

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**COMPORTAMENTO ELÁSTICO DA MADEIRA
LAMINADA COLADA CRUZADA DE DORMENTES
REAPROVEITADOS**

Vinnicius Dordenoni Pizzol

Belo Horizonte - MG

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**Comportamento elástico da madeira laminada colada cruzada de dormentes
reaproveitados**

Vinnicius Dordenoni Pizzol

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Estruturas.

Área de concentração: Sistemas construtivos

Orientador: Dr. Edgar V. Mantilla Carrasco

BELO HORIZONTE – MG

2018

P695c

Pizzol, Vinnicius Dordenoni.

Comportamento elástico da madeira laminada colada cruzada de dormentes reaproveitados [manuscrito] / Vinnicius Dordenoni Pizzol. - 2018.

107 f., enc.: il.

Orientador: Edgar V. Mantilla Carrasco.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 97-107.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Materiais laminados - Teses. 3. Altas temperaturas - Teses. 4. Testes não-destrutivos - Teses. I. Mantilla Carrasco, Edgar Vladimiro. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota”.

(Theodore Roosevelt)

AGRADECIMENTOS

A Deus e à Nossa Senhora da Penha, por tudo que tem acontecido em minha vida.

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Departamento de Engenharia de Estruturas, pela disponibilização de material e suporte para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Edgar V. Mantilla Carrasco, pela amizade, broncas, disponibilidade e orientação.

À Universidade Federal de Lavras, por disponibilizar a utilização do Laboratório de Painéis de Madeira. Em especial, aos professores Dr. Rafael Mendes Farinassi e Dr. Lourival Marin Mendes.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Estruturas, que contribuíram para minha formação.

Aos meus pais, Maurilio Pizzol e Orelinda Izabel Dordenoni Pizzol e aos meus irmãos Leandro Dordenoni Pizzol, Victor Dordenoni Pizzol e Lucas Dordenoni Pizzol, juntamente com toda a família, por sempre me apoiarem em todas as decisões e caminhos seguidos.

Aos alunos de iniciação científica e estagiários: Luísa Gomes de Moura, Otávio César da Paz Ferreira, Lívia Ramos Santos Pereira e Nedelly Yukimique que deram suporte e colaboraram na realização dos experimentos.

Aos amigos e amigas: Pedro Henrique Miranda Santos, Pedro Flanzboym, Rodrigo Sambaquy, Alicia Rodrigues, Bismark Reis, Natalia Achcar e Taciana Alves, pelo apoio incondicional, motivação, conselhos e carinho neste período.

Aos colegas de pós-graduação: Caio Sabido, Mônica Smits e Rejane Costa Alves que caminharam e compartilharam momentos e dificuldades. A todos aqueles de forma direta ou indireta colaboraram para a minha formação acadêmica e pessoal.

Aos membros da Banca Examinadora, pelos comentários e sugestões.

À FAPEMIG e à CAPES pelo auxílio neste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E DE SIGLAS	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1.	15
INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivos específicos	16
1.2 Importância e Justificativa	17
2.	19
REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	19
2.1 Madeira Laminada colada cruzada	19
2.2 Comportamento da CLT em situações de incêndios	23
2.3 Constituição das linhas férreas e a importância do dormente	26
2.4. Princípios de adesão	28
2.5 Influência da pressão na colagem	30
2.6 Influência da temperatura nas propriedades mecânicas	31
2.7 Análise não destrutivas por propagação de ondas	33
2.8 Ponderações a respeito do referencial	34
3.	39
ANÁLISE TEÓRICA	39
3.1 Matriz de flexibilidade da madeira	39
3.2 Aspectos teóricos da matriz de flexibilidade	40
3.2.1 Componentes de tensão	40
3.2.2 Componentes de deformação	41
3.2.3 Parâmetros elásticos dos materiais	43
3.3 Aspectos práticos para a determinação utilizando ensaio de compressão estática	49
2.3.1 Corpo de prova com 3 camadas longitudinais e 2 normais (3L)	50
2.3.2 Corpo de prova com 2 camadas longitudinais e 3 normais (2L)	51
2.3.3 Corpo de prova com todas as camadas normais (N)	51

