_n são os valores das resistências dos “n” corpos de prova ensaiados, que devem ser dispostos em ordem crescente desprezando o valor máximo caso a quantidade seja ímpar. O valor característico f_k não deve ser inferior ao valor de f_1 ($f_k > f_1$) ou ainda ter valor inferior à setenta por cento do valor médio das resistências ($f_k > 0,7f_m$).

4.3 CORPOS DE PROVA E ENSAIOS DE CISALHAMENTO

Para a realização dos ensaios foram confeccionados 12 corpos de prova para cada situação de ensaio (Tabela 4.1), conforme descritos pelas ASTM D-905 e ASTM D-143, totalizando 96 corpos de prova.

Tabela 4.1 – Quantidade de corpos de prova de cisalhamento para cada madeira e ensaio realizado.

Ensaio Realizado	Madeiras Ensaadas	
	Eucalipto	Pinus
Cisalhamento na linha de cola seca		
Cisalhamento na linha de cola saturada	12	12
Cisalhamento paralelo às fibras da madeira seca		
Cisalhamento paralelo às fibras da madeira saturada		

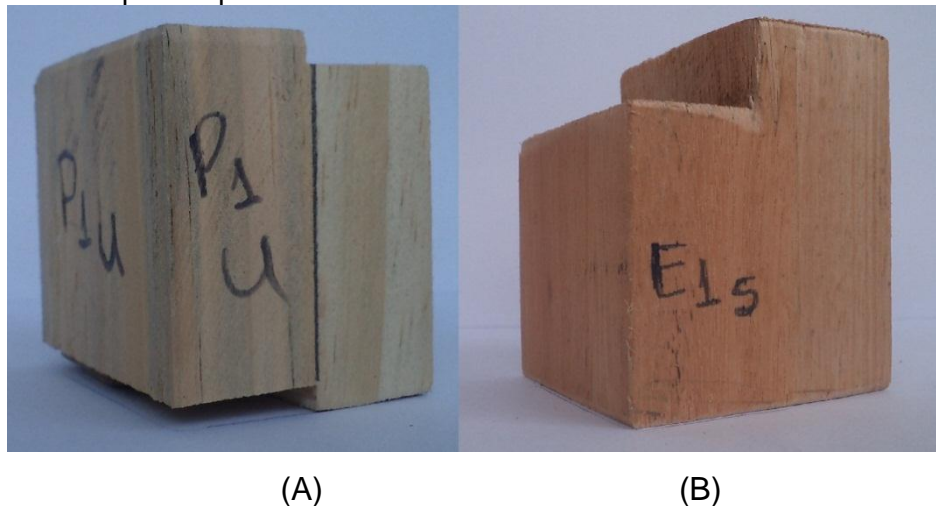
Fonte: Autor.

A confecção dos corpos de prova foi realizada por marceneiro experiente e cauteloso, evitando impactos com a serra circular utilizada para fazer os cortes para não danificar a linha de cola ou promover tensões na madeira, o que poderia provocar rachaduras e mascarar os resultados dos ensaios. Todos os corpos foram identificados e armazenados de forma a evitar choques e possíveis danos na linha de cola e na própria madeira.

A metade dos corpos de prova permaneceu imersa em um recipiente com água até a sua completa saturação das fibras, superior a 32% de umidade. Como as madeiras de pinus e eucalipto possuem características diferentes, o nível de saturação de cada uma delas foi diferente.

Na Figura 4.5(A) é possível observar um corpo de prova de cisalhamento na linha de cola confeccionado com madeira de pinus e na Figura 4.5(B) outro de cisalhamento paralelo às fibras da madeira confeccionado com madeira de eucalipto.

Figura 4.5 – Corpos de prova de cisalhamento na linha de cola e na madeira sólida.



Fonte: Autor

Todos os ensaios de cisalhamento foram realizados no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, localizado no município de Jerônimo Monteiro - ES. O local comporta uma máquina universal de ensaios com capacidade de 10 toneladas, como observado na Figura 4.6. A máquina possui o aparato de ensaio necessário, descrito pelas normas estudadas e apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.6 - Máquina universal de ensaios.



Fonte: Autor.

Figura 4.7 - Aparato de cisalhamento.



Fonte: Autor.

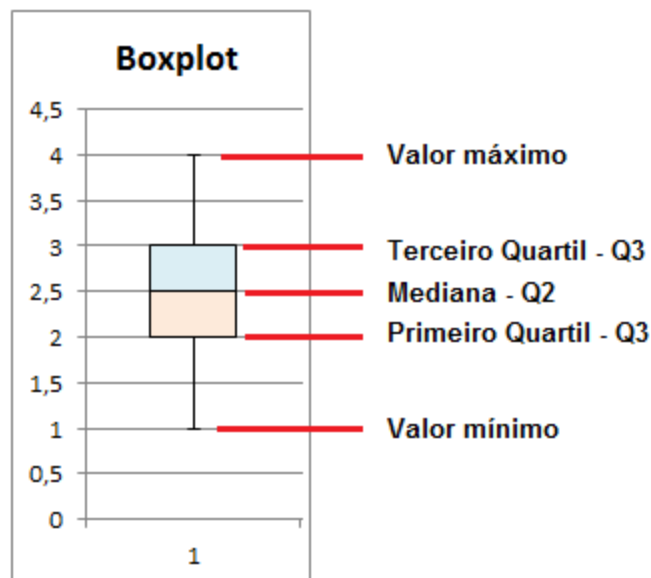
4.4 ANALISE ESTATÍSTICA

Para permitir as comparações necessárias entre os valores obtidos, foi necessário utilizar algumas ferramentas estatísticas, de forma a expor os resultados mais organizadamente e realizar testes de média confiáveis. Estas ferramentas realizadas por Montgomery e Runger (2003), são apresentadas nos itens 4.4.1 e 4.4.2.

4.4.1 Gráfico de caixas – “*Boxplot*”

A ferramenta utilizada para avaliar a distribuição empírica dos dados foi o gráfico de caixa, também chamado de “*boxplot*”. Trata-se de um gráfico construído com base em cinco números importantes: o valor mínimo; o primeiro quartil (Q1); a mediana (ou segundo quartil Q2); o terceiro quartil (Q3); e o valor máximo.

O gráfico é construído paralelamente ao eixo dos valores, dispondo de uma caixa que contém valores do primeiro ao terceiro quartil e linhas de máximo e mínimo. Um exemplo com legendas pode ser observado na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Exemplo de gráfico “*boxplot*”.

Fonte – Autor.

A caixa do gráfico de “*boxplot*” representa 50% dos valores centrais da distribuição. No caso de quantidades ímpares, a mediana é obtida a partir do valor central do conjunto de dados analisados, ou seja, quando ordenados, o valor que estiver no centro da ordem; e para o caso de quantidades pares, somam-se os dois valores centrais e a mediana é a média destes. O primeiro e terceiro quartil serão os valores respectivos aos 25% da amostra superior e inferior do valor da mediana.

Os limites superior e inferior são calculados a partir das Equações 4.5 e 4.6, e quando houver valores na distribuição fora destas equações, serão considerados discrepantes e representados em forma de um asterisco no gráfico de caixas.

$$\text{Limite Inferior} = Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1) \quad (4.5)$$

$$\text{Limite Superior} = Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1) \quad (4.6)$$

4.4.2 Teste t de médias

Como os conjuntos de dados obtidos podem ser disposto sob distribuições normais de médias, foi escolhido o teste t de comparação de médias, pela simplicidade e praticidade do método. Este teste estatístico é utilizado para comparar os resultados de amostras independentes a partir a análise de hipóteses. Como se trata de conjuntos de dados de médias e variâncias diferentes foi considerado para efeito de análise que as médias são heterocedásticas.

Com o objetivo de concluir se as médias são estatisticamente iguais, definem-se duas dentre as três hipóteses apresentadas nas Equações 4.7, 4.8 e 4.9.

$$H_0: \text{Média}_1 = \text{Média}_2 \quad (4.7)$$

$$H_1: \text{Média}_1 \neq \text{Média}_2 \quad (4.8)$$

$$H_2: \text{Média}_1 > \text{Média}_2 \quad (4.9)$$

H_0 é a hipótese de nulidade obrigatória, determina que as médias sejam estatisticamente iguais, enquanto H_1 e H_2 são hipóteses alternativas. Para a hipótese H_1 ser utilizada, a análise da curva normal estatística deve ser bicaldal, podendo os valores ser maiores ou menores do que H_0 , enquanto para a utilização de H_2 , os valores devem ser maiores do que a hipótese de nulidade, que representam uma análise unicaldal.

Para aferir se a hipótese de nulidade é aceita ou rejeitada, observa-se o valor-p da análise estatística. Determina-se um intervalo de confiança, estabelecendo uma percentagem de acordo com o que é considerada uma variação aceitável das amostras, de forma que se o valor - p encontrado for maior que o nível de significância desejado ($p > \alpha$), a hipótese H_0 não é rejeitada, verificando assim o pressuposto da normalidade. Já para os casos em que o valor-p for inferior ao nível de significância adotado ($p < \alpha$), rejeita-se a hipótese de nulidade e é possível aferir que as médias são estatisticamente diferentes.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios foram executados em conformidade com as normas, sendo a temperatura da sala na qual o ensaio foi realizado de aproximadamente 25 °C. Depois de ensaiados, os corpos de prova foram pesados em uma balança de resolução de 0,01 gramas, alocados em uma estufa com temperatura controlada de 103 ± 2 °C até massa constante, obtendo assim a massa seca. Os resultados podem ser observados nos itens 4.5.1 e 4.5.2.

4.5.1 Resultados e discussão do cisalhamento na madeira de eucalipto

Todos os corpos de prova da madeira de eucalipto ensaiado nas situações seca (U=13%) e saturada (U=50%) possuíam umidades próximas. O fato das dimensões dos corpos de prova para cisalhamento na linha de cola e na madeira serem diferentes não influenciou na umidade, que foi similar nos dois casos.

Os resultados obtidos para os 12 corpos de prova nas quatro situações de ensaios estão dispostos na Tabela 4.4, que possui referência com a Figura 4.9, onde podem ser observados os diagramas de “*boxplot*” para cada situação. São dispostos os valores de tensão de cisalhamento em todos os corpos de prova, suas médias e o respectivo coeficiente de variação.

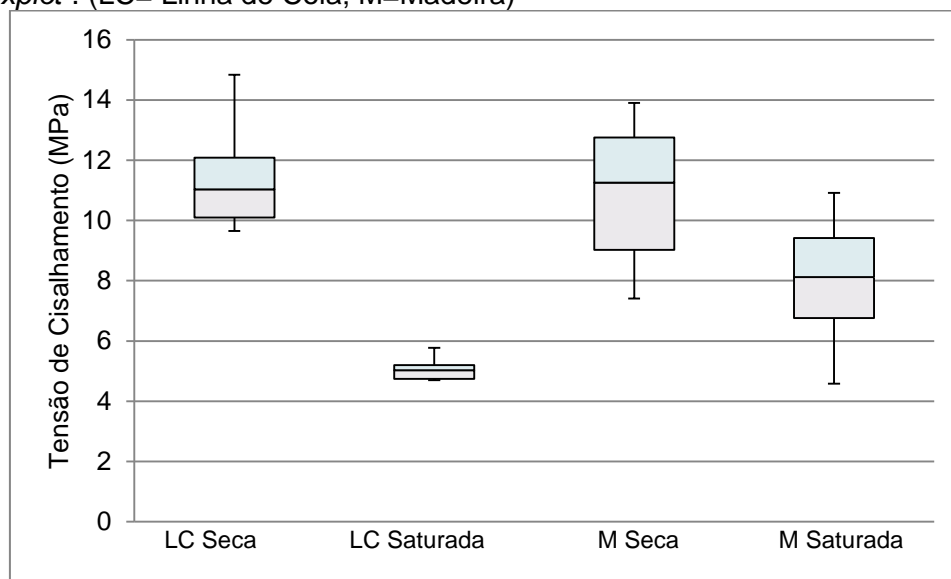
Considerando uma análise preliminar das médias, é possível verificar que houve uma perda de resistência quando efetuada a comparação entre as situações seca e saturada, o que já era esperado, uma vez que nesta situação a madeira tem suas propriedades mecânicas reduzidas.

Tabela 4.2 – Resultados do cisalhamento na madeira eucalipto.

Eucalipto	Linha de Cola Seca	Linha de Cola Saturada	Madeira Seca	Madeira Saturada
Média (MPa)	11,29	4,88	10,86	7,91
Coef. de Variação (%)	13,42	14,69	21,27	26,52
Mínimo (MPa)	9,65	4,69	7,40	4,58
Primeiro Quartil (MPa)	10,1	4,73	9,01	6,75
Mediana (MPa)	11,02	5,02	11,25	8,11
Terceiro Quartil (MPa)	12,09	5,19	12,75	9,42
Máximo (MPa)	14,83	5,77	13,90	10,91

Fonte: Autor.

Figura 4.9 – Apresentação da Tensão de Cisalhamento (MPa) no eucalipto em forma de “*boxplot*”. (LC= Linha de Cola; M=Madeira)



Fonte: Autor.

Nota-se no “*boxplot*” da Figura 4.9 que a situação de ensaio na linha de cola saturada teve a menor dispersão de valores, concluindo que para esta situação, as tensões tiveram a menor variação, justamente pela fragilidade da linha de cola imposta pela situação de saturação da madeira. Também na Tabela 4.4 observa-se que nesta situação a média da resistência ao cisalhamento foi a menor obtida.

Para o “*boxplot*” em questão, verifica-se que os blocos de linha de cola seca e madeira seca possuem médias próximas, apesar das dispersões serem diferentes. O fato da dispersão dos valores para a linha de cola e da madeira seca ter sido grande pode estar relacionado com a variabilidade de tipos de lenho analisado na caracterização visual da madeira de eucalipto (diferença entre lenho juvenil e adulto e entre cerne e alburno), o que pode alterar significativamente os valores de resistência da linha de cola.

Quando realizado o teste t de médias, a fim de comparar quatro conjuntos de dados, observou-se os valores expostos na Tabela 4.3. As hipóteses de igualdade de médias para a comparação entre os valores de linha de cola seca e da linha de cola saturada e para madeira seca e a madeira saturada são apresentadas nas Equações 4.7 e 4.8, representando uma análise bicaudal. Já para os pareamentos de linha de cola seca e a madeira seca e linha de cola saturada e a madeira saturada, foram utilizadas as

hipóteses obtidas pelas Equações 4.7 e 4.9, representando uma análise unicaldal.

Tabela 4.3 – Valor-p do pareamento de dados dos corpos de prova de eucalipto.

Pareamento de Médias	Valor - p
Linha de Cola Seca x Linha de Cola Saturada	0,000000000623
Madeira Seca x Madeira Saturada	0,00355
Linha de Cola Seca x Madeira Seca	0,299
Linha de Cola Saturada x Madeira Saturada	0,000174

Fonte: Autor.

Ao analisar os valores de “p” para os testes de médias a um nível de probabilidade $\alpha = 0,05$, é possível afirmar que apenas as médias das tensões de cisalhamento na linha de cola possuem resistências semelhantes à madeira em condição seca. Uma vez que o valor “p” foi superior a 0,05 não se rejeita a hipótese H_0 de nulidade. Para os outros casos, como $p < 0,05$, rejeita-se H_0 , aferindo que as médias não foram são estatisticamente iguais ao nível de 5%.

A situação de saturação reduziu a resistência tanto na comparação da linha de cola saturada com linha de cola seca quanto na madeira saturada com a madeira seca. Uma conclusão relevante a ser efetuada é que a madeira de eucalipto tem resistência de cisalhamento superior à linha de cola quando saturada, que comprova que o adesivo, ou a gramatura utilizada, ou as técnicas de prensagem empregadas, ou a variação de lenho de cerne e alburno foram suficientes para configurar resistência inferior à linha de cola em situação de saturação.

4.5.2 Resultados e discussão do cisalhamento na madeira de pinus

De forma análoga a madeira de eucalipto, a umidade dos corpos de prova de cisalhamento na linha de cola e na madeira de pinus, obteve baixa variação, tendo valores médios de 14% na condição seca e 140% para a saturada. Os resultados obtidos para os 12 corpos de prova de pinus para os quatro tratamentos seguem dispostos da mesma forma que os de eucalipto. Constam na Tabela 4.4 as tensões de cisalhamento médias obtidas nos

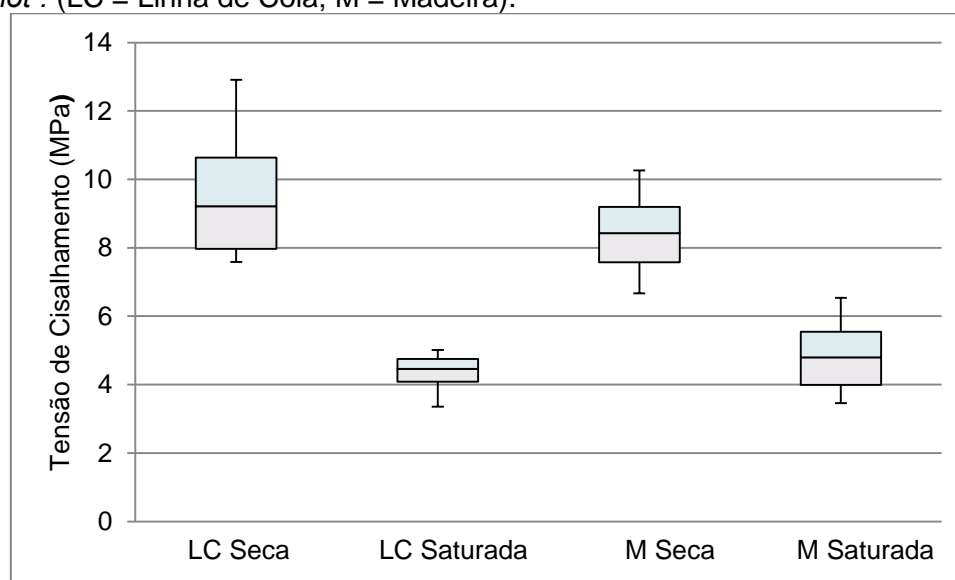
ensaios, que foram utilizadas para a confecção do “*boxplot*” apresentado na Figura 4.10.

Tabela 4.4 – Resultados do cisalhamento na madeira pinus.

Pinus	Linha de cola seca	Linha de cola saturada	Madeira seca	Madeira saturada
Média (MPa)	9,47	4,35	8,58	4,88
Coef de Variação (%)	17,69	13,29	17,27	21,05
Mínimo (MPa)	7,58	3,35	6,66	3,45
Primeiro Quartil (MPa)	7,97	4,08	7,57	3,99
Mediana (MPa)	9,21	4,45	8,42	4,79
Terceiro Quartil (MPa)	10,63	4,74	9,19	5,54
Máximo (MPa)	12,90	5,01	10,26	6,53

Fonte: Autor.

Figura 4.10 - Apresentação da tensão de cisalhamento (MPa) no pinus em forma de “*boxplot*”. (LC = Linha de Cola; M = Madeira).



Fonte: Autor.

Os corpos de prova que ficaram sujeitos à saturação tiveram impregnação de água relativamente superior quando comparados com a madeira de eucalipto, pelo fato da menor densidade e maior porosidade da madeira de pinus em relação ao eucalipto, mesmo que tenham permanecido o mesmo tempo sob condições de saturação.

Na observação inicial do “*boxplot*” da Figura 4.10, conclui-se que a dispersão dos valores do ensaio da linha de cola saturada foi a menor dentre as quatro situações. As médias dos corpos de prova de linha de cola e madeira

seca foram próximas, assim como a comparação entre linha de cola e madeira saturada.

Quando comparado com a madeira de eucalipto, a dispersão dos resultados foi inferior para os ensaios na madeira, seja ela em condição saturada ou seca, o que pode ser explicado pela menor heterogeneidade da madeira de pinus quando comparada com a de eucalipto, analisada na caracterização visual do material. Ainda assim, a variação dos resultados do cisalhamento na linha de cola em situação seca foi muito semelhante entre as duas madeiras.

Em relação ao teste estatístico para a madeira de pinus, observado na Tabela 4.5, as hipóteses de igualdade foram semelhantes às realizadas para a madeira de eucalipto, de forma que para comparação entre situações com corpos de prova secos x saturados foram utilizadas as hipóteses apresentadas nas Equações 4.7 e 4.8, enquanto para as comparações dentro os corpos de prova de cisalhamento na madeira x linha de cola as hipóteses foram apresentadas nas Equações 4.7 e 4.9.

Tabela 4.5 – Valor-p do pareamento de dados dos corpos de prova da madeira de pinus.

Pareamento de Médias	Valor - p
Linha de Cola Seca x Linha de Cola Saturada	0,000000119
Madeira Seca x Madeira Saturada	0,000000769
Linha de Cola Seca x Madeira Seca	0,0915
Linha de Cola Saturada x Madeira Saturada	0,0698

Fonte: Autor.

Considerando um nível de probabilidade $\alpha = 0,05$, as médias das tensões obtidas para a linha de cola foram estatisticamente iguais às aquelas ensaiadas na madeira, não rejeitando H_0 para estes casos, seja na situação seca ou na saturada, uma vez que o valor $p > \alpha$ para estes casos. Diferente do resultado obtido para a madeira de eucalipto, a madeira saturada não teve uma resistência superior à da linha de cola na mesma situação, logo, conclui-se que a gramatura do adesivo ou as condições de fabricação da MLC utilizada foi mais adequada para a madeira de pinus do que para a madeira de eucalipto.

Como o valor “p” foi inferior a 0,05 para os demais casos, rejeitou-se a hipótese de nulidade H_0 , concluindo que tanto para a madeira quanto para a linha de cola, a saturação reduziu a resistência ao cisalhamento para o pinus.

4.5.3 Resistência característica ao cisalhamento

Os valores de $f_{vk,12\%}$ serão importantes para a classificação da madeira quanto à sua resistência. As tensões utilizadas para este cálculo foram realizadas com base nos valores obtidos nos corpos de prova secos a0 ar, conforme consta na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Umidade média e resistência característica do cisalhamento nas madeiras de pinus e eucalipto.

Madeiras Ensaadas			
Pinus		Eucalipto	
U(%)	$f_{vk,12\%}$ (MPa)	U(%)	$f_{vk,12\%}$ (MPa)
14,17	7,3	13,47	6,8

Fonte: Autor.

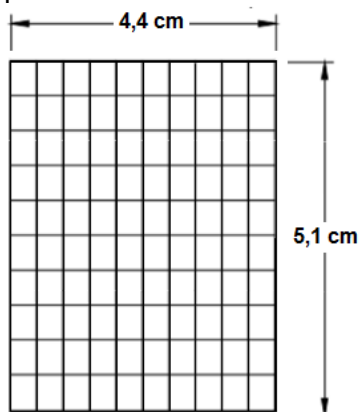
Observa-se que o valor da resistência característica da madeira de pinus foi superior ao da madeira de eucalipto, mesmo que as médias tenham assumido resultados superiores para o eucalipto. Isto pode ser explicado pelo menor coeficiente de variação dos resultados da madeira de pinus. Ainda assim, os resultados foram altos, tendo as madeiras boa resistência ao cisalhamento.

Outro fator preponderante para esta diferença de resultados foi observado no capítulo referente à análise visual, quando se constatou heterogeneidade de lenho de cerne e alburno na madeira de eucalipto, assim como presença de lenho juvenil para as duas madeiras. Para a madeira de eucalipto, observa-se com maior clareza que os corpos de prova confeccionados com lenho de alburno resistiram menos, tendo seus resultados sendo discrepantes quando comparados com confeccionados com madeira de cerne.

4.6 ANÁLISE DE FALHA DO ADESIVO

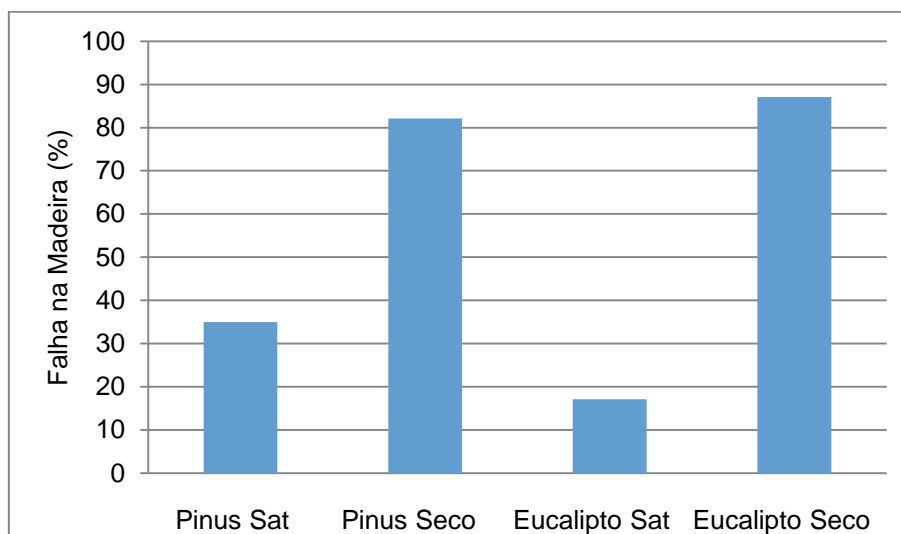
Depois da realização dos ensaios, os corpos de prova de cisalhamento na linha de cola foram submetidos ao teste de análise de falha na madeira, proposto pela ASTM D-905 (2009). Para a realização do mesmo, foi utilizada uma malha retangular transparente nas dimensões médias dos corpos de prova (5,1 x 4,4 cm) dividida em 100 partes iguais, como ilustrado na Figura 4.11. Esta malha foi sobreposta na falha e foram contadas quantas partes possuíam falha na madeira e quantas partes possuíam falha predominante na cola. A média dos resultados obtidos na análise de falha foi disposta na Figura 4.12 em função da falha obtida na madeira.

Figura 4.11 – Malha utilizada para realizar a análise de falha na linha de cola.



Fonte: Autor.

Figura 4.12 – Percentual de falha na madeira.



Fonte: Autor

De modo geral, a falha na madeira foi superior quanto ensaiada em situação seca, tendo os valores da madeira de eucalipto sido ligeiramente superiores aos da madeira de pinus. Normalmente a falha da madeira de eucalipto foi provocada na região da madeira de alburno, e, em alguns casos, observou-se a presença de madeira de lenho juvenil, que resistiu menos do que a linha de cola.

Na Figura 4.13 pode ser observado um corpo de prova de eucalipto evidenciando a ruptura na madeira de alburno de lenho juvenil. Já para os corpos de prova de pinus secos, notou-se que a ruptura na madeira foi na região de divisão do lenho primaveril e do outonal. Vale ressaltar que o lenho primaveril e outonal provenientes nas madeiras de pinus tem resistências diferenciadas, fator ligado à anatomia das coníferas.

Figura 4.13 – Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola seca (E= Eucalipto; P = Pinus).



Fonte: Autor.

Já os corpos de prova saturados possuíam pouca falha na madeira, tendo a madeira de eucalipto exibido uma falha superior do adesivo quando comparado à falha do adesivo no pinus. No entanto, a maior parte da ruptura foi evidenciada na linha de cola, como pode ser observado na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Ruptura em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola saturada (E= Eucalipto; P = Pinus).



Fonte: Autor.

Foram observados casos discrepantes, como notados na Figura 4.15. Para um dos corpos de prova de eucalipto saturados, notou-se que a ruptura ocorreu em cerca de 80% da madeira, uma vez que esta era proveniente de lenho juvenil. Já para o corpo de prova de pinus, a falha foi 100% na madeira, sendo para este caso uma evidência que o adesivo resistiu mais do que a madeira, mesmo em situação saturada.

Figura 4.15 – Rupturas anômalas em corpos de prova de cisalhamento na linha de cola saturada (E= Eucalipto; P = Pinus).



Fonte: Autor.

5 ANÁLISE DA COMPRESSÃO NA MADEIRA

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os métodos e os ensaios de caracterização mecânica realizada para obtenção das propriedades elásticas em compressão paralela às fibras da madeira. Foram utilizados corpos de prova das vigas de MLC estudadas, analisados a partir de dois métodos de ensaio, um estático e outro dinâmico.

O método dinâmico é muito difundido na construção civil, realizado com equipamento PUNDIT Lab – “*Portable Ultrasonic Non-destructive Testing*”, distribuído pela empresa *Proceq®*, que tem princípio básico a utilização de pulsos ultrassônicos. Já o método estático foi realizado segundo preconiza a ABNT NBR 7190:1997, utilizando uma prensa hidráulica de aplicação de carga e aparato de medição de deformações com resolução de 0,001 mm.

Os módulos de elasticidade estático e dinâmico foram obtidos e comparados pelo método matemático de regressão linear a fim de confirmar se o método ultrassônico é uma boa alternativa em substituição ao estático. A classificação de resistência das madeiras também foi avaliada a partir das tensões de ruptura obtidas no método estático.

5.2 MÉTODOS DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Para a realização dos ensaios de compressão paralela às fibras foram utilizados os procedimentos preconizados pelo anexo B da ABNT NBR 7190:1997 e pelo manual do equipamento de emissão de pulsos ultrassônicos PUNDIT Lab utilizado em ensaios de corpos de prova de concreto.

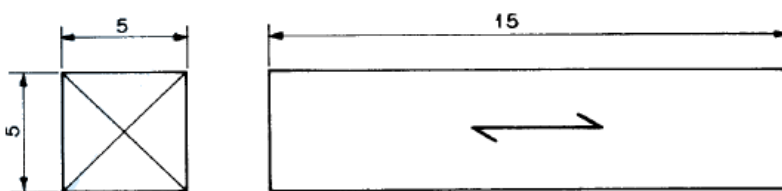
5.2.1 Compressão Paralela às Fibras

O anexo B da ABNT NBR 7190:1997 faz menção a diversos métodos de ensaios para determinação de propriedades físicas e mecânicas da madeira,

objetivando a caracterização do material e a aquisição de dados confiáveis para a utilização da mesma em projetos estruturais. Além dos ensaios físicos de umidade e densidade, já descritos no Capítulo 3, será utilizado o método de obtenção das propriedades de rigidez por meio da compressão paralela às fibras da madeira. Este método instrui como encontrar os valores do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras E_{c0} e a resistência à compressão paralela às fibras f_{c0} .

A resistência a compressão paralela às fibras deve ser calculada a partir da máxima tensão de compressão atuante em um corpo de prova prismático de seção transversal quadrada de lados 5 cm e altura 15 cm, assim como apresentado na Figura 5.1. Os corpos de prova devem ser retirados com exatidão de 0,1 mm por lado.

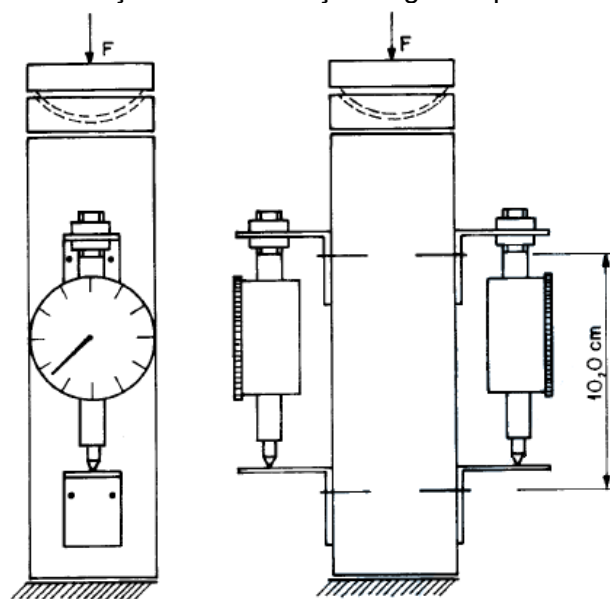
Figura 5.1 – Dimensões em centímetros do corpo de prova de compressão paralela às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Para a obtenção do módulo de elasticidade, a norma brasileira preconiza que sejam realizadas medições de deformação em pelo menos duas faces opostas do corpo de prova, com auxílio de relógios comparadores com resolução de 0,001 mm. Para a fixação dos relógios, sugere-se que sejam acopladas cantoneiras metálicas, que devem ser pregadas ou parafusadas aos corpos de prova. Para tanto, deve-se marcar linhas de furação distadas 10 cm uma da outra, onde deve ser marcada a base de medida que sofrerá a deformação específica, como ilustrado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Aparato de medição de deformação sugerido pela NBR 7190-97.



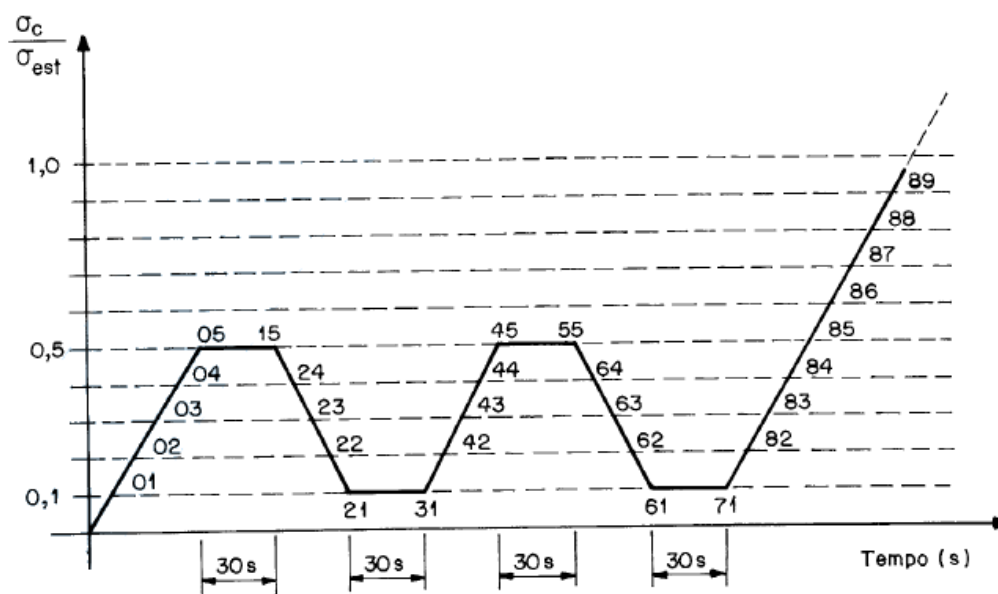
Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

A presença de uma rótula articulada entre o corpo de prova e o aplicador de carga auxilia no ajuste do mesmo, possibilitando obtenção de resultados mais confiáveis e sem o efeito de inclinação do corpo de prova.