2.3.4	Corpo de prova inclinado no plano 3L,2L.....	51
2.3.5	Corpo de prova inclinado no plano 3L,N.....	53
2.3.6	Corpo de prova inclinado no plano 2L,N.....	53
4.	54
MATERIAIS E MÉTODOS.....		54
4.1	Dormentes e desdobro.....	54
4.2	Determinação da umidade e densidade aparente.....	55
4.3	Classificação inicial das lâminas.....	56
4.3.1	Classificação visual.....	56
4.3.2	Classificação por ondas ultrassônicas.....	56
4.3.3	Classificação por ondas de excitação.....	58
4.3.4	Ensaio “semi” destrutivo de flexão.....	60
4.4	Colagem.....	62
4.4.1	Adesivo.....	62
4.4.2	Pressão de colagem.....	62
4.5	Montagem da Placa de CLT.....	64
4.6	Ensaio de compressão nas placas.....	66
4.7	Ensaio de compressão nas amostras menores.....	69
4.8	Propagação de ondas de excitação nas amostras.....	73
4.9	Ensaio em altas temperaturas.....	74
5.	76
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		76
5.1	Teor de umidade e densidade das lâminas.....	76
5.2	Avaliação não destrutiva das lâminas.....	76
5.3	Pressão de colagem.....	84
5.4	Propriedades determinadas nas placas.....	85
5.5	Propriedades elásticas determinadas nas amostras menores e matriz de flexibilidade.....	87
5.6	Propriedades elásticas obtidas no ensaio de ondas de excitação.....	91
5.7	Ensaio com a propagação de ondas de excitação em altas temperaturas.....	92
6.	95
CONCLUSÕES.....		95
7.	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		97

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E DE SIGLAS

2L	Eixo com duas camadas longitudinais às fibras
3L	Eixo com três camadas longitudinais às fibras
ad	Adimensional
B	Base da seção transversal
C_{11}	Constante elástica determinada a partir da direção 1
C_{22}	Constante elástica determinada a partir da direção 2
C_{33}	Constante elástica determinada a partir da direção 3
C_{44}	Constante elástica determinada a partir da direção 2.3
C_{55}	Constante elástica determinada a partir da direção 1.3
C_{66}	Constante elástica determinada a partir da direção 1.2
CE	Constante elástica
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
E_{2L}	Módulo de elasticidade no eixo 2L
E_{3L}	Módulo de elasticidade no eixo 3L
E_{din}	Módulo de elasticidade dinâmico
E_L	Módulo de elasticidade longitudinal
E_N	Módulo de elasticidade no eixo N
E_R	Módulo de elasticidade radial
E_T	Módulo de elasticidade tangencial
$F_{10\%}$	Carga referente a 10% da carga máxima aplicada
$F_{50\%}$	Carga referente a 50% da carga máxima aplicada
f_f	Frequência de ressonância fundamental da amostra
f_t	Frequência na torção
G	Módulo de elasticidade transversal
H	Altura da seção transversal
I	Número do MD
L	Comprimento de percurso da onda
L	Comprimento da amostra
L_f	Comprimento do vão
L_i	Distância inicial entre as cantoneiras de fixação do MDi

m	Massa da amostra
MD	Medidor de deslocamento
M_i	Medida do deslocamento do MD $_i$
MLC	Madeira laminada colada
m_s	Massa seca
m_u	Massa úmida
N	Eixo normal às camadas
SAD	Sistema de aquisição de dados
S_{ijkl}	Componentes de complacência
T	Tempo de propagação da onda em uma determinada direção
t'	Espessura da amostra
T_1	Fator de correção para o modo de flexão fundamental para espessura finita
U%	Umidade da amostra
V	Volume da amostra
$v_{10\%}$	Deslocamentos no meio do vão correspondentes à carga de 10%
$v_{50\%}$	Deslocamentos no meio do vão correspondentes à carga de 50%
V_{LL}	Velocidade de propagação da onda em uma determinada direção
W	Largura da amostra
Γ	Distorções nos três planos
E	Deformações obtidas nas três direções
ϵ_{2L}	Deformação obtida ao longo do eixo 2L
ϵ_{3L}	Deformação obtida ao longo do eixo 3L
ϵ_L	Deformação obtida ao longo do eixo Longitudinal
ϵ_N	Deformação obtida ao longo do eixo N
ϵ_R	Deformação obtida ao longo do eixo Radial
ϵ_T	Deformação obtida ao longo do eixo Tangencial
P	Densidade aparente
Σ	Tensões nas três direções
τ	Tensões de cisalhamento nas três direções
$\nu_{2L,N}$	Coefficiente de Poisson ao longo do eixo 2L, N
$\nu_{3L,2L}$	Coefficiente de Poisson ao longo do eixo 3L, 2L
$\nu_{3L,N}$	Coefficiente de Poisson ao longo do eixo 3L, N