Antes de realizar o ensaio do módulo de elasticidade é necessário que pelo menos um corpo de prova seja rompido para obtenção da resistência à compressão paralela às fibras estimada $f_{c0,est}$, obtida a partir da Equação 4.2 do Capítulo 4, que pode ser utilizada para o ensaio de compressão.

Desta forma, é possível traçar um ciclo de carregamento igual para todos os ensaios com o mesmo lote de madeiras, utilizando percentuais fixos de $f_{c0,est}$ em pontos de aferição de deformação, que podem ser observados no eixo y do ciclo de carregamento apresentado na Figura 5.3. Este ciclo estipula o traçado do carregamento, os pontos de medida das deformações e o tempo em que o carregamento deve ser aplicado, sendo que o mesmo deve ser monotônico crescente, com taxa aproximada de 10 Mpa.min^{-1} .

Figura 5.3 - Ciclo de aplicação de cargas para a compressão paralela às fibras.



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

Para a obtenção do Módulo de Elasticidade E_{c0} a partir de ensaios com instrumentação mecânica, como esquematizado na Figura 5.2, a leitura deve ser realizada apenas até o ponto 87 marcado na Figura 5.3, que registra 70% da carga de ruptura estipulada obtida pela resistência estimada, quando devem ser retirados os aparatos de leitura, eliminando o risco da ruptura e de possíveis danos aos relógios medidores.

O módulo de elasticidade deve ser obtido a partir da Equação 5.1, relacionada aos princípios básicos da resistência dos materiais para materiais elásticos que seguem a Lei de Hooke (NASH, 1982).

$$E_{c0} = \frac{P \cdot l}{A \cdot \Delta l} \quad 5.1$$

Sendo:

E_{c0} = Módulo de elasticidade;

P = Força aplicada;

l = Distância entre fixação dos relógios;

A = Área da seção onde é realizado o carregamento

Δl = Variação do comprimento aferida pelos relógios comparadores.

Esta fórmula reflete à equação sugerida pela norma brasileira, que sugere a utilização dos valores de módulo de elasticidade obtidos apenas nas leituras de carregamento e deformação referentes a 10% e 50% da linha elástica formada pelo diagrama de tensão x deformação do ensaio de compressão.

O módulo de elasticidade será obtido a partir da média dos cinco primeiros valores obtidos na zona elástica do ensaio de compressão, referentes a 10, 20, 30, 40 e 50% (referentes aos pontos 71, 82, 83, 84 e 85 da Figura 4.3) do carregamento estipulado, considerado pela norma como trecho de linearidade da madeira.

Os valores médios de $E_{c0,m}$ e $f_{c0,m}$ são obtidos a partir da média aritmética obtida entre os corpos de prova ensaiados. Quanto ao número de corpos de prova, a ABNT NBR 7190: 1997 respalda o mínimo de 6 corpos de prova para espécies conhecidas e 12 para desconhecidas.

5.2.2 Classificação quanto à resistência das madeiras

A classificação quanto à classe de resistência é uma importante ferramenta para a padronização das propriedades mecânicas das madeiras, de forma a enquadrar madeiras diferentes em grupos de resistência semelhantes. Para isto, a norma brasileira determina que sejam obtidos os parâmetros apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, sendo a primeira referente às madeiras provenientes de coníferas e a segunda por folhosas.

As duas tabelas fazem referência aos valores das tensões de resistência a compressão paralela às fibras da madeira característica ($f_{c0,k}$), cisalhamento característico da madeira (f_{vk}) obtido no Capítulo 4, módulo de elasticidade longitudinal médio ($E_{c0,m}$), densidade básica e aparente (ρ), sendo todas estas propriedades calculadas para a umidade padrão de 12%.

Tabela 5.1 – Classes de resistência de madeiras coníferas.

Classificação das coníferas – U=12%					
Classes	$f_{c0,k}$ (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,m}$ (GPa)	ρ básica (Kg.m ⁻³)	ρ aparente (Kg.m ⁻³)
C20	20	4	3,5	400	500
C25	25	5	8,5	450	550
C30	30	6	14,5	500	600

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

Tabela 5.2 – Classes de resistência de madeiras folhosas.

Classificação das folhosas – U=12%					
Classes	$f_{c0,k}$ (MPa)	f_{vk} (MPa)	$E_{c0,m}$ (GPa)	ρ básica (Kg.m ⁻³)	ρ aparente (Kg.m ⁻³)
C20	20	4	9,5	500	650
C30	30	5	14,5	650	800
C40	40	6	19,5	750	950
C60	60	8	24,5	800	1000

Fonte: ABNT NBR 7190:1997

O valor da resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira $f_{c0,k}$, é obtido a partir da Equação 4.3 e corrigido para umidade padrão de 12% pela Equação 4.4 apresentadas no Capítulo 4. Já o módulo de elasticidade obtido na compressão paralela às fibras deve ser corrigido para umidade padrão a partir da Equação 5.2.

$$E_{12} = E_{u\%} \left[1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad 5.2$$

Sendo:

U% = Umidade da madeira ensaiada;

 $E_{u\%}$ = Módulo de elasticidade na umidade ensaiada; E_{12} = Módulo de elasticidade corrigido à 12% de umidade.

5.2.3 Velocidade de pulsos ultrassonoros

O método de ensaio ultrassonoro é muito utilizado na construção civil, principalmente para obtenção de dados característicos do concreto. Não são encontradas informações no manual do equipamento para ensaios com madeiras, mas existem trabalhos realizados no meio científico que utilizam este método para comparação com métodos estáticos, como o trabalho realizado por Stangerlin et al. (2008), que faz uma análise comparativa do módulo de elasticidade obtido com o método estático obtendo resultados e correlações significativas.

Segundo a empresa fornecedora do equipamento, o PUNDIT Lab é um instrumento de teste que utiliza a velocidade de pulso ultrassônico para examinar a qualidade do concreto. A partir do tempo que a onda ultrassônica gasta para percorrer um espaço qualquer, é possível calcular a velocidade desta onda e conseqüentemente o módulo de elasticidade dinâmico (PROCEQ, 2014).

O equipamento é composto por uma central de dados e dois transdutores de 5,0 cm de diâmetro. É possível emitir os dados por computador ou realizar a leitura do tempo gasto pela onda para percorrer o corpo de prova, obtendo assim uma velocidade média. O processo de ensaio requer atenção no controle das informações dadas ao aparelho observado na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Equipamento de emissão de ondas ultrassonoras – PUNDIT Lab



Fonte: Autor

Antes da utilização do equipamento, o mesmo deve ser aferido com as configurações padronizadas do manual. Para facilitar a leitura e melhorar a área de contato entre os transdutores e o corpo de prova, sugere-se a aplicação de um gel ou vaselina entre as superfícies de contato. As dimensões e a massa inicial dos corpos de prova devem ser aferidas, a fim de calcular a umidade e a densidade aparente da madeira, como descrito pela norma brasileira.

Para a aquisição das características elásticas dos corpos de prova pelo método ultrassonoroso foi utilizada a Equação 5.3, que gera a constante dinâmica C_{LLv} denominada módulo de elasticidade dinâmico, posteriormente correlacionado com o módulo de elasticidade estático a fim de verificar a relação entre os dois ensaios.

$$C_{LLv} = \delta V_{LLv}^2 * 10^{-4} \quad 5.3$$

Sendo:

C_{LLv} = Módulo de elasticidade dinâmico (kN.cm⁻²);

δ = Densidade aparente da madeira (g.cm⁻³);

V_{LLv} = Velocidade de propagação da onda (m.s⁻¹).

O manual do equipamento descreve métodos indiretos para utilização do mesmo, no entanto a Equação 5.3 é válida apenas quando o pulso ultrassonoroso é emitido na direção longitudinal das fibras de madeira, caso contrário, Bartholomeu (2001) afirma que pode não haver uma transmissão satisfatória dos pulsos, que influenciaria nos resultados obtidos e não demonstraria confiabilidade no método.

5.3 CORPOS DE PROVA E ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Foram confeccionados 26 corpos de prova, sendo 13 de eucalipto e 13 de pinus conforme mostra a Tabela 5.3. Como os corpos de prova têm dimensões 5x5x15 cm e a espessura das lâminas utilizadas para a confecção

das vigas era de 3,0 cm, inevitavelmente os corpos de prova confeccionados possuíam uma linha de cola. Para este ensaio só foram utilizados corpos de prova secos, à umidade ambiente.

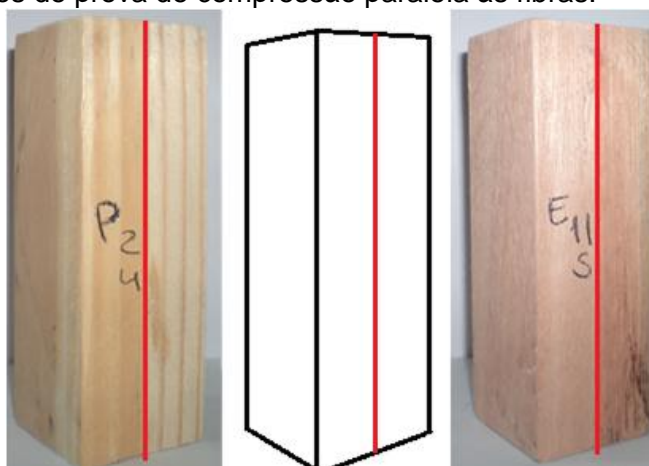
Tabela 5.3 – Quantidade de corpos de prova de compressão paralela às fibras para cada madeira e ensaio realizado.

Ensaio Realizado	Madeiras Ensaçadas	
	Eucalipto	Pinus
Compressão paralela às fibras – Ensaio dinâmico e estático.	12	12
Compressão paralela às fibras – Cálculo de $f_{c0,est}$.	1	1

Fonte: Autor.

Para padronizar os corpos de prova, a usinagem dos mesmos foi realizada de forma que a linha de cola passasse pelo centro, evidenciada na Figura 5.5, que ilustra dois corpos de prova utilizados no ensaio, onde pode ser observado o corpo de prova P2 de pinus, com contraste dos anéis de crescimento exatamente ao centro, já no corpo de prova E11 de eucalipto, observa-se o contraste entra madeira de cerne e alburno.

Figura 5.5 – Corpos de prova de compressão paralela às fibras.



Fonte: Autor.

Desta forma, todos os corpos de prova possuíam uma mescla de tábuas oriundas de mesma madeira, no entanto com possibilidade de idades,

densidades e propriedades diferentes, o que pode interferir diretamente nos resultados dos dois métodos apresentados.

Antes de iniciar os ensaios, uma amostra de cada madeira foi destinada à ruptura, como descrito pela ABNT NBR 7190:1997 para que fosse estimado o valor de $f_{c0,est}$. O ensaio dinâmico foi o primeiro a ser executado com os 12 corpos de prova de cada madeira. As velocidades de pulsos ultrassonoros foram verificadas três vezes para cada amostra, sendo que a maioria dos valores obtidos foi constante.

Uma vez realizado o ensaio dinâmico e estimada a tensão de ruptura, foram traçados ciclos de carregamento para cada uma das madeiras e executado o ensaio estático. O aparato de obtenção de módulo de elasticidade, apresentado na Figura 5.6, contou com dois relógios com resolução de 0,001 mm fixados em chapas de aço, que foram distados da base de medida de 10 cm em cada corpo de prova, marcados antes do ensaio.

Depois de rompidos, os corpos de prova foram pesados em balança digital com resolução de 0,01 gramas, alocados em estufa com temperatura controlada de 103 ± 2 °C até massa constante, obtendo assim a massa seca para calcular a umidade.

Figura 5.6 – Aparato de ensaio de compressão paralela às fibras.



Fonte: Autor.

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na análise estatística, as médias foram comparadas pelo teste t a partir do valor – p e das hipóteses apresentadas nas Equações 4.7 e 4.8, descritas no item 4.4.2. Além da comparação de médias, foi realizada uma regressão linear para cada comparação entre ensaio estático e dinâmico analisada em Montgomery e Runger (2003).

A regressão linear simples é uma ferramenta estatística que estima os possíveis valores de uma variável dependente em função de outra independente, com o objetivo de prever o comportamento da variável dependente. Para os ensaios realizados, a variável dependente será aquela relacionada ao ensaio dinâmico, uma vez que o estático prevê o valor exato que o corpo de prova terá sua ruptura decretada. Uma regressão simples é representada por uma linha de tendência obtida a partir de uma função do primeiro grau, como a da Equação 5.4. As letras “a” e “b” da Equação 5.4 podem ser obtidas a partir das Equações 5.5 e 5.6, respectivamente. Elas são funções dos valores “x”, “Y” e do número de amostras estudadas, sendo que, quanto maior a amostragem trabalhada, melhor será o comportamento da linha de tendência.

$$Y = ax + b \quad 5.4$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum x}{n} \quad 5.5$$

$$b = \frac{[n \sum xY - (\sum x \sum Y)]}{[n \sum x^2 - (\sum x)^2]} \quad 5.6$$

Sendo:

Y = Variável dependente;

x = Variável independente; e

n = Número de amostras.

Traçada a linha de tendência, é possível determinar a porcentagem dos valores explicados a partir do quadrado da correlação entre eles, também

chamados de coeficiente de determinação R^2 . Este coeficiente pode ser encontrado a partir da Equação 5.7. A soma dos quadrados dos resíduos e dos quadrados totais, relacionadas a esta equação pode ser obtida a partir das Equações 5.8 e 5.9, respectivamente.

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{total}} \quad 5.7$$

$$SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad 5.8$$

$$SQ_{total} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad 5.9$$

Sendo:

SQ_{res} = Soma dos quadrados dos resíduos; e

SQ_{total} = Soma dos quadrados totais.

y_i = Valor observado.

\hat{y} = Valor estimado (previsão) de y ;

\bar{y} = Média dos valores;

n = Número de amostras.

Como a linha de tendência trata de uma função que representa determinada porcentagem de valores explicados, quanto mais próximo o valor de R^2 desta função for igual a 1 (ou 100%), melhor será a correlação entre a variável dependente com a independente.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção – LEMAC à temperatura ambiente. Os teores de umidade das madeiras de pinus e eucalipto foram calculados com a Equação 4.1 apresentada no Capítulo 4, e seus valores médios foram de 14,47% e 15,62%, respectivamente. Os resultados obtidos para os dois métodos ensaiados, dispostos na Tabela 5.4, foram correlacionados numericamente para análise inicial.

Tabela 5.4 – Módulos de elasticidade obtidos para as madeiras de pinus e eucalipto com ensaio estático de compressão paralela às fibras e dinâmico longitudinal às fibras.

Corpo de Prova	Resultados dos Ensaios (GPa)			
	Pinus – PUNDIT Lab	Pinus – Ensaio Estático	Eucalipto - PUNDIT Lab	Eucalipto – Ensaio Estático
1	10,77	7,50	23,76	16,91
2	12,20	7,63	22,48	13,91
3	11,75	7,09	22,00	16,83
4	15,97	8,75	24,77	18,99
5	18,44	10,25	27,47	20,37
6	17,01	9,46	22,41	13,32
7	15,33	10,41	25,60	18,03
8	14,67	9,77	22,94	17,24
9	18,58	10,87	24,58	14,30
10	15,32	8,83	23,26	14,81
11	15,56	9,39	26,08	19,40
12	16,29	8,22	23,11	16,78

Fonte: Autor.

Para efeito de comparação dos resultados estáticos com dinâmicos, foi realizada uma análise de porcentagem de variação dos valores, descritas por Sales et al. (2010) a partir das Equação 5.10.

$$\text{Porcentagem de variação (\%)} = \frac{E_D - E_E}{E_E} * 100 \quad 5.10$$

Sendo:

E_D = Módulo de elasticidade dinâmico;

E_E = Módulo de elasticidade estático.