ν_{LR}	Coeficiente de Poisson ao longo do eixo Longitudinal Radial
ν_{LT}	Coeficiente de Poisson ao longo do eixo Longitudinal Tangencial
ν_{TR}	Coeficiente de Poisson ao longo do eixo Tangencial Radial

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Dormentes descartados.....	18
Figura 2.1 – Arranjo CLT (a) e MLC. (b).....	20
Figura 2.2 – Principais edifícios em CLT. (a) Edifício <i>Stadthaus</i> em Londres. (b) Forté na Austrália. (c) Via Cenni na Itália.....	22
Figura 2.3 – Condições de segurança em placas de CLT.....	24
Figura 2.4 – Composição estrutural de uma linha férrea.....	26
Figura 2.5 – Camadas de carbonização em uma seção de uma peça de madeira.....	31
Figura 3.1 – Elemento tridimensional e eixos de orientações.....	40
Figura 3.2. – (a) Eixos de orientação para os ensaios. (b) Orientação dos 6 corpos de prova retirados.....	50
Figura 4.1 – Material utilizado na pesquisa. (a) Dormentes tipo mourão e (b) Tábuas oriundas do desdobro.....	55
Figura 4.2 – Equipamento de ultrassom.....	58
Figura 4.3- Posicionamento adequado das amostras para a obtenção das constantes elásticas. (a) Para a obtenção do modo longitudinal. (b) Para a obtenção do modo flexional e (c) Para a obtenção do modo torcional.....	59
Figura 4.4 – Ensaio de Flexão semidestrutivo.....	61
Figura 4.5 – Diagrama carga x Flecha na flexão.....	62
Figura 4.6 – Amostras antes da colagem.....	63
Figura 4.7 – Suporte e ensaio de cisalhamento da linha de cola.....	64
Figura 4.8 – Etapas de montagem das placas de CLT. (a) Pesagem dos adesivos. (b) Mistura do adesivo. (c) Equipamento de prensagem. (d) Espalhamento do adesivo sobre as lâminas (e) Prensagem e (f) Retirada da placa da fôrma.....	66
Figura 4.9 – Disposição dos extensômetros nas faces (a) Face lateral com extensômetro de 8 cm e (b) Face principal com extensômetros de 12 cm.....	67
Figura 4.10 – Célula de carga desenvolvida para o ensaio nas placas.....	67
Figura 4.11 – (a) Medidor de deslocamento. (b) Distribuição dos MD's na amostra e (c) Dispositivo para calibração do MD.....	10
Figura 4.12 – Ensaio de compressão nas amostras menores.....	70

Figura 4.13 – Esquema de ensaio para determinar o módulo de elasticidade longitudinal.....	73
Figura 4.14 – Esquema de ensaio para determinar o módulo de elasticidade transversal..	73
Figura 4.15 – Forno para análise em altas temperaturas. (1) Microfone. (2) Perfil de metálico e fios de platina. (3) Molde cerâmico para acomodação do perfil metálico e (4) Pulsador.....	75
Figura 5.1 – Gráficos: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para todas as amostras. (a) Correlação linear. (b) Correlação exponencial.....	78
Figura 5.2 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e sonelastic para todas as amostras(a) Correlação linear. (b) Correlação exponencial.....	79
Figura 5.3 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para a categoria A (sem defeitos).....	80
Figura 5.4 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e sonelastic para a categoria A (sem defeitos).....	80
Figura 5.5 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para a categoria B (um furo).....	81
Figura 5.6 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e sonelastic para a categoria B (um furo).....	81
Figura 5.7 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para a categoria C (dois furos).....	81
Figura 5.8 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e sonelastic para a categoria C (dois furos).....	82
Figura 5.9 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para a categoria D (três furos).....	82
Figura 5.10 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e sonelastic para a categoria D (três furos).....	82
Figura 5.11 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para a categoria E (rachaduras).....	83
Figura 5.12 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e sonelastic para a categoria E (rachaduras).....	83
Figura 5.13 – Gráfico: resistência da linha de cola em função da pressão de colagem.....	83
Figura 5.14 – Exemplo dos resultados do ensaio de compressão da placa B na direção	86

3L com a utilização de extensômetros. (a) Módulo de elasticidade 3L. (b) Coeficiente de Poisson 3L,N. (c) Coeficiente de Poisson 3L,2L.....