Ao comparar a média dos resultados obtidos para cada madeira, o ensaio dinâmico por meio do PUNDIT Lab majorou os valores encontrados pelos ensaios estáticos, sendo este valor 40% maior para a madeira de pinus e 30% para a madeira de eucalipto. O fato da majoração dos resultados tanto para a madeira de pinus quanto para a de eucalipto pode estar relacionado ao efeito da linha de cola, que pode ter se tornado um caminho preferencial para as ondas emitidas pelo equipamento ultrassonor. Não foram realizados ensaios de densidade da linha de cola, mas pressupõe-se que esta seja superior à densidade das madeiras, que pode explicar tal fenômeno.

Bodig e Jayne (1993) estimaram que esta majoração possa ser de 5 a 15% superior para os resultados dinâmicos. Stangelin et al. (2008) ensaiaram madeira serrada maciça de pinus e eucalipto nas dimensões utilizadas neste trabalho, e o método ultrassonoro também majorou os resultados, no entanto, com valores percentuais um tanto inferiores aos deste trabalho, sendo de 18 a 20% para a madeira conífera e 19 a 29% para a folhosa.

Ballarin e Nogueira (2005) também avaliaram o desempenho do método para corpos de prova de madeira de *pinus taeda* de lenho juvenil e adulto, encontrando valores superiores para o método dinâmico que variavam de 34% a 40%, que vão ao encontro dos valores obtidos neste trabalho. Puccini (2002) também encontrou valores semelhantes para a madeira de pinus, sendo a relação entre a os métodos dinâmico e estático de 1,28.

Bartholomeu (2001) obteve resultados majorados para os ensaios realizados em corpos de prova das madeiras de *cupiúba*, *eucalipto citriodora* e *pinus ellioti* ensaiadas nas condições seca e saturada. Para a condição de madeira seca ao ar, que condiz com a estudada neste trabalho, os valores encontrados para a constante de elasticidade ultrassonora foram, respectivamente, 31%, 6% e 38% superiores ao método de ensaio estático. O valor encontrado pelo autor tem grande divergência para a madeira de eucalipto quando comparado com os valores apresentados neste trabalho. Esta diferença está relacionada a alta densidade do *eucalipto citriodora*, superior a do gênero de eucalipto ensaiado.

No trabalho de Sales et al. (2010) foi realizado o ensaio ultrassonoro em peças estruturais de *Pinus sp.* e *Eucalipto grandis* com 5 x 11 x 300 cm de dimensões. A porcentagem de variação obtida pelos autores foi a que melhor se adequou ao preconizado por Bodig e Jayne (1993), sendo de 8,68% para o eucalipto e 10,74% para o pinus.

Para obtenção de dados estatísticos concretos, foi realizado o teste t de médias unicaldal para o teste de hipóteses pelo valor-p, verificado na Tabela 5.5. Comprova-se que as médias diferem-se entre si a um nível de significância $\alpha=0,05$, uma vez que $\alpha > p$, rejeitando a hipótese de nulidade intrínseca à igualdade estatística das médias, o que demonstra que o ensaio dinâmico em questão não representa valores estatisticamente iguais aos gerados pelo ensaio estático para uma análise da constante elástica.

Tabela 5.5 – Valor-p do pareamento de dados dos corpos de prova dos ensaios estático e dinâmico por ultrassom (Pundit Lab)

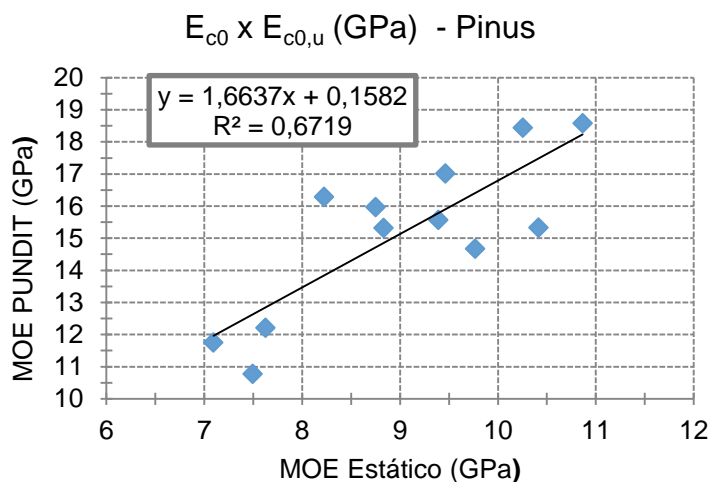
Pareamento de Médias	Valor - p
Pinus - Estático x Dinâmico	0,000000459
Eucalipto - Estático x Dinâmico	0,0000000088

Fonte: Autor.

Apesar da majoração dos valores analisados e de diferenciar-se estatisticamente quando analisado o valor-p pelo teste de hipóteses, a correlação entre os ensaios na madeira de pinus, disposta na Figura 5.7, foi considerada boa, tendo a equação $Y = 1,6637x + 0,1582$ explicado 67,19% dos valores encontrados.

Apesar desta correlação, o método de ensaio dinâmico pode não ser uma boa alternativa quando for possível a utilização de corpos de prova. Apesar da obtenção dos módulos de elasticidade ser mais ágil utilizando o método ultrassonor, o desperdício de material não é tão grande, viabilizando o ensaio estático convencional.

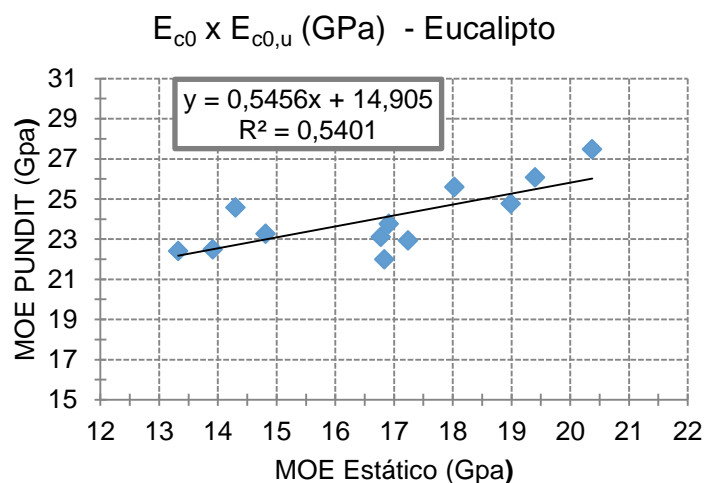
Figura 5.7 – Correlação entre o ensaio estático e dinâmico para a madeira de pinus.



Fonte: Autor.

Para a madeira de eucalipto, a equação $Y = 0,5456x + 14,905$ explicou 54,01% dos valores relacionados ao ensaio estático, como observado na Figura 5.8. Este valor é ainda inferior ao encontrado para a madeira de pinus, o que reforça a ideia de que o método não tenha apresentado bons resultados.

Figura 5.8 - Correlação entre o ensaio estático e dinâmico para a madeira de eucalipto.



Fonte: Autor.

Analisando a literatura, os valores obtidos para as correlações não são compatíveis com os encontrados por Ballarin e Nogueira (2005), que obtiveram correlação próxima a 90%. Satargelin et al. (2008) obtiveram valores de correlação de 86% e 92% para as madeiras de eucalipto e pinus, respectivamente.

Considerando uma boa regressão àquela que seja superior a 70%, avalia-se que os valores encontrados para o método dinâmico não representam o ensaio estático para este trabalho, tais como os resultados obtidos para os mesmos ensaios realizados por Bartholomeu (2001), que encontrou correlações de 48% para os ensaios. Vale a pena ressaltar que nenhum dos trabalhos observados fornecia comparação para corpos de prova com linha de cola. A presença da mesma pode ter interferido diretamente na obtenção de valores com melhor correlação.

Quanto a classificação da madeira em relação a sua resistência, na Tabela 5.6 são apresentados os valores médios encontrados para a densidade aparente (ρ), umidade ($U\%$), resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$), obtida a partir da Equação 4.3 e corrigida pela Equação 4.4 e do módulo de elasticidade estático (corrigido pela Equação 5.2) das madeiras de pinus e de eucalipto. Estes valores são acompanhados dos respectivos coeficientes de variação dos resultados. Vale ressaltar que os valores de

densidade e umidade obtidos são para o conjunto de duas lâminas de madeira aderidas, tendo assim valores aproximados para cada corpo de prova.

Tabela 5.6 – Densidade aparente, umidade, resistência média à compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade das madeiras de pinus e eucalipto.

Madeiras Ensaçadas							
Pinus				Eucalipto			
ρ	U	$f_{c0,k,12\%}$	$E_{c0,12\%}$	ρ	U	$f_{c0,k,12\%}$	$E_{c0,12\%}$
0,51	14,47	26,12	9,45	0,63	15,63	49,83	17,95

ρ – Densidade aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); U – Umidade (%); $f_{c0,m}$ – Resistência a compressão paralela às fibras da madeira (MPa); E – Módulo de elasticidade longitudinal (GPa).

Fonte: Autor.

Observados os valores das Tabelas 5.6 de compressão e 4.6 de cisalhamento, pode-se concluir que a madeira de pinus ensaiada encaixa-se no grupo C25 de classe de resistência para madeiras coníferas, com umidade referente de 12%. Já a madeira de eucalipto foi classificada no grupo das C40.

Quando avaliada a ruptura dos corpos de prova, observou-se que por serem compostas por lâminas de madeiras diferentes, normalmente a de menor resistência teve maior deformação do que a outra, provocando uma deformação diferenciada (curva no eixo do corpo de prova). Este comportamento pode ser observado na Figura 5.9 e representou a ruptura predominante nos corpos de prova, sendo observada em 19 dos 24 ensaiados.

Figura 5.9 – Análise de ruptura de corpo de prova.



Fonte: Autor.

6 ANÁLISE DA TRAÇÃO NA MADEIRA E NA EMENDA COLADA

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os métodos de ensaios utilizados para avaliar a resistência à tração das ligações denteadas coladas das vigas de MLC e verificar se as mesmas tem resistência adequada, conforme preconiza a literatura analisada. Para tanto, foram realizados ensaios de tração na madeira e nas emendas denteadas.

Os corpos de prova foram retirados das vigas de MLC estudadas após sua ruptura, o que não afetou sua resistência, conforme análise realizada no item 6.5. A confecção dos corpos de prova e os ensaios foram realizados de acordo com o método descrito pelo anexo B da ABNT NBR 7190:1997.

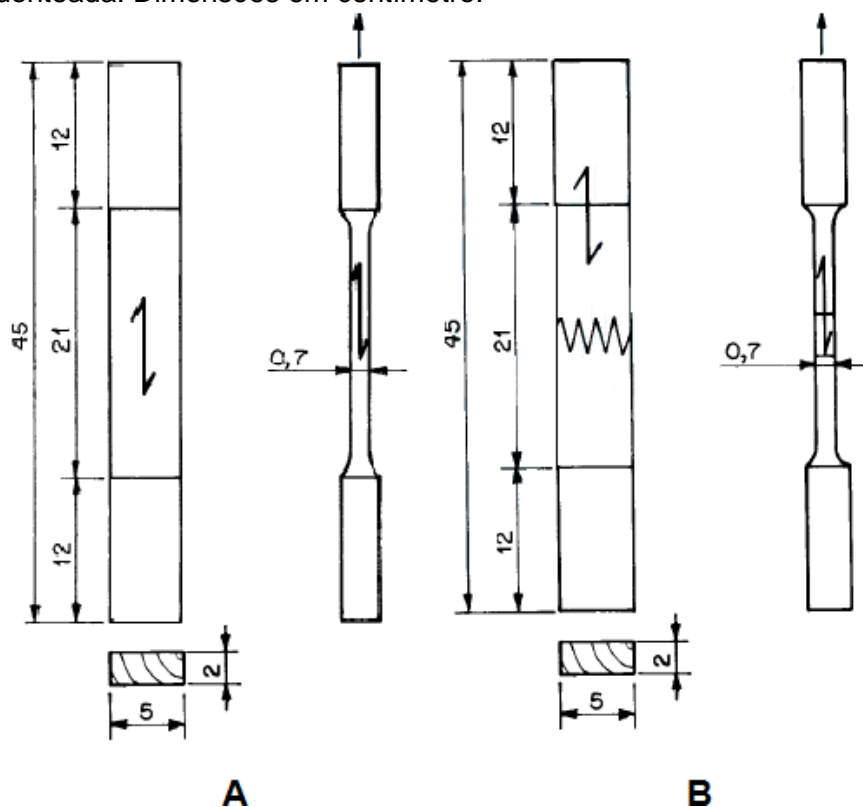
6.2 MÉTODOS DE ENSAIOS DE TRAÇÃO

Como apresentado no Capítulo 3, os dentes das emendas possuíam comprimento de 1,4cm e foram colados com adesivo isocianato (EPI). As emendas denteadas foram colocadas em teste de resistência à tração apenas na condição seca ao ar livre.

6.2.1 Tração paralela às fibras da madeira

A resistência à tração paralela às fibras da madeira f_{t0} é obtida pela máxima tensão atuante em um corpo de prova alongado com trecho central de seção transversal constante e de comprimento superior a oito vezes a raiz quadrada de sua área, de forma que a ruptura do mesmo ocorra em sua parte central, como ilustrado na Figura 5.1(A).

Figura 6.1 – Corpo de prova de tração paralela (A) às fibras da madeira e (B) à emenda denteada. Dimensões em centímetro.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190:1997

A resistência à tração f_{t0} deve ser obtida pela Equação 4.3 descrita no Capítulo 4. Após sua obtenção, é necessário que seja realizado o cálculo do seu valor característico $f_{t0,k}$ conforme a Equação 4.3 e que sua umidade seja padronizada a partir da Equação 4.4. Vale ressaltar que após a realização dos ensaios, os corpos de prova devem ser armazenados em estufa com temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante e sua umidade deve ser obtida a partir da Equação 4.1.

A norma ainda preconiza que o ensaio deve ser monotônico crescente com aplicação de carga constante de $10\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$. Pode ser realizada uma caracterização simplificada da resistência da madeira, de forma que $f_{t0,k}$ deveria ser 77% do valor de $f_{c0,k}$, já calculado no Capítulo 5

6.2.2 Tração paralela às emendas denteadas

Todo o procedimento de ensaio descrito no item 6.2.1 se aplica para o ensaio de tração nas emendas, de forma que o corpo de prova deve ter uma emenda centralizada, possibilitando o seu rompimento caso resista menos que a madeira. A Figura 6.1(B) ilustra o posicionamento da emenda denteada relacionado ao corpo de prova.

Segundo Szücs et al. (2008), para que a emenda seja classificada de alto desempenho ela deve possuir resistência mínima de 75% da resistência da madeira sem defeitos. Estes valores serão importantes para a verificação da ruptura das vigas, uma vez que as emendas foram destacadas no Capítulo 3 como um possível ponto de fragilidade para as vigas avaliadas neste trabalho.

6.3 CORPOS DE PROVA E ENSAIOS DE TRAÇÃO

Foram confeccionados 48 corpos de prova para tração, sendo 24 para a madeira de pinus e os demais de eucalipto. A metade foi confeccionada para tração nas fibras da madeira e a outra parte para ensaios nas emendas, como descrito na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Quantidade de corpos de prova por madeira e ensaio realizado.

Ensaio Realizados	Madeiras Ensaçadas	
	Eucalipto	Pinus
Tração paralela às fibras da madeira	12	12
Tração paralela às emendas denteada	12	12

Fonte: Autor.

A confecção dos corpos de prova de tração só foi possível após a ruptura das vigas, uma vez que a quantidade de material era limitada e a presença de emendas não permitiu a retirada destes durante a etapa de confecção de amostras de compressão e cisalhamento. Ainda assim os corpos de prova retirados (Figura 6.2) não possuíam danos visíveis, uma vez que foram extraídos das extremidades das vigas ensaiadas, onde a ruptura não foi evidenciada.

Após realização dos ensaios, as amostras foram sujeitas a pesagem e ao processo de secagem em estufa para que a umidade de ensaio fosse analisada.

Figura 6.2 – Corpos de prova de tração paralela às fibras da madeira e da emenda denteada nas madeiras de pinus e eucalipto.



Fonte: Autor.

6.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi realizado o teste t de médias para verificação da hipótese de nulidade H_0 e de rejeição H_1 descritas pelas Equações 4.7 e 4.8. Para este capítulo, foi realizada uma comparação a fim de determinar se as médias obtidas para a tração nas madeiras de pinus e eucalipto podem ser estatisticamente comparadas àquelas ensaiadas nas emendas denteadas referentes às mesmas madeiras. De forma análoga ao Capítulo 4, os resultados foram dispostos em “*boxplot*”.

6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

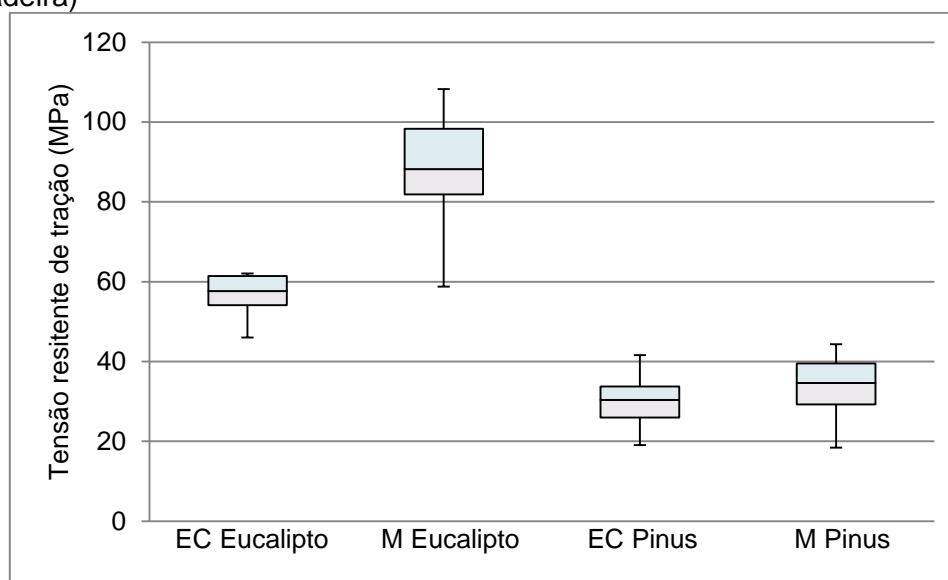
A partir da análise da Tabela 6.2 pode ser observado o comportamento global dos valores de resistência à tração paralela da madeira e das emendas coladas nas unidades de ensaio, que está relacionada ao diagrama box plot de exposição da dispersão dos resultados, que pode ser observado na Figura 6.3.

Tabela 6.2 – Resistência à tração paralela às fibras da madeira e à emenda colada.

	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA			
	Eucalipto		Pinus	
	Emenda colada	Madeira	Emenda colada	Madeira
Media (MPa)	56,65	88,62	29,66	34,21
Coef de Variação (%)	9,36	16,48	21,30	21,99
Mínimo (MPa)	46,03	58,75	19,05	18,44
Primeiro Quartil (MPa)	54,11	81,88	25,94	29,27
Mediana (MPa)	57,63	88,19	30,40	34,62
Terceiro Quartil (MPa)	61,38	98,29	33,69	39,53
Máximo (MPa)	62,05	108,24	41,59	44,30
Umidade (%)	15,04	14,98	16,16	16,70

Fonte: Autor.

Figura 6.3 – Dispersão dos resultados de resistência a tração (EC= Emenda colada; M=Madeira)



Fonte: Autor.

Analisando o diagrama da Figura 6.3 observa-se que as medianas das tensões de tração tanto para madeira quanto para emenda colada no eucalipto obtiveram valores discrepantes, sendo a resistência na madeira superior à da

emenda. Já para a análise da madeira de pinus, observa-se uma dispersão de resultados muito pequena, inferior àquela apresentada na madeira de eucalipto.

Em relação à porcentagem de resistência, as emendas coladas na madeira de eucalipto resistiram em média 64% da resistência da madeira maciça, enquanto as emendas coladas no pinus resistiram a 86% a resistência desta madeira.

Ainda assim, não é possível afirmar que a colagem na madeira de pinus foi mais eficaz do que na madeira de eucalipto, pelo fato das madeiras resistirem de maneiras diferentes e pelo fato da resistência à tração na emenda denteada ter sido numericamente superior para a madeira de eucalipto. Para as emendas, não é possível inferir que a gramatura tenha sido tão influente quanto possa ter sido na resistência ao cisalhamento, uma vez que não se tem o controle da gramatura nas emendas denteadas. Os valores característicos encontrados estão dispostos na Tabela 6.3 utilizando o fator de umidade corrigido a 12%.

Tabela 6.3 – Tensão característica à tração referentes a U=12%.

Ensaio	$f_{t0,k}$ (MPa)
Pinus - Madeira	31,20
Pinus – Emenda colada	26,82
Eucalipto – Madeira	85,88
Eucalipto – Emenda colada	61,88

Fonte: Autor.

Observa-se que os valores característicos para os ensaios com pinus foram próximos, tendo uma redução de 14% de resistência nos corpos de prova com emendas coladas, enquanto na madeira de eucalipto houve queda de 28% da resistência da emenda colada em referência à madeira.

Em relação à comparação estatística das médias, foi realizado o teste t bicaudal, utilizando as hipóteses inferidas pelas Equações 4.7 e 4.8. O valor-p para cada pareamento de médias é apresentado na Tabela 6.5.

Tabela 6.4 – Valor-p do pareamento de dados dos corpos de prova de tração na madeira e na emenda colada.

Pareamento de Médias	Valor - p
Pinus – Emenda colada x Madeira	0,1233
Eucalipto – Emenda colada x Madeira	0,0000054

Fonte: Autor.

A partir da comparação de médias pelo teste t, rejeita-se H_0 ao nível de significância de 5% para a madeira de eucalipto, uma vez que $0,0000054 < 0,05$. Já para a madeira de pinus, como $0,1233 > 0,05$, aceita-se a hipótese de que as médias das tensões de tração referentes à madeira são estatisticamente significativas àquelas da linha de cola na mesma madeira.

Esta análise reforça a conclusão de que a madeira de pinus obteve uma melhor adesão, o que também pode ser observado na análise de falha na ruptura dos corpos de prova, uma vez que 11 dos corpos de prova de pinus sujeitos a tração na emenda colada romperam na madeira, conforme a Figura 6.4(A), enquanto 10 dos corpos de prova de eucalipto sujeitos a tração na emenda romperam na própria emenda, como ilustrado na Figura 6.4(B).

Figura 6.4 – Rompimento dos corpos de prova sujeitos a tração na emenda colada para (A) Pinus e (B) Eucalipto.



Fonte: Autor.

Nos dois casos em que a madeira de eucalipto rompeu antes da emenda, evidenciados na Figura 6.5, observa-se com clareza que as madeiras rompidas eram de lenho juvenil de alburno, que foram aderidas a madeiras adultas de cerne. Esta consideração foi apresentada no Capítulo 3 e verificada nos Capítulos 4 e 5 como possíveis pontos de fragilidade das vigas.

Figura 6.5 – Corpos de prova de eucalipto com variação de lenho.



Fonte: Autor.

Quando avaliada a ruptura dos corpos de prova sujeitos à tração paralela puramente na madeira, observou-se que o pinus, Figura 6.6(A), teve comportamento frágil, com ruptura direta centralizada no corpo de prova. Os corpos de prova de eucalipto tiveram comportamento diferenciado, tendo suas fibras rompidas em diferentes pontos do corpo, caracterizando uma ruptura de comportamento em etapas, como observado na Figura 6.6(B), sendo que todas as amostras tiveram rupturas semelhantes.

Figura 6.6 – Rompimento dos corpos de prova sujeitos a tração na madeira (A) Pinus e (B) Eucalipto.



Fonte: Autor.

7 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DAS VIGAS

7.1 INTRODUÇÃO

Os métodos de ensaio mais usuais e confiáveis para a obtenção das características elásticas dos materiais são os estáticos regularizados por normas, que geram os valores exatos das características desejadas, mas podem impossibilitar as peças de serem utilizadas posteriormente, gerando desperdício de material. Estes métodos são de difícil execução quando se trata de peças em tamanhos estruturais, principalmente pela escassez de centros tecnológicos que possam executar tais ensaios no Brasil.

Uma alternativa para realização da caracterização adequada das estruturas que vem sendo muito estudada no meio científico é a aplicação de métodos dinâmicos para a obtenção do módulo de elasticidade em peças de madeira, principalmente maciça. Como alguns destes métodos são de fácil execução e depende de equipamentos de baixo custo com pequena demanda de tempo de execução, é possível que estes ensaios sejam realizados antes mesmo que a estrutura seja montada.

Com o objetivo de avaliar as propriedades elásticas e a eficiência dos métodos dinâmicos em vigas de MLC produzidas pelo mercado brasileiro, foram empregados os métodos de vibração longitudinal, vibração transversal e “*Stress Wave*”, de forma a comparar seus resultados com o método de ensaio estático proposto pela ASTM D-198 (2009) para flexão pura com aplicação de carga em dois pontos da viga.

Além disto, como as vigas foram rompidas, os valores de módulo de ruptura (MOR) foram determinados e posteriormente foi realizada uma análise visual, verificando os pontos de fragilidade das vigas e possíveis correções a serem realizadas no processo de confecção destas peças pelo mercado.

7.2 MÉTODOS DE ENSAIO

Os ensaios dinâmicos são métodos alternativos aos ensaios estáticos. Também são utilizados para verificação de patologias ou desconformidades dos materiais, como o método ultrassonoroso apresentado no Capítulo 5, realizado pelo PUNDIT Lab e muito difundido para argamassas e concreto. É possível, a partir de métodos não invasivos, verificar de forma simples e ágil a presença de espaços ocultos ou danificados em uma árvore antes mesmo dela ser derrubada, a partir de técnicas de ultrassom ou de vibração (FAKOPP, 2014).

Calil e Miná (2003) explicam que uma vibração mecânica é produzida quando um sistema é deslocado de uma situação inicial de equilíbrio estável, retomando sua posição inicial sob a ação de forças restauradoras. De forma análoga, Halliday et al. (2002) explicam que podem existir dois tipos básicos de ondas, de acordo com o seu movimento: Quando a oscilação é perpendicular à direção da propagação da onda, esta é chamada de onda transversal; e quando a oscilação é paralela à direção da onda, ela é chamada de longitudinal.

É possível realizar a captação destes dois tipos de ondas propagadas nos mais diversos materiais a partir de métodos simples, que ajustados a modelos matemáticos, podem traduzir o efeito físico e gerar os valores das constantes elásticas desejadas.

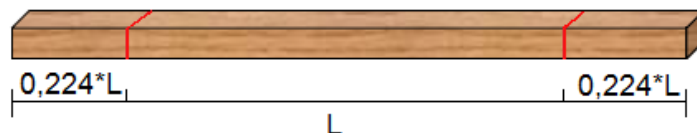
7.2.1 Ensaio de vibração transversal

O ensaio de vibração transversal é bastante difundido na literatura. Consiste em gerar um impacto na madeira que deve se propagar formando ondas mecânicas perpendiculares às fibras e captar suas frequências com o auxílio de um microfone e um *software* adequado, sendo a constante elástica desejada calculada a partir da primeira frequência de ressonância de vibração.

Para que estas ondas sejam propagadas apenas na madeira, as vigas devem ser suspensas ou apoiadas em fios elastômeros, evitando evasão acústica por outros elementos sólidos. Os locais de apoio dos fios com a madeira devem estar situados nos pontos nodais de vibração, a 0,224L das

extremidades das peças, como observada a marcação em vermelho da Figura 7.1.

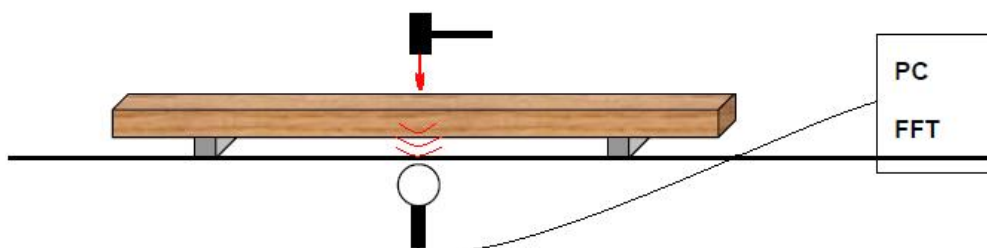
Figura 7.1 – Arranjo dos pontos nodais em uma viga bi-apoiada para ensaio de vibrações.



Fonte: Adaptado de Fakopp (2014).

Um microfone deve ser posicionado na direção transversal da batida efetuada por um martelo (Figura 7.2), de forma a facilitar a captação das ondas emitidas pela madeira. Após captar as ondas, o sinal é conduzido para um computador que transforma as informações nas frequências a partir do software *Fast Fourier Vibration Analyser – FFT Analyser*, distribuído gratuitamente pela empresa *Fakopp Enterprise*[®].

Figura 7.2 – Arranjo de ensaio dinâmico por vibração transversal.



Fonte: Adaptado de Fakopp (2014).

O módulo de elasticidade dinâmico transversal é encontrado em acordo com as recomendações da ASTM E-1876 (2007) e da ASTM C-215 (2008), sendo calculado a partir da Equação 7.1, também utilizada por Calil e Miná (2003), Targa et al. (2005), Wang et al. (2008) e Sales et al. (2010). Vale ressaltar que estes autores utilizaram equipamentos diferentes para a captação das frequências naturais transmitidas pela madeira e que utilizaram a mesma fundamentação teórica do *FFT Analyser*.

$$Ed_{trans} = \frac{f_r^2 \cdot W \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad 7.1$$

Sendo:

Ed_{trans} = Módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal (Pa);

W= Peso da viga (N);

L= Comprimento da viga (m);

f_r = Frequência natural de vibração (Hz);

I = Momento de inércia da seção (m⁴)

g = aceleração da gravidade (m.s⁻²)

Targa et al. (2005) destacam que a técnica de vibração transversal tem grande destaque em relação aos demais ensaios dinâmicos por apresentar boa concordância entre o modelo físico do fenômeno e seu correspondente modelo matemático. Em seu trabalho os autores ensaiaram três espécies de eucalipto: *Eucalipto citriodora*; *Eucalipto grandis*; e *Eucalipto saligna*. Todas as espécies foram testadas com umidade aparente de 12%, tendo os corpos de prova dimensões 2 x 2 x 46 cm. O ensaio estático foi realizado conforme descrito pela ABNT NBR 7190:1997 com um ponto de aplicação de carga, obtendo coeficientes de correlação com o ensaio de vibração transversal de 87%, 87% e 76% para as três espécies.

Calil e Miná (2003) ensaiaram 326 peças de madeira maciça de *Pinus do Sul* com dimensões de 3,81 x 13,97 x 302,26 cm. Os autores encontraram resultados significativos na comparação entre o ensaio de vibração transversal com o ensaio estático com aplicação de carga em um ponto, obtidos pelo método clássico da resistência dos materiais, semelhante ao preconizado pela ABNT NBR 7190 e a ASTM D-198, sendo o coeficiente de correlação linear de 0,98.

Sales et al. (2010) encontraram pequena variação entre os resultados do ensaio estático com o dinâmico de vibração transversal para corpos de prova estruturais, tendo o ensaio dinâmico majorado os resultados em apenas 4,33% e 4,42%, respectivamente, para vigas de 5 x 11 x 300 cm de pinus e de eucalipto. A majoração encontrada na pesquisa de Segundinho et al. (2012) foi superior, tendo uma variação mínima de 9,46% para a madeira de *Pinus*

oocarpa com dimensões 4,5 x 9 x 200 cm e máxima de 15,58% para *Eucaliptus sp.* dimensionado em 4 x 6 x 200 cm. Os últimos autores ainda encontraram valores satisfatórios de regressão linear, tendo este variado de índices de 0,68 a 0,98, dependendo o tipo de corpo de prova examinado.

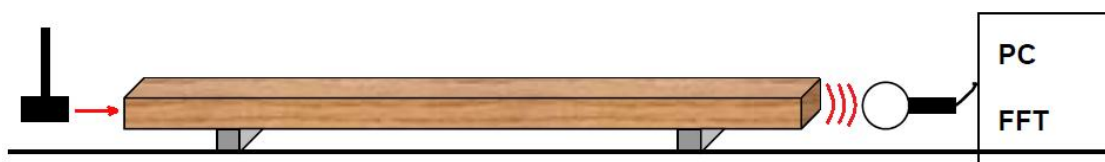
Estas pesquisas são uma referência de que o método de vibração transversal é eficiente para a obtenção do módulo de elasticidade em madeiras maciças, seja em corpos de prova de pequenas dimensões ou em tamanho estrutural.

7.2.2 Ensaio de vibração longitudinal

O ensaio de vibração longitudinal, apesar de não ser tão difundido, é bastante semelhante ao de vibração transversal, modificando apenas o sentido que a batida deve ser realizada pelo martelo no corpo de prova e o sentido da obtenção da onda pelo microfone, que será na direção paralela às fibras de acordo com o especificado pela ASTM E-1876 (2007), conforme observado a Figura 7.3.

Segundinho et al. (2012) ressaltam que a escolha do método de ensaio mais adequado deve ser realizada pela praticidade, o que pode favorecer o ensaio descrito na seção 7.2.1, já que a pancada e a captação das ondas para o método longitudinal podem ser distantes quando a viga tiver grande comprimento. Ainda assim discutem que a aderência matemática na explicação do fenômeno físico é tão eficaz quanto à do método transversal.

Figura 7.3 – Arranjo de ensaio dinâmico por vibração longitudinal.



Fonte: Adaptado de Fakopp (2014).