Figura 5.15 – Exemplo dos resultados do ensaio de compressão realizado nas amostras menores da placa B com a utilização de medidores de deslocamentos: (a) Módulo de elasticidade 2L. (b) Coeficiente de Poisson 2L,3L. (c) Coeficiente de Poisson 2L, N e (d) Módulo de elasticidade transversal G3L,2L..... 89

Figura 5.16 – Amostras após o ensaio em altas temperaturas e resultados: (a) Amostra da placa E com orientação 3L,2L após ensaio. (b) Amostra da placa E com orientação 3L após ensaio e (c) Gráfico: redução do módulo e elasticidade em função da temperatura para a amostra da placa E com orientação 3L,2L..... 93

Figura 5.17 – Gráfico: análise termogravimétrica para o adesivo Resorcinol-Formol..... 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Pesquisas relacionadas ao tema.....	35
Tabela 4.1 – Classificação visual das lâminas.....	57
Tabela 4.2 – Organização das camadas nas placas de acordo com módulo de elasticidade.	65
Tabela 4.3 – Orientação das placas, disposição dos extensômetros e equações utilizadas...	68
Tabela 4.4 – Amostras orientadas de acordo com os eixos, deformações e propriedades elásticas.....	71
Tabela 5.1 – Resultados das propriedades elásticas para as placas de CLT.....	86
Tabela 5.2 – Resultados para todas as propriedades elásticas.....	90
Tabela 5.3 – Resultados para o módulo de elasticidade determinado no ensaio de ondas de excitação.....	92
Tabela 5.4 – Redução do módulo de elasticidade em função do aumento de temperatura...	93

RESUMO

Objetivou-se nesta tese a caracterização elástica de madeira laminada colada cruzada feita a partir de dormentes descartados de linhas férreas. Foram confeccionadas 5 placas de CLT, com tábuas previamente classificadas e selecionadas visualmente e por ensaios de ultrassom, ondas de excitação e flexão (no regime elástico), as quais foram unidas com adesivo resorcinol-formol com pressão ideal também pré-determinada. As placas foram ensaiadas à compressão e as deformações medidas com extensômetros, no regime elástico, determinando-se algumas constantes elásticas, em seguida desdobrou-se em amostras menores com a orientação definida em seis direções: as três principais, 3 camadas longitudinais (3L), 2 camadas longitudinais (2L) e normal (N); e as três intermediárias, 3L,2L (45°), 3L,N (45°) e 2L,N (45°) para determinação de todas as propriedades elásticas no ensaio de compressão (deformações mensuradas por medidores de deslocamento) e de ondas de excitação, o último à temperatura ambiente e em altas temperaturas, analisando a viabilidade do método e, para explicar o comportamento em altas temperaturas, foi realizado o ensaio termogravimétrico do adesivo. Os resultados permitiram: a) Avaliar positivamente a eficácia dos dois ensaios não destrutivos na classificação das tábuas (lâminas); b) Determinar todas as constantes elásticas e, conseqüentemente, a matriz de flexibilidade e; c) Definir que o adesivo influenciou mais do que a madeira em altas temperaturas.

Palavras chave: altas temperaturas, ensaios não destrutivos, folhosas, matriz de flexibilidade, propriedades elásticas.

ABSTRACT

The thesis aims to ensure the elastic characterization of cross-laminated laminated wood made from discarded railway sleepers. Five CLT plates were prepared with previously classified and visually selected boards and by ultrasound, excitation and flexion waves (in the elastic regime), which were grouped with resorcinol-formaldehyde adhesive with an optimum pressure, also predetermined. The plates were compressed and deformed with strain gauges in the elastic regime, determined some elastic constants, then unfolded in smaller samples with the orientation defined in six directions: the three main, 3 longitudinal layers (3L) , 2 longitudinal layers (2L) and regular (R) layers; and the three intermediates, 3L, 2L (45 °), 3L, R (45 °) and 2L, R (45°) were used to determine all elastic properties in the compression test (deformations measured by displacement meters) and waves of excitation, the latter at room temperature and at high temperatures, thus analyzing the viability of the method and, so as to explain the behavior at high temperatures, the thermogravimetric test of the adhesive was carried out. The results were conclusive to: a) Evaluate positively the effectiveness of the two non-destructive tests in the classification of the boards (slides); b) Determine all the elastic constants and, consequently, the flexibility matrix and finally; c) Define that the adhesive influenced more than the wood in high temperatures.

Keywords: high temperatures, non destructive tests, hardwoods, flexibility matrix, elastic properties.

1.

INTRODUÇÃO

A madeira, desde os primórdios da existência humana, acompanhou suas várias etapas de evolução, contribuindo decisivamente para o seu desenvolvimento. Por suas propriedades físicas e mecânicas, facilidade de manuseamento e processamento, variedade de formas, texturas e abundância, a madeira sempre demonstrou uma grande dinâmica de utilização desde os utensílios mais básicos (armas de caça, instrumentos de trabalho, instrumentos musicais, etc.), energia (lenha, carvão – vapor) até a complexidade das construções para habitação.

A madeira como material de construção tem um reconhecido potencial no que diz respeito à minimização da categoria ambiental de aquecimento global pelo sequestro de carbono durante o seu ciclo de crescimento na floresta (DEMARZO; PORTO, 2007). Esse fator justifica a maior inserção do produto na construção de casas e construções de grande porte como edifícios e pontes.

As madeiras “engenheiradas” que possibilitaram tais usos, inicialmente, a madeira laminada colada surgiu para vencer grandes vãos e, mais recentemente, a madeira laminada colada cruzada ou *Cross Laminated Timber* (CLT) na construção de edifícios, sendo apontado como um produto sustentável e pertinente para a substituição do aço e concreto armado (STÜRZENBECHER, 2010). A técnica consiste no arranjo ortogonal das camadas de tábuas e na formação de painéis estruturais na forma de placas. A CLT é utilizada, também, nas construções em curto prazo de casas e de edifícios por sistemas patenteados por empresas, como a KLH e a LENO (TORRES, 2010).

O apelo ecológico da madeira também se torna necessário no seu reaproveitamento e uso consciente. Então, por que não fabricar CLT como madeira reaproveitada? Todo ano

dormentes de madeira são descartados após não atenderem mais os requisitos estruturais da linha férrea. Esse descarte é essencialmente composto madeiras com excelentes características mecânicas, conhecidas no Brasil como “madeiras de lei”, folhosas de alta densidade, que podem gerar um painel estrutural com propriedades superiores aos painéis fabricados nos países percursos dessa tecnologia, em que utilizam madeiras de coníferas (madeiras de baixa densidade).

Segundo Passos (2006), em virtude do alto nível de desmatamento, principalmente no Brasil, madeiras consideradas nobres (“madeiras de lei”) estão sendo vendidas a preços consideravelmente altos e também a baixa oferta de espécies de reflorestamento com a qualidade necessária, acarretaram uma redução na utilização de dormentes de madeira, outro fator que contribui é o sucateamento das ferrovias. Com isso, diversos tipos de dormentes alternativos têm sido desenvolvidos com o intuito de substituí-los. Contudo a madeira continua sendo considerada o melhor material, para produção de dormentes, a serem utilizados em linhas de tráfego pesado por suas diversas qualidades, principalmente ao amortecimento estrutural e, ainda, são predominantes na maioria das vias de carga brasileiras e internacionais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Caracterização elástica de madeira laminada cruzada feita a partir de dormentes descartados de linhas férreas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Classificação das lâminas por meio de ondas ultrassônicas, ondas de excitação e ensaio de flexão no regime elástico.
- Determinação da pressão ideal de colagem.
- Determinação das propriedades elásticas por ensaios de compressão.
- Determinação da matriz de flexibilidade.
- Estimar as propriedades elásticas da CLT, por meio de ondas de excitação, em temperatura ambiente e em altas temperaturas.

1.2 Importância e Justificativa

A exploração ambiental se intensificou muito nos últimos anos, sendo cada vez mais urgente a mudança de atitudes e de alguns conceitos em relação ao meio ambiente. Nos grandes centros urbanos, onde os problemas ecológicos são mais intensos do que no meio rural, constata-se uma deterioração da qualidade de vida, em parte pelas mudanças ambientais sofridas no planeta. Desta forma, é de grande importância estudos, na área da construção civil, para avaliar materiais que causem menor impacto ao meio ambiente e que possam ser reutilizados sempre considerando todo seu ciclo de vida, desde a fonte de matéria-prima, sua produção, distribuição, utilização e descarte.

O reaproveitamento e reuso de um material é de suma importância para que seja apontado como sustentável e fechar seu ciclo de vida. A madeira, sem dúvida, é um material ecologicamente correto, além de ser renovável; durante seu ciclo de crescimento, absorve do ambiente dióxido de carbono e libera oxigênio para o ar. Outro aspecto relevante é a possibilidade de reutilização ou reciclagem do material, ao final do processo de produção ou mesmo em cada uma das etapas da cadeia produtiva, resultando em menor quantidade de resíduos sólidos produzidos. Sem tratamento, quando é descartada no meio ambiente, sofre degradação e decomposição pelos microrganismos, intempéries e insetos se transformando em nutrientes no solo.