As frequência das ondas captadas também são analisada pelo programa *FFT Analyser*, sendo o módulo de elasticidade realizado de acordo com a ASTM E-1876 (2007) e a ASTM C-215 (2008), obtido pela Equação 7.2,

também utilizada por Segundinho et al (2012), que respalda a utilização de microfones, no intuito de facilitar os ensaios de vibração e reduzir o tempo da caracterização das peças de madeira.

$$E_l = 4 \cdot \left(\frac{m \cdot f_r^2}{b} \right) \cdot \left(\frac{l}{h} \right) \quad (7.2)$$

Sendo:

E_l = Módulo de elasticidade dinâmico por vibração longitudinal (Pa);

m = massa do corpo de prova (kg);

f_r = Frequência (Hz);

b = Base da seção da viga (m);

l = Comprimento da viga (m);

h = Altura da seção da viga (m).

Segundinho et al. (2012) também concluíram em seu experimento que a técnica de vibração longitudinal responde com boa precisão nos resultados obtidos quando comparados com os ensaios estático e de vibração transversal, sendo esta uma boa alternativa para obtenção da constante elástica da madeira.

7.2.3 Ensaio de impacto por “stress wave”

Para a realização deste ensaio é empregado o equipamento “*Stress Wave Timer*” - SWT modelo A190 distribuído pela *Metriguard*[®], que fornece o tempo que uma onda demora em percorrer o corpo de prova, gerando assim o valor da velocidade média de uma onda a partir de um impacto. O equipamento conta com um martelo de impacto e um receptor sonoro, que deve ser acoplado ao corpo de prova com auxílio de um pino ou parafuso metálico.

Após acoplar o receptor sonoro em uma das extremidades da viga de madeira, deve-se executar a pancada na outra extremidade, de forma a transmitir a onda no sentido longitudinal, como observado na Figura 7.4. Este procedimento deve ser executado sob fios elastômeros, de maneira similar aos ensaios de vibração.

Figura 7.4 – Esquema de ensaio de vibração por “*Stress Wave Timer*”.



Fonte: Autor

Para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico por este método E_{sw} deve ser empregada a Equação 7.3, também utilizada por Cunha e Matos (2011) e Morales (2006).

$$E_{sw} = v^2 \cdot \frac{\rho}{g} \cdot 10^{-5} \quad (7.3)$$

Sendo:

E_{sw} = Módulo de elasticidade dinâmico pelo *Stress Wave Timer* (MPa);

v = Velocidade da onda na madeira ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

ρ = Densidade do corpo de prova ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

g = Aceleração da gravidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$).

Cunha e Matos (2011) realizaram uma estimativa do módulo de elasticidade dinâmico por SWT em 7 vigas de MLC produzidas com *Pinus taeda*. Quando realizada uma comparação com os resultados do teste estático, houve correlação de 52,4%. Os autores mencionam que este resultado pode estar relacionado a diversos tipos de fatores, como a presença de emendas denteadas, diferença entre lenho juvenil e adulto e as condições de fabricação e ensaio das peças. Em contra partida, classificam o sistema pela simplicidade, portabilidade e agilidade, que podem ser bastante uteis para empresas do ramo florestal ou da construção civil.

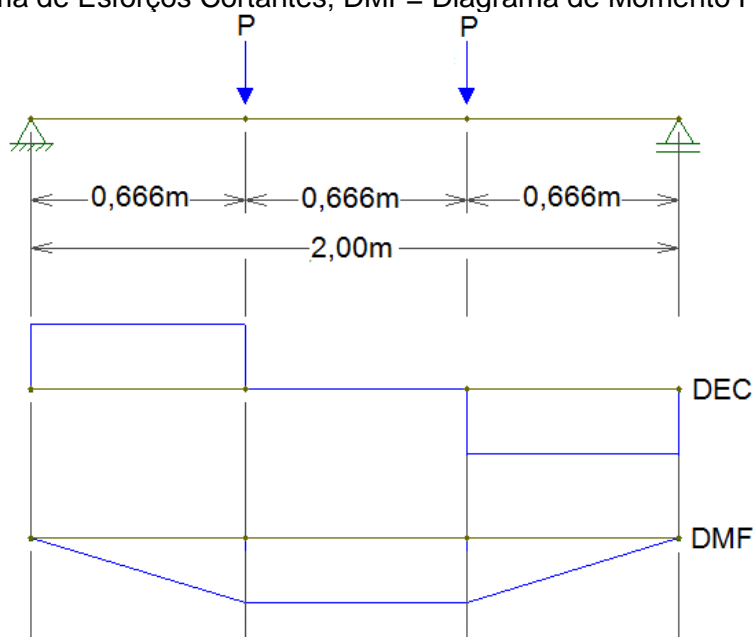
Morales (2006) fez extensa aplicação do método dinâmico com o SWT em painéis de madeira reconstituída de OSB, concluindo que a utilização deste

método é de fundamental importância para o controle de qualidade de parâmetros mecânicos em painéis de OSB na indústria ou no comércio.

7.2.4 Ensaio de flexão estática

O ensaio de flexão estática para aquisição do módulo de elasticidade longitudinal das vigas foi realizado conforme preconiza a ASTM D-198 (2009), norma americana referente a ensaios em peças de madeira com dimensões estruturais. Na Figura 7.5 é apresentado o esquema estrutural em que as peças devem ser sujeitas, uma vez ensaiadas com 2 metros de vão livre e aplicação de carregamento concentrado em dois pontos centralizados na viga.

Figura 7.5 – Esquema de aplicação de carga nas vigas de MLC; P=Carregamento; DEC= Diagrama de Esforços Cortantes; DMF= Diagrama de Momento Fletor.



Fonte: Autor.

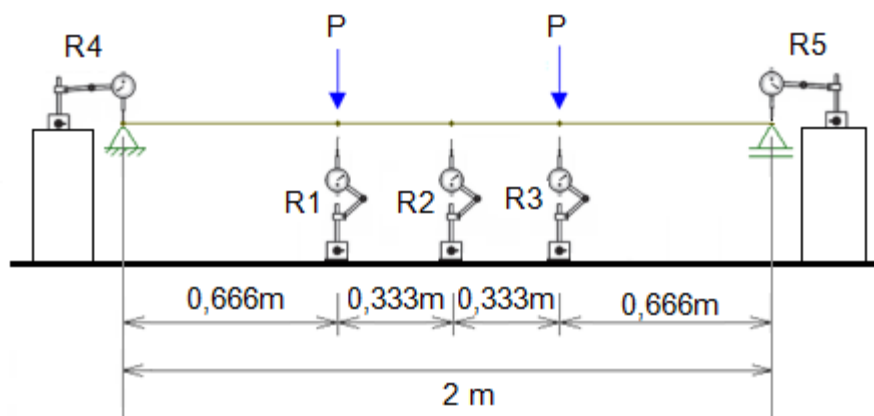
Este método foi escolhido por proporcionar um trecho de flexão pura às vigas ensaiadas, onde devem ser obtidas as flechas que serão utilizadas para obtenção do módulo de elasticidade longitudinal. A flexão pura é obtida no trecho central da viga, onde os esforços cortantes são nulos e o momento fletor é máximo e constante.

Utilizando este método evita-se o efeito do módulo de elasticidade transversal, obtendo então uma relação direta do módulo de elasticidade longitudinal real, uma vez que a relação L/h (comprimento x altura da seção) das vigas estudadas é de 16,67. Rocco Lahr (1983) investigou experimentalmente diversas madeiras com variação de L/h e constatou que quando esta relação é maior ou igual a 21, o efeito do cisalhamento é anulado, no entanto, abaixo disso deve ser realizada uma correção no seu valor.

7.2.4.1 Obtenção do módulo de elasticidade pela flexão estática

Para aquisição do módulo de elasticidade longitudinal real pelo método estático devem ser instalados cinco relógios de deslocamento digitais, com resolução de 0,01 mm, localizados nos pontos de aplicação de cargas, nas extremidades e no centro das vigas. Os relógios R1, R2 e R3, observados na Figura 7.6, são utilizados para o cálculo da flecha formada no trecho central da viga, enquanto os relógios R4 e R5 ficam posicionados acima dos pontos de apoio para avaliar deslocamentos indevidos provenientes do possível esmagamento da madeira.

Figura 7.6 – Posicionamento dos medidores de deformação.



Fonte: Autor.

Na medida em que o carregamento “P” for aplicado, devem ser tomados valores dos deslocamentos, de forma que a flecha Δ_{Lb} central seja obtida pela Equação 7.4.

$$\Delta_{Lb} = R2 - \left(\frac{R1+R3}{2}\right) \quad (7.4)$$

Sendo:

Δ_{Lb} = Flecha central (cm)

R1, R2, R3= Deslocamentos pontuais medidos nos relógios (cm)

Para efeito de segurança dos relógios medidores e para que sejam obtidos valores apenas do trecho de linearidade elástica do material, a flecha máxima, que deverá ser obtida no relógio R2, não deve ultrapassar a razão L/200, sendo L o vão livre para peças ensaiadas. Como para o ensaio desejado L=200cm, a flecha máxima em R2 deverá ser de 1cm.

A obtenção do módulo de elasticidade para o esquema de aplicação de carga em dois pontos equidistantes da viga é dado pela Equação 7.5, preconizada pela ASTM D-198 (2009). A norma especifica que para este caso, não há interferência da ação do cisalhamento, sendo esta uma forma de obter o módulo de elasticidade real.

$$E_M = \frac{PL_v L_b^2}{4bh^3 \Delta_{Lb}} \quad (7.5)$$

Sendo:

E_M = Módulo de elasticidade real (Pa);

P= Carregamento (N);

L_v = Vão livre ensaiado (m);

L_b = Trecho central da viga (m);

b= Base da seção da viga (m);

h= Altura da seção da viga (m);

Δ_{Lb} = Flecha referente à Equação 7.4 (m).

7.2.4.2 Obtenção do módulo de ruptura

O módulo de ruptura está diretamente ligado à confiabilidade que o material tem na sua respectiva aplicação estrutural. Para o caso da MLC, é de fundamental importância que o mesmo obtenha valores semelhante ou superior

aos da madeira maciça. A obtenção do MOR é dada pela Equação 7.6 preconizada pela ASTM D-198 (2009).

$$MOR = \frac{P_{max}L_v}{bh^2} \quad (7.6)$$

Sendo:

MOR= Módulo de Ruptura (Pa)

P_{max} = Carregamento máximo resistido (N);

L_v = Comprimento do vão livre ensaiado (m);

b= Base média da seção da viga (m);

h= Altura média da seção da viga (m);

7.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para analisar os dados de correlação entre as médias dos ensaios dinâmicos com o ensaio estático foram utilizadas as ferramentas de regressão linear e do teste t de hipóteses, apresentadas nos Capítulos 3 e 4.

As hipóteses utilizadas para a comparação de médias pelo teste t são aquelas apresentadas pelas Equações 4.7 e 4.8, com o objetivo de verificar de as médias se diferem ou não a um nível de significância de 5%.

7.4 EXECUÇÃO E RESULTADOS

Para garantir que todos os ensaios fossem bem sucedidos, antes de ensaiar as vigas de MLC foram realizados ensaios piloto com 18 vigas de madeira maciça, cujos resultados foram positivos e semelhantes às literaturas analisadas.

Os ensaios dinâmicos por vibração transversal da Figura 7.7(A), vibração longitudinal da Figura 7.7(B) e por “stress wave” da Figura 7.4 foram os primeiros a serem executados por não danificarem as vigas de MLC. Posteriormente foram executados os ensaios de flexão estática conforme Figura 7.8.

Figura 7.7 – Execução dos ensaios de vibração transversal (A) e longitudinal (B).



Fonte: Autor.

Figura 7.8 – Execução do ensaio de flexão estática.



Fonte: Autor.

Os ensaios de vibração, tanto transversal quanto longitudinal, foram executados em espaço fechado com ausência de ruídos que atrapalhassem na captação das ondas emitidas. Tomou-se o cuidado para padronizar as

pancadas realizadas com martelo para propagação das ondas, de forma que a mesma pessoa foi escalada para esta ação, enquanto uma segunda pessoa manuseou o *software FFT Analyser* para obtenção das frequências naturais geradas. Foram tomados três valores de frequência para cada ensaio em cada viga, sendo estes próximos. Os ensaios com o “Stress Wave” também seguiram os mesmos cuidados, tendo como leitura o tempo de propagação da onda mecânica.

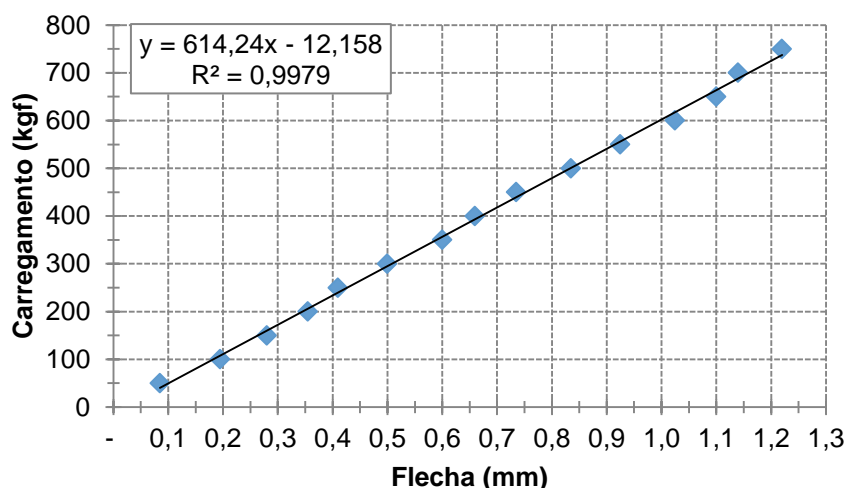
Para o ensaio de flexão estática foram tomados alguns cuidados para que a execução não afetasse nos resultados. Devido à necessidade de precisão, a mesma equipe que iniciou a execução dos ensaios continuou até que o mesmo fosse finalizado, de forma a evitar estilos diferentes de leitura dos dados. Os ensaios foram realizados em três dias consecutivos, evitando variações bruscas de temperatura e umidade ambiente.

Na execução dos primeiros ensaios com a madeira de pinus, verificou-se que, para a obtenção do módulo de elasticidade, como as cargas aplicadas eram relativamente pequenas, não houve esmagamento significativo da madeira nos apoios e no aparato de aplicação de carga.

Os ensaios de flexão foram realizados em duas etapas: Na primeira foi aplicado carregamento até que a flecha máxima de 1 cm fosse obtida, cessando o ensaio e tendo os resultados de módulo de elasticidade analisados antes da ruptura das vigas; Na segunda as vigas foram submetidas à ruptura, sendo então analisados os módulos de ruptura e os tipos de falha apresentados pelas vigas.

Para verificar se os resultados dos módulos de elasticidade obtidos eram confiáveis, foi realizada uma regressão linear dos resultados em todas as vigas. Uma vez que o módulo de elasticidade da madeira deve ser obtido no seu regime elástico, quando a curva de tensão por deformação apresenta formato linear, era necessário que o diagrama de carregamento por flecha Δ_{Lb} também apresentasse comportamento linear como o observado na Figura 7.8, referente à viga 1 de pinus.

Figura 7.9 – Diagrama de carregamento por flecha Δ_{Lb} obtido na viga 1 de pinus.



Fonte: Autor.

Este comportamento linear foi verificado para todas as vigas de pinus e eucalipto, sendo que para todos os casos o coeficiente R^2 foi superior a 0,99, demonstrando precisão do equipamento e das leituras realizadas. Além disso, demonstra que o trecho analisado realmente compõe uma reta referente ao regime elástico da madeira, trazendo confiabilidade nos resultados.

Após esta análise, as vigas foram sujeitas a carregamentos sem a presença de relógios medidores de deformação até que sua ruptura fosse evidenciada pela falta de resistência.

Para efeito de organização, os resultados são apresentados separadamente para cada madeira.

7.4.1 Resultados das vigas de Eucalipto

As características geométricas e os valores dos módulos de elasticidade e ruptura das vigas de eucalipto estão dispostos na Tabela 7.1. Vale ressaltar que o vão livre fixado, L_v , ensaiado na flexão estática foi de 2 metros, sendo L referente ao comprimento que cada viga apresentava no momento dos ensaios. O teor de umidade das vigas foi obtido a partir dos corpos de prova de compressão paralela às fibras, sendo seus valores médios de 15,62% para as vigas de eucalipto e 14,46% para as de pinus. As densidades aparentes

médias das vigas foram de $0,49 \text{ g.cm}^{-3}$ para o pinus e $0,64 \text{ g.cm}^{-3}$ para o eucalipto.