Os dormentes são produtos à base de madeira, que passam por tratamento com produtos químicos, principalmente, Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), Borato de Cobre Cromatado (CCB) e creosoto, com a finalidade de aumentar sua vida útil e sua resistência a agentes biodegradadores (insetos e fungos). Pela toxicidade de tais produtos, os dormentes devem ter destinação adequada, após seu uso, não podendo ser queimados nem descartados em qualquer local. Tornam-se uma preocupação para empresas que administram as ferrovias, ficando armazenados em seus pátios ou até mesmo jogados, nos entornos das linhas férreas, como mostra a Figura 1.1.



Figura 1.1 – Dormentes descartados.

Ressalta-se que, para uma madeira ser utilizada como dormente, suas propriedades mecânicas devem ser elevadas, como as madeiras “nobres” nativas do Brasil e madeiras de reflorestamento com idades avançadas, sendo um desperdício o descarte incorreto desse produto.

O Brasil conta com 30.129 km de ferrovias concentrando-se nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, atendendo parte do Centro-Oeste e Norte do país. Segundo dados da Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF, 2017) as ferrovias de cargas ampliaram significativamente o volume transportado, que atingiu o recorde de 503 milhões de toneladas úteis em 2016, representando um aumento de 98,8% desde 1997, época do início das concessões, quando foram movimentadas 253 milhões de toneladas úteis, um crescimento de 2,2% sobre o volume transportado em 2015 (492 milhões) e desde o início das concessões, as ferrovias já investiram R\$ 50,829 bilhões em linhas férreas. São transportadas pessoas e mercadorias como produtos siderúrgicos, grãos, minério de ferro, cimento, cal, adubos, fertilizantes, derivados de petróleo, calcário, carvão mineral, clínquer e contêineres.

Grande parte dessas ferrovias utilizam madeiras como dormentes e, segundo Assad (2007), para construir 100 m de uma linha ferroviária, são necessários 150 dormentes de madeira. Assim, a cada troca de dormentes uma quantia relevante de resíduo é gerada tornando-se significativo o seu reuso ou descarte correto.

Portanto a importância e justificativa do trabalho se fazem no reaproveitamento e no uso mais nobre de um resíduo, transformando-o em um novo produto estrutural que possui grande potencial de crescimento nacional e internacional. Além disso, fornecer parâmetros de colagem para madeiras densas e parâmetros elásticos que possam ser utilizados em softwares de dimensionamento.

2.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 Madeira Laminada Colada Cruzada

A madeira laminada colada cruzada ou *Cross Laminated Timber* é um painel de madeira desenvolvido na Europa no final da década de 1990. A Áustria foi o país que impulsionou o desenvolvimento desse material com estudos e pesquisas na sua utilização para a construção de edifícios residenciais e não residenciais. Essa tecnologia se destaca por ser considerada uma construção verde e um forte candidato ao uso de construções pesadas que, atualmente, usem concreto e aço. Se a construção em madeira for projetada e construída de forma correta, levando em consideração a proteção necessária contra a umidade e os agentes meteorológicos, pode durar séculos (STÜRZENBECHER, 2010).

O CLT é um produto de madeira maciça de alto desempenho, que é predestinado a aplicações de suporte de carga e para a utilização como placa estrutural em construções de vários andares, constituindo lajes e paredes (BLASS; FELLMOSE, 2004; DUJIC et al., 2004; ELLIS; BOUGARD, 2001). CLT são elementos feitos de tábuas comuns, coladas umas às outras, com adesivo estrutural em camadas cruzadas, mesma tecnologia do compensado e do OSB, para uma relação simétrica é um produto mais estável dimensionalmente (STÜRZENBECHER, 2010).

Segundo Silva, Branco e Lourenço (2012) o CLT é um material homologado, verificado e submetido a exigentes controles durante a sua produção. Os mesmos autores e Augustin (2008) definem que o CLT é considerado como um material estável (dimensionalmente), uma vez que o cruzamento das lâminas restringe os movimentos

higroscópicos da madeira quando sujeita a variações do teor de água (menos de 1% na direção das fibras e 2% na direção perpendicular às fibras).

Os painéis CLT são pré-fabricados, de acordo com os desenhos estruturais, tendo em vista as aberturas de portas, janelas, escadas e todas as instalações elétricas e hidráulicas. São transportados para o local e, em seguida, juntam-se por meio de ligações simples e rápidas, e elementos de isolamento e fachada são facilmente conectados. São geralmente fabricados com um número ímpar de camadas, 3-7 camadas (KUILEN et al., 2011). A espessura das peças de madeira individual pode variar de 16 mm a 51 mm e a largura de 60 mm a 240 mm. Já o tamanho do painel pode variar de acordo com o fabricante; larguras típicas são de 0,6 m, 1,2 m, 2,4 m e 3 m, enquanto o comprimento pode ser de até 18 m e a espessura até 508 mm (CECCOTTI et al., 2006).

Ao contrário das construções com estruturas de madeira comuns, cujos elementos individuais são responsáveis pela transferência das cargas verticais, a utilização de grandes painéis de madeira maciça permite a transferência de grandes cargas verticais e garante elevada rigidez e robustez à construção (CECCOTTI, 2008). Outra vantagem deste novo sistema de construção é o isolamento térmico e acústico e a vedação.

Quando comparado à madeira laminada colada (MLC), a CLT fornece um produto com maior estabilidade dimensional pelo arranjo transversal das fibras entre as camadas, conforme Figura 2.1. Enquanto a MLC possui todas as camadas que a constituem na mesma direção, a CLT tem as camadas ortogonais. Quanto ao seu uso, a MLC é utilizada apenas em vigas e colunas, já o CLT é fabricado em painéis de grandes dimensões, sendo muito utilizado em paredes, pisos e forros de casas de madeira pré-fabricadas.

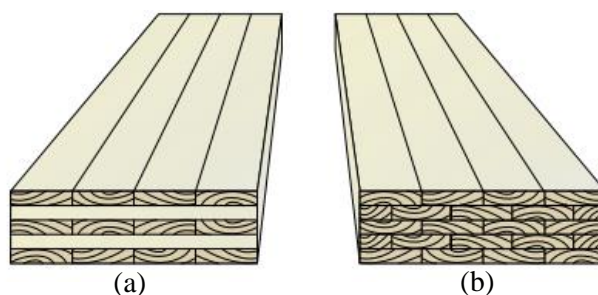


Figura 2.1 – Arranjo CLT (a) e MLC (b).

Fonte: FPInnovations (2011).

O uso da CLT prende-se com a facilidade de montagem e com a redução no tempo de construção dos edifícios, decorrentes da produção dos elementos em fábrica e com a pré-fabricação de todas as peças (GSELL et al., 2007; CRESPEL; GAGNON, 2010). Associada a esta particularidade, podem ser enumeradas outras vantagens como o aumento da segurança em obra, a substancial redução dos custos de construção e a diminuição dos resíduos e desperdícios. Um dos aspetos atrativos deste material deve-se à facilidade de construção, implicando apenas uma grua, um plano de montagem e mão de obra especializada em carpintaria (FPINNOVATIONS, 2011).

Robertson et al. (2012) afirmam que, por se tratar de um material natural, a CLT apresenta vantagens, como o seu perfil sustentável e a possibilidade de se reutilizar os painéis de madeira. Além destas questões relacionadas ao meio ambiente e a sustentabilidade, este material permite ao arquiteto grande versatilidade na concepção do projeto, uma vez que se adapta facilmente às diferentes formas dos edifícios, quer quando é utilizado de forma independente quer de forma combinada com outros materiais como o aço ou o concreto armado (GSELL et al., 2007; CRESPEL; GAGNON, 2010).

Apesar de existir um grande grupo de aspetos positivos que motivam e incentivam a utilização da madeira como material estrutural, ainda existem algumas barreiras importantes a ultrapassar, nomeadamente a desconfiança por parte da sociedade, em relação à eficiência da madeira enquanto material de construção, principalmente, no que diz respeito à resistência ao fogo.

Quanto ao sistema construtivo em CLT em uso, suas desvantagens podem ser enumeradas como: por ser um sistema maciço e estar associado ao colapso progressivo de toda a estrutura, o rompimento de um placa (parede ou laje) leva o rompimento de toda a estrutura (CRESPEL; GAGNON, 2010). Outra questão desfavorável é que, por se tratar de um sistema construtivo que utiliza um elevado número de paredes resistentes, o espaço interior é comprometido, ou seja, há perda de área útil (SILVA, 2014).

Por ser um produto sólido, denso e de grandes dimensões, o manuseio e transportes são dificultados (XU, 2013). Para respeitar o tempo de resistência ao fogo exigido para edifícios de vários andares é necessário o revestimento dos painéis de CLT, por exemplo, com placas de gesso cartonado. O preço ainda elevado do CLT faz com que este sistema não seja ainda economicamente vantajoso.