Tabela 7.1 - Resultados dos ensaios estático e dinâmico nas vigas de Eucalipto

Viga	L (cm)	b_m (cm)	h_m (cm)	Massa (Kg)	E_M (GPa)	E_{M,vt} (Gpa)	E_{M,vi} (GPa)	E_{M,sw} (GPa)	MOR (MPa)
E1	219,6	7,54	12,065	13,5	18,28	17,30	18,68	15,45	40,21
E2	219,6	7,54	12,085	12	16,45	16,55	16,69	14,24	43,64
E3	219,5	7,545	12,065	13,3	17,42	17,59	18,01	15,38	48,22
E4	219,5	7,535	12,065	13,15	17,65	17,37	17,98	15,59	40,23
E5	219,5	7,525	12,08	12,5	14,82	16,59	17,25	14,58	29,47
E6	219,5	7,525	12,08	13,2	16,07	17,10	17,84	15,74	40,19
E7	219,7	7,55	12,07	12,25	18,55	18,53	18,22	14,48	35,66
E8	219,4	7,505	12,075	13,95	17,74	17,88	17,87	15,90	43,02
E9	219,6	7,525	12,07	13,25	16,73	17,58	17,70	14,70	40,25
E10	219,7	7,525	12,07	12,25	20,96	19,59	19,72	15,32	39,36
E11	219,5	7,525	12,075	13,8	16,94	18,27	18,82	14,51	39,33
E12	219,5	7,53	12,075	11,35	16,60	18,25	18,13	13,96	26,80

Fonte: Autor.

Inicialmente analisando os valores gerados pelo ensaio estático, observa-se que o E_M teve oscilação de 29,29% dentro o valor máximo de 20,96 GPa para o mínimo de 14,82 GPa, com coeficiente de variação do conjunto de dados de 8,9%. Já para o MOR referente à madeira de eucalipto, há uma variação de 44,42% do valor máximo de 48,22 MPa para o mínimo, que foi de 26,80 MPa, com coeficiente de variação foi de 14,61%. Os valores médios foram de 17,17 GPa para o módulo de elasticidade e de 40,20 MPa para o módulo de ruptura.

Quando observada a forma de ruptura predominante das vigas de eucalipto, APÊNDICE A, conclui-se que 11 delas romperam pela tração nas emendas denteadas localizadas nas lâminas inferiores da viga, de forma a não danificar os dentes das emendas, rompendo por descolamento e confirmando a hipótese gerada no Capítulo 6 de que quando submetida à tração a emenda colada tem resistência inferior à da madeira. Apenas a viga 5 de eucalipto rompeu na madeira, Figura A5, de forma análoga ao corpo de prova de tração

apresentado na Figura 6.5, tendo sua ruptura evidenciada em um trecho de lâmina confeccionado com madeira juvenil.

Dentre as vigas ensaiadas por Miotto (2009), a que mais se assemelha a este trabalho possuía seção transversal de 83x310mm com comprimento de 5,2m, produzida com madeira de *Lyptus* e adesivo isocianato. O autor encontrou o valor de 57,1 MPa para o MOR e 23,51 GPa para o E_M , valores superiores à média de 40,20 MPa e 17,17 GPa. Foi verificada a ruptura em um ponto com presença de nó, propagando-se para a emenda mais próxima.

Quando observados os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos, os de vibração transversal tiveram seus valores minorados até 6,98% e majorados até 10,67%. Para o ensaio de vibração longitudinal, os resultados foram minorados em até 6,25% e majorados em até 14,08%. Já os resultados obtidos pelo método do “*Stress Wave*” minoraram todos os valores, com variação de 1,62% e 36,77%.

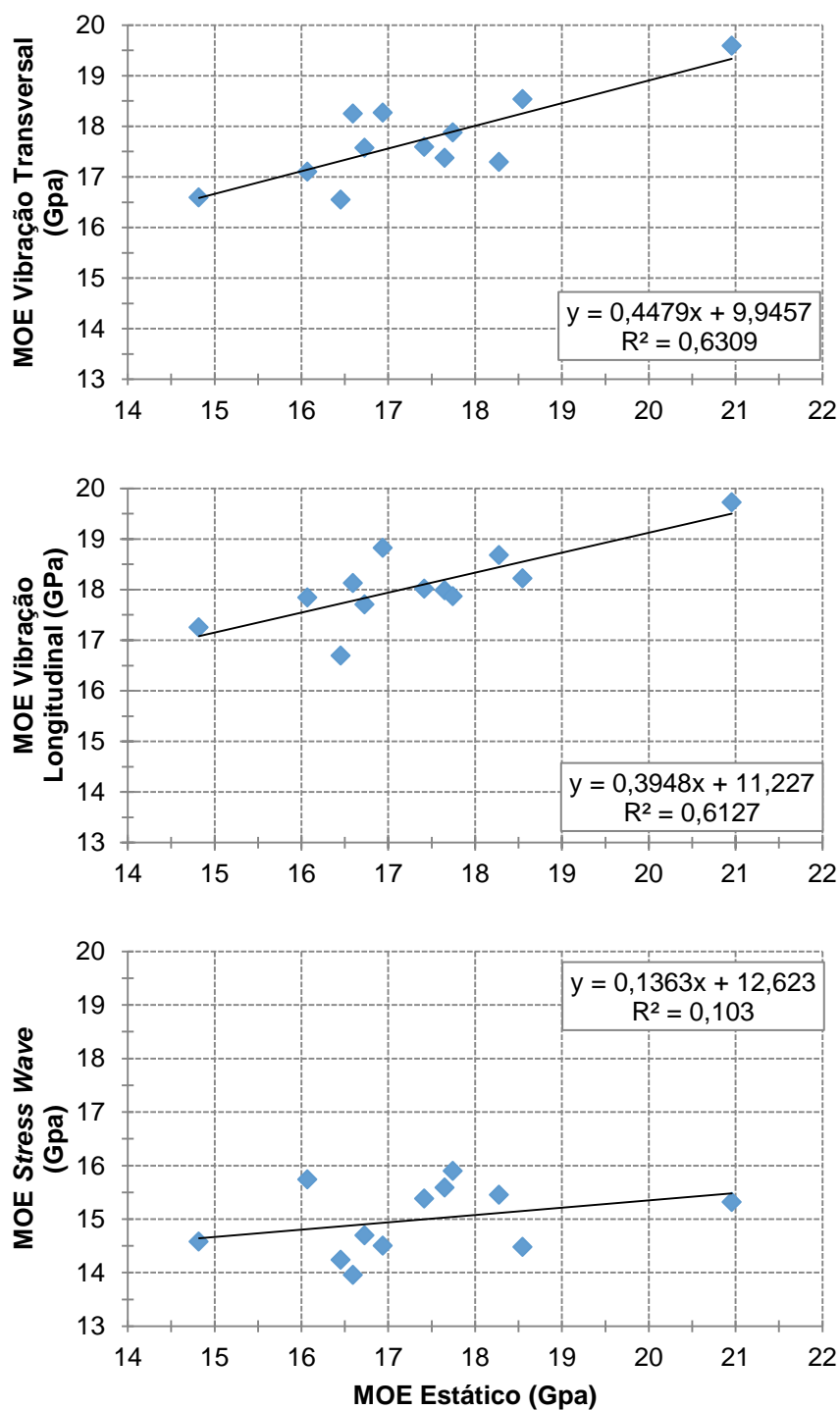
Analisando estatisticamente os resultados dos métodos pelo teste t, são dispostos na Tabela 7.2 os valores p estatísticos para a verificação das hipóteses H_0 de nulidade e H_1 alternativa, apresentadas nas Equações 4.7 e 4.8. Também são representadas, na Figura 7.9, as regressões lineares referentes à comparação dos valores de módulo de elasticidade por vibração transversal ($E_{M,vt}$), vibração longitudinal ($E_{M,vl}$) e por “*stress wave*” ($E_{M,sw}$), respectivamente, em relação ao estático (E_M).

Tabela 7.2 – Valor-p dos pareamentos de ensaios dinâmicos com o ensaio estático para a madeira de Eucalipto.

Pareamento de Médias	Valor - p
$E_M \times E_{M,vt}$	0,96
$E_M \times E_{M,vl}$	0,45
$E_M \times E_{M,sw}$	0,000058

Fonte: Autor.

Figura 7.10 – Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estático para a madeira de Eucalipto.



Fonte: Autor.

Pode-se concluir que os métodos dinâmicos de vibração transversal e longitudinal são eficientes na substituição do método estático na madeira de eucalipto, uma vez que os valores de p (0,96 e 0,45) foram maiores que o nível

de significância de 0,05 adotado. Desta forma, não se rejeita a hipótese de nulidade H_0 , concluindo que as médias não se diferem. Já para o ensaio pelo método “*Stress Wave*”, como o valor $p=0,000058 < 0,05$, rejeita-se H_0 , determinando divergência entre as médias.

Os resultados da análise estatística foram semelhantes aos da análise de regressão linear realizada na Figura 7.10, tendo as equações $y=0,4479.x+9,9457$ referente à vibração transversal e $y=0,3948.x+11,227$ referente à vibração longitudinal explicados 63,09% e 61,27% dos resultados obtidos pelo ensaio estático estático. Estes valores são considerados bons, dada à baixa variação percentual dos valores analisados.

Já os resultados da regressão obtidos pelo “*stress wave*” não foram tão promissores, uma vez que a equação $y=0,1363.x+12,623$ explicam apenas 10,3% dos resultados obtidos pelo ensaio estático.

7.4.2 Resultados das vigas de Pinus

Os dados geométricos, os módulos de elasticidades e de ruptura obtidos para as vigas de pinus estão dispostos na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Resultados dos ensaios estático e dinâmico nas vigas de Pinus.

Viga	L (cm)	b _m (cm)	h _m (cm)	Massa (Kg)	E _M (GPa)	E _{M,vt} (Gpa)	E _{M,vi} (GPa)	E _{M,sw} (GPa)	MOR (MPa)
P1	219,5	7,53	12,045	10,3	9,73	10,00	10,65	5,99	31,42
P2	219,5	7,51	12,085	9,6	5,99	6,21	6,85	6,92	32,19
P3	219,5	7,52	12,065	9,1	7,70	8,41	8,16	6,49	29,56
P4	219,5	7,495	12,08	10,1	8,59	9,31	9,46	8,14	32,28
P5	219,5	7,505	12,105	10,5	7,79	8,72	8,76	7,71	28,54
P6	219,5	7,525	12,07	9,85	9,51	8,96	8,90	8,06	25,94
P7	219,5	7,515	12,025	10,45	8,93	9,10	8,83	6,40	22,56
P8	219,4	7,51	12,08	9,45	6,57	7,09	7,77	6,65	25,06
P9	219,5	7,505	12,065	10,05	8,75	8,99	8,75	7,10	28,73
P10	219,5	7,51	12,06	9,75	6,91	7,49	8,38	5,97	25,14
P11	219,6	7,51	12,075	9,2	8,19	8,93	9,43	5,16	23,29
P12	219,4	7,51	12,06	9,2	5,00	5,23	6,13	4,54	23,34

Fonte: Autor.

Analisando os resultados do ensaio estático, o E_M apresentou variação percentual de 48,61% do menor valor de 5 GPa para o maior valor de 9,73 GPa, com coeficiente de variação de 18,1% entre todos os resultados. Os valores do MOR tiveram variação de 30,11% do menor valor de 22,56 MPa para o maior valor de 32,28 MPa, com coeficiente de variação igual a 13,1%. Os valores médios foram de 7,99 GPa para o módulo de elasticidade e de 27,34 MPa para o módulo de ruptura.

Quanto às rupturas das vigas de pinus evidenciadas no Apêndice B, verifica-se que todas tiveram início em um ponto de emenda denteada localizada nas lâminas inferiores das vigas, tracionadas, se estendendo para a madeira de forma frágil. A ruptura das emendas em questão evidenciou fratura nos dentes, comprovando a hipótese gerada no Capítulo 6, de que quando submetida à tração as emendas suportavam mais que a madeira de pinus. Esta conclusão vai ao encontro dos resultados obtidos por Fiorelli (2005), que ao romper vigas de MLC de pinus spp. observou falha na emenda denteada se estendendo para a madeira.

Ao analisar os resultados dos ensaios dinâmicos para as vigas de pinus, observa-se que, para o método de vibração transversal, os resultados foram minorados em até 6,17%, enquanto os demais obtiveram majoração com valor máximo de 10,62%. Para o método de vibração longitudinal a única minoração de resultados também foi observada para a viga 5, enquanto as demais tiveram resultados majorados em até 13,16%. Por último, o ensaio de “stress wave” propôs variações muito grandes, com minoração de resultados em até 62,39% e majoração em até 12,48%.

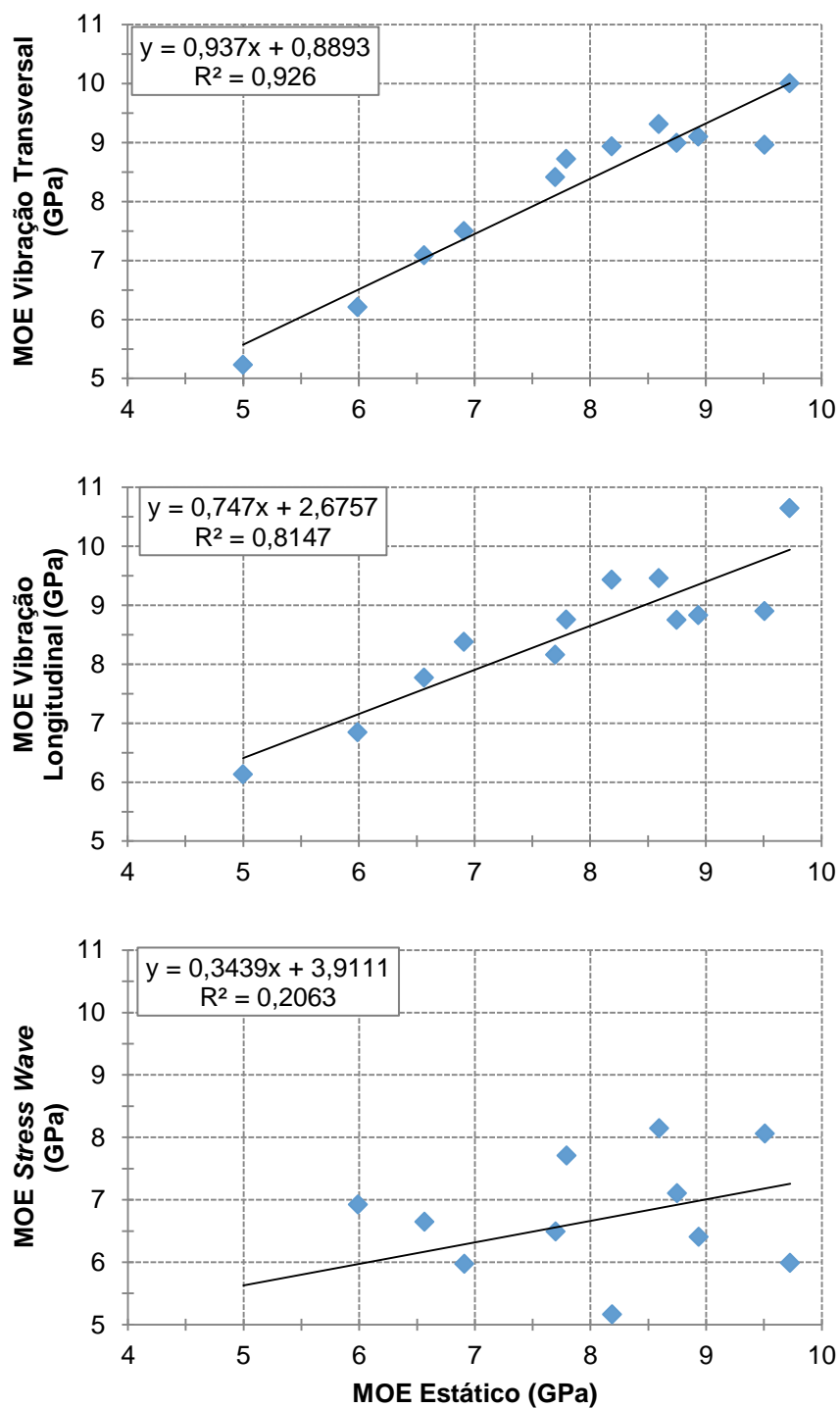
A análise estatística foi realizada conforme o item 7.4.1, tendo os valores p do teste t de hipóteses dispostos na Tabela 7.4 e as regressões lineares referentes às correlações de ensaios dinâmicos com estático na Figura 7.11.

Tabela 7.4 – Valor-p dos pareamentos de ensaios dinâmicos com o ensaio estático para a madeira de Pinus.

Pareamento de Médias	Valor - p
$E_M \times E_{M,vt}$	0,50
$E_M \times E_{M,vl}$	0,21
$E_M \times E_{M,sw}$	0,031

Fonte: Autor.

Figura 7.11– Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmicos e estático para a madeira de Pinus.



Fonte: Autor.

Analisando os valores p para comparar as médias pelo teste t, observa-se que quando comparados os ensaios de vibração tanto longitudinal quanto transversal com o ensaio estático, não se rejeita a hipótese de nulidade H_0 uma

vez que os respectivos valores de p (0,5 e 0,21) são maiores que o nível 0,05 de significância. Em contra partida, como $0,031 < 0,05$, rejeita-se H_0 para a comparação de médias realizadas entre o método estático com o dinâmico por “*stress wave*”, sinalizando que há diferença estatística significativa entre estes dois conjuntos de médias.

Os resultados estatísticos são refletidos nas regressões lineares realizadas, tendo as equações referentes à vibração transversal e longitudinal explicado 92,6% e 81,47% dos resultados obtidos pelo ensaio estático, coeficientes de correlação considerados bons. Novamente para os resultados com a utilização do “*stress wave*” foi obtido coeficiente baixo, de 20.63%.

8 CONCLUSÕES

8.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As vigas produzidas com madeira de pinus possuíam densidade aparente e teor de umidade respectivamente de $0,49 \text{ g.m}^{-3}$ e 14,47%, enquanto as de eucalipto possuíam $0,64 \text{ g.cm}^{-3}$ e 15,62%. A densidade foi calculada a partir da massa total das vigas enquanto o teor de umidade foi obtido a partir dos corpos de prova retirados para serem ensaiados.

Na análise visual constataram-se desconformidades com as literaturas estudadas e com o projeto de norma ABNT NBR 7190:2010, referentes ao: espaçamento inadequado entre emendas denteadas na mesma lâmina de madeira (lâminas com comprimentos pequenos) e lâminas adjacentes; dimensão inadequada dos dentes das emendas coladas; e heterogeneidade dos tipos de lenho empregados.

Nos ensaios de cisalhamento observou-se que a linha de cola tanto na madeira de pinus quanto na madeira de eucalipto sofrem redução significativa de resistência em situação de saturação, comprovando que nos dois casos o adesivo não se mostrou adequado para situações de saturação. Quando comparada a resistência ao cisalhamento na madeira com o da linha de cola, a madeira de eucalipto teve médias estatisticamente iguais apenas para a situação seca, no entanto a madeira de pinus teve resistências próximas nas duas situações, verificando igualdade estatística para a comparação de madeira saturada com a linha de cola na mesma situação. Assim, conclui-se que, para a madeira de pinus, o adesivo teve melhor aceitação à saturação do que para a madeira de eucalipto.

A resistência característica das madeiras em relação ao cisalhamento, $f_{vk,12\%}$, foram de 7,3 MPa e 6,8 MPa para pinus e eucalipto, respectivamente. Quanto a resistência característica à compressão paralela às fibras, $f_{c0,k,12\%}$, e o módulo de elasticidade, $E_{c0,12\%}$, todos com correção para $U=12\%$, foram, respectivamente, de 26,12 MPa e 9,45 GPa para o pinus e de 49,83 MPa e 17,95GPa para o eucalipto. Analisando estes resultados, classifica-se a conífera como de classe de resistência C25, enquanto a folhosa obteve resultados de C40.

O ensaio dinâmico por método ultrassonoroso não se mostrou tão eficiente como os apresentados pelas literaturas estudadas, tendo este majorado os resultados em 30 e 40% respectivamente para pinus e eucalipto, e apresentado médias significativamente diferentes daquelas encontradas pelo método estático.

Nos ensaios de tração paralela às fibras verificou-se que a madeira de pinus possuía resistência estatisticamente semelhante à da emenda colada, enquanto a madeira de eucalipto obteve resistência superior. Apesar dos resultados na madeira de eucalipto não apresentarem médias significativamente iguais às da sua respectiva emenda, sua resistência foi alta, não podendo inferir que a colagem nesta madeira foi menos eficiente do que na madeira de pinus.

Quanto aos ensaios de flexão, observou-se que as variações percentuais acentuadas tanto do módulo de elasticidade quanto do módulo de ruptura para as vigas de pinus e eucalipto podem ser explicadas pela heterogeneidade das madeiras empregadas na confecção das vigas, observada pela mescla de lenho adulto e juvenil nas duas madeiras.

A ruptura das vigas de pinus foi mais frágil quando comparada com as vigas de eucalipto. A colagem das emendas na madeira de pinus mostrou-se mais eficiente do que no eucalipto, tendo os dentes das emendas no eucalipto descolado na ruptura das vigas, sem que houvesse ruptura dos mesmos. Esta conclusão pode estar relacionada com a pequena dimensão dos dentes ou até mesmo com a melhor aceitação à adesão do pinus.

A resistência mecânica média na madeira de eucalipto foi numericamente superior à da madeira de pinus, assim como os valores dos módulos de elasticidade. No entanto, de uma maneira geral, observou-se que as vigas produzidas com madeira de pinus tiveram maior eficiência em relação às propriedades de resistência do adesivo, apesar dos dois conjuntos de vigas estarem fora de padrão e com anormalidades diversas.

A média dos módulos de elasticidade na flexão estática (E_M) e o de ruptura (MOR) das vigas foram respectivamente de 7,99 GPa (CV=18,1%) e 17,17 MPa (CV=13,1%) para a madeira de pinus e 27,24 GPa (CV=8,9%) e 40,20 MPa (CV=14,61%) para o eucalipto. Apesar das desconformidades

técnicas, os resultados apresentados são condizentes com as madeiras e os coeficientes de variação são aceitáveis para a pesquisa.

Os ensaios de vibração, transversal ou longitudinal, resultaram em boas correlações com o ensaio de flexão estática tanto para a madeira de pinus quanto para a de eucalipto. Mostraram-se métodos práticos e eficientes mesmo para avaliação de vigas com as desconformidades apresentadas. Já o método de ensaio por “Stress Wave” mostrou-se ineficiente para este estudo. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por ROSA (2013), que ao realizar os mesmos ensaios dinâmicos em corpos de prova de bambu laminado colado, obteve correlações satisfatórias apenas para os ensaios de vibração longitudinal e transversal, com destaque para a última.

De madeira geral, dos quatro métodos dinâmicos avaliados, os mais eficientes foram os de vibração transversal e longitudinal, enquanto os ensaios com “*stress wave*” e ultrassom não obtiveram correlações satisfatórias.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Espera-se que esta pesquisa desperte interesse no desenvolvimento de novos estudos em MLC, principalmente no cenário estrutural capixaba. Como sugestões para estudos futuros, podem ser citadas:

- a) Avaliação estrutural de vigas de MLC que atendam a todas as regulamentações pré-determinadas pelo PROJETO DE NORMA ABNT NBR 7190:2010;
- b) Aplicação de adesivos e gramaturas diferentes em vigas de MLC, afim de verificar a influencia do adesivo na resistência da viga;
- c) Estudo de vigas com outras madeiras provenientes de manejo florestal e até mesmo com mesclas de madeiras diferentes;
- d) Viabilidade da produção de vigas de MLC a partir de peças de pequenas dimensões consideradas resíduos de serraria;
- e) Influencia dos defeitos da madeira e da presença de emendas denteadas na avaliação dinâmica de vigas de MLC.

- f) Influencia do reforço de fibras naturais ou sintéticas como reforço estrutural nas peças de MLC;
- g) Influencia da impermeabilização na resistência das peças de MLC;
- h) Utilização de outros métodos de ensaios dinâmicos, como o FRF;
- i) Modelagem numérica com vigas de MLC.

9 REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. P. D., OMETTO, J. P., NOBRE, C. , LAPOLA, D. M., ALMEIDA, C., VIEIRA, I. C., SOARES, J. V., ALVALA, R., SAATCHI, S., VALERIANO, D., CASTILLA-RUBIO, J.C. Modeling the spatial and temporal heterogeneity of deforestation-driven carbon emissions: the INPE-EM framework applied to the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**. v.18, p.3346-3366, 2012.

AkzoNobel. Características de adesivos. Disponível em: <<http://www.akzonobel.com/cascoadhesives>> Acesso em: 18 fev. 2013.

ALAMSYAH, E. M.; YAMADA, M.; TAKI, K. Bondability of tropical fast-growing tree species III: curing behavior of resorcinol formaldehyde resin adhesive at room temperature and effects of extractives of *Acacia mangium* wood on bonding. **Journal of Wood Science** v. 54, p. 208–213, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C215: **Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens**. Philadelphia: 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D905: **Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading**. Philadelphia, PA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D143: **Standard test methods for small clear specimens of timber**. Philadelphia, PA, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D198: **Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes**. Philadelphia, PA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1876: **Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by Impulse Excitation of Vibration**. Philadelphia: 2007.

ANSHARI, B., GUAN, A.C, Z.W., KITAMORI, A., JUNG, K., KOMATSU, K. Structural behaviour of glued laminated timber beams pre-stressed by compressed wood. **Construction and Building Materials**. v. 29, p. 24–32 , 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14432**. Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.

AZAMBUJA, M. dos A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas denteadas, da durabilidade e de vigas**. 128p. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Caracterização elástica da madeira de *eucalyptus citriodora*. **Cerne**. V.9, n.1, p.066-080, 2003.

BARILLARI, C. T. **Durabilidade da madeira do gênero *Pinus* tratada com preservantes: Avaliação em campos de apodrecimento**. 79p. 2002. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BARTHOLOMEU, A. Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som. **Tese de doutorado**. Universidade de Campinas, Campinas. 2001. 105p.

BODIG, J; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. Malabar: Krieger, 1993. 712 p.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Comparative study of the physical and mechanical properties of the wood and of LVL of *Pinus merkusii*. **Revista Forestal Venezolana**. V.53(2), p.191-194, 2009.

BOSCHETTI, W. T. N. Qualidade da madeira de árvores de clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* inclinadas por ação de ventos para produção de celulose. 2014. 80p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Espírito Santo, Jeronimo Monteiro –ES

BRITO, L. D. **Recomendações para o projeto de construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. 339p. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CALIL NETO, C. **Madeira Laminada Colada (MLC): Controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 125p. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CARRASCO, E.V.M, PASSOS, L. B., MANTILA, J. N. R. Structural behavior evaluation of Brazilian glulam wood sleepers when submitted to static load. **Construction and Building Materials**. v.26, p.334-343, 2012.

CUNHA, A. B., MATOS, J. L. M. Bending stiffness and resistance of structural glulam beams and “I” – joist composed of different adhesives. *Ciência Florestal*. V. 20, n. 2 , p.345-356, 2010.

CUNHA, A. B., MATOS, J. L. M. Avaliação da rigidez de vigas estruturais de madeira laminada colada unidas por adesivo poliuretano. *Cerne*. V. 17, n. 4 , p.593-600, 2011.

DAVIDS, W.G., RITCHIE, M., GAMACHE, C. Fatigue of glulam beams with fiber reinforced polymer tension reinforcing. **Forest Products Journal**. V.55, n.1, p.93-101, 2005.

DE LUCA, V., MARANO, V. Structural behaviour of glued laminated timber beams pre-stressed by compressed wood. **Construction and Building Materials**. v. 29, p. 24–32, 2012.

FAKOPP ENTERPRISE. Disponível em < <http://www.fakopp.com>>. Acesso em: 18 jan. 2013.

FIORELLI, J., DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. **Materials and Structures**. V. 44, p.1431–1440, 2011.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials bond formation and performance. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010.

GAO, Z., WANG, W., ZHAO, Z., GUO, M. Novel Whey Protein-Based Aqueous Polymer-Isocyanate Adhesive for Glulam. **Journal of Applied Polymer Science**. V. 120, p. 220–225, 2011.

GENTRY, T.R. Performance of glued laminated timbers with FRP shear and flexural reinforcement. **Journal of Composites for Construction**. V.15, n.5, p. 861-870, 2011.

GUAN, Z. W., RODD, P.D., POPE, D.J. Study of glulam beams pre-stressed with pultruded GRP. **Computers and Structures**. V.83, p. 2476-2487, 2005.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Madeira: Uso sustentável na construção civil**. São Paulo – SP. 2003.

INPE – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2013). Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>> Acesso em: 18 jan. 2013.

ISSA, C. A., KMEID, Z. Advanced wood engineering: glulam beams. **Construction and Building Materials**. v.19, p.99–106, 2005.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247p.

LINDYBERG, R.F., DAGHER, H.J. ReLAM: Nonlinear Probabilistic Model for the Analysis of Reinforced Glulam Beams in Bending. **Journal of Structural Engineering**. V.138, n.6, p. 777-788, 2012.

LYPTUS Ltda. (2013). Disponível em < <http://www.lyptus.com.br>>. Acesso em: 18 jan. 2013.

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

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 325p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

MONTGOMERY, D,C; RUNGER, G,C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2003.

MORALES E. A. M. **Técnicas de propagação de ondas na estimativa de propriedades mecânicas de painéis OSB**. 2006. 93p. Teses (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais). São Carlos: Universidade de São Paulo; 2006.

NASH, W. A. **Resistência dos materiais**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1982.

SENA-CRUZ, J., JORGE, M., BRANCO, J. M., CUNHA, V. M.C.F. Bond between glulam and NSM CFRP laminates. **Construction and Building Materials**. v. 40, p. 260–269, 2013.

OLIVEIRA, J. T. S., HELLMEISTER, J. C. **Caracterização da Madeira de Eucalipto para a Construção Civil**. Boletim Técnico da Escola Politecnica da Universidade de São Paulo, 52p. São Paulo, 1998.

PLASTER, O. B.; OLIVEIRA, J. T. DA S.; ABRAHÃO, C. P.; BRAZ, R. L. Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 251-258, 2008.

PORTAL REMADE. Aplicação da madeira laminada colada - MLC em elementos construtivos. **Revista da Madeira**. Ed. 71, 2003. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/br/index.php>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

PUCCINI, C.T. **Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando ultra-som**. 139p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2002.

PURBOND. **Ficha Técnica dos Adesivos**. Disponível em: <<http://www.purbond.com>>. Acesso em: 15 jan. 2013.

REWOOD Ltd. Disponível em: <<http://www.brarewoods.com.br>>, Acesso em: 18 jan. 2013.

ROCCO LAHR, F. A.; CALIL Jr, C.; BRAZOLIN, S. **Madeiras na Construção Civil**. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: ISAIA, G. C., 2007, v. 2, p. 1149-1179.

ROCCO LAHR, F. A. **Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira**. 227p. 1983. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

ROSA, R. A. **Caracterização do bambu laminado colado como alternativa tecnológica industrial**. 2013. 80p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro, ES.

SALES, A; CANDIAN, M; CARDIN, S.C. Nondestructive evaluation of timber: the new Brazilian code for the design of timber structures. **Materials and Structures**. V.43, p. 213-221, 2010.

SEGUNDINHO, P. G. A.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; CALIL JR, C. Aplicação do método de ensaios das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.6, p.1155-1161, 2012.

STANGERLIN, D.M; CALEGARIO, L; SANTINI, E.J; DOMINGUES, J.M.X; GATTO, D.A; MELO, R.R. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não destrutivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, Pernambuco. V.3. n.3. p.145-150. 2008.

SZÜCS, C. A.; TEREZO, R. F.; VALLE, A.; MORAES, P. D. **Estruturas de Madeira**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

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

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

WANG, V. Z., GINGER, J. D., NARAYAN, K. Intralaminar and interlaminar fracture characterization in glued-laminated timber members using image analysis. **Engineering Fracture Mechanics**. v.82, p.73-85,2012.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

APENDICE A - Forma de ruptura das vigas de Eucalipto

Figura A1 – Forma de ruptura da Viga 01 de Eucalipto.



Figura A2 – Forma de ruptura da Viga 02 de Eucalipto



Figura A3 - Forma de ruptura da Viga 03 de Eucalipto



Figura A4 - Forma de ruptura da Viga 04 de Eucalipto



Figura A5 - Forma de ruptura da Viga 05 de Eucalipto



Figura A6 - Forma de ruptura da Viga 06 de Eucalipto



Figura A7 - Forma de ruptura da Viga 07 de Eucalipto



Figura A8 - Forma de ruptura da Viga 08 de Eucalipto



Figura A9 - Forma de ruptura da Viga 09 de Eucalipto



Figura A10 - Forma de ruptura da Viga 10 de Eucalipto



Figura A11 - Forma de ruptura da Viga 11 de Eucalipto



Figura A12 - Forma de ruptura da Viga 12 de Eucalipto



APENDICE B - Forma de ruptura das vigas de Pinus

Figura B1 – Forma de ruptura da Viga 01 de Pinus



Figura B2 – Forma de ruptura da Viga 02 de Pinus



Figura B3 – Forma de ruptura da Viga 03 de Pinus



Figura B4 – Forma de ruptura da Viga 04 de Pinus



Figura B5 – Forma de ruptura da Viga 05 de Pinus



Figura B6 – Forma de ruptura da Viga 06 de Pinus



Figura B7 – Forma de ruptura da Viga 07 de Pinus



Figura B8 – Forma de ruptura da Viga 08 de Pinus



Figura B9 – Forma de ruptura da Viga 09 de Pinus



Figura B10 – Forma de ruptura da Viga 10 de Pinus



Figura B11 – Forma de ruptura da Viga 11 de Pinus



Figura B12 – Forma de ruptura da Viga 12 de Pinus