A construção de edifícios em CLT é um mercado de nichos suportado por redes sociais frágeis que apostam na inovação, e por medidas políticas de caráter ecológico (COSTA, 2013). Segundo o mesmo autor a tecnologia em CLT requer projetos concluídos antecipadamente e de elevada precisão, para permitir a fabricação dos diversos elementos em fábrica, para proteger da umidade requer revestimento externo, é suscetível ao contato com o solo sendo necessário fundação em outro material. Outro fator prejudicial é que a implementação da tecnologia CLT demanda altos investimentos em maquinário e infraestrutura de produção.

Por fim, as conexões na construção com madeira pesada, incluindo aquelas construídas com a CLT (ligação entre placas que formam paredes e lajes), desempenham um papel essencial na resistência, rigidez, estabilidade e ductilidade da estrutura; conseqüentemente, exigem cuidadosa atenção dos designers. Segundo o Handbook da FPInnovations (2011) pesquisas pós-desastres (fortes terremotos e furacões) mostraram que, entre outras razões, as falhas estruturais ocorrem frequentemente devido as conexões inadequadamente projetadas ou instaladas incorretamente. A interrupção da continuidade na estrutura da madeira causada pela presença de conexões pode resultar em uma diminuição na resistência e rigidez da estrutura.

A tecnologia da CLT já é dominada em grande parte da Europa em que se destaca o *Stadthaus*, construído em 2008, em Londres, com, aproximadamente, 30 m de altura (9 pisos), Figura 2.2 (a), é declarado como um dos edifícios de madeira mais altos do mundo. O edifício é constituído por oito pisos construídos, integralmente em CLT, assentados num piso (térreo) de concreto armado. Outras construções conhecidas são o Forté, em Melbourne's Docklands (Austrália) e o Via Cenni, em Milão (Itália), Figura 2.2 (b) e (c), que são alguns dos exemplos mais ambiciosos possuindo entre 8 e 10 pisos considerados revolucionários na construção em madeira.

No Brasil, apenas uma empresa localizada em São Paulo utiliza esse tipo de material, importando as placas da Europa. Quanto à produção de CLT com espécies nativas, o domínio do assunto, ainda se dá, em nível inicial de pesquisas, conforme será apresentado no item 2.8. As espécies de madeiras aqui comercializadas têm um comportamento bem distinto das utilizadas nos países percussores da tecnologia.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.2 – Principais edifícios em CLT. (a) e (b) Edifício *Stadthaus* em Londres. (c) Forté na Austrália. (d) Via Cenni na Itália.

Fonte: www.nce.co.uk

2.2 Comportamento da CLT em situações de incêndios

Segundo FPInnovations (2011), a utilização de grandes painéis de madeira maciça como os de CLT, também, são favoráveis em casos de incêndio, como o risco de propagação do fogo pelos espaços vazios reduzido em comparação às estruturas em madeiras tradicionais. Materiais de construção combustíveis como madeira tendem a queimar em sua superfície, liberam energia e, assim, contribuem para a propagação do fogo e do desenvolvimento de fumaça.

A segurança contra incêndio é uma condição prévia principal para o uso da madeira em particular para os edifícios residenciais. Desde os anos 1990, muitos projetos de pesquisa

têm focado o comportamento do fogo de estruturas de madeira em nível mundial (GAGNON, 2010).

O desempenho estrutural de conjuntos de construção em casos de incêndios pode ser avaliado por realização de testes de resistência ao fogo de acordo com a norma ASTM E119 (1984). Uma classificação de resistência ao fogo é definida como o período em que um elemento de construção, ou componente, ou montagem, pode: a) Manter capacidade para desempenhar a sua função de separação, ou seja, confinando um fogo, prevenindo ou retardando a passagem de calor excessivo, os gases quentes ou chamas. b) Continua a executar a função de suporte de carga. c) Atender ambas as situações.

Mais especificamente, um teste padrão de resistência ao fogo compreende três critérios de aceitação, conforme Figura 2.3:

1) Resistência estrutural: o conjunto deve suportar a carga aplicada durante toda a realização do teste (relaciona-se com a função de suporte de carga).

2) Integridade: a montagem deve impedir a passagem de chamas ou gases quentes o suficiente para acender uma almofada de algodão (refere-se à função de separação).

3) Isolamento: o conjunto deve evitar o aumento de temperatura na superfície não exposta, a sua temperatura não deve ser maior do que 180°C , em qualquer local, ou uma média de 140°C , medida a um determinado número de localizações, acima da temperatura inicial (refere-se à função de separação).

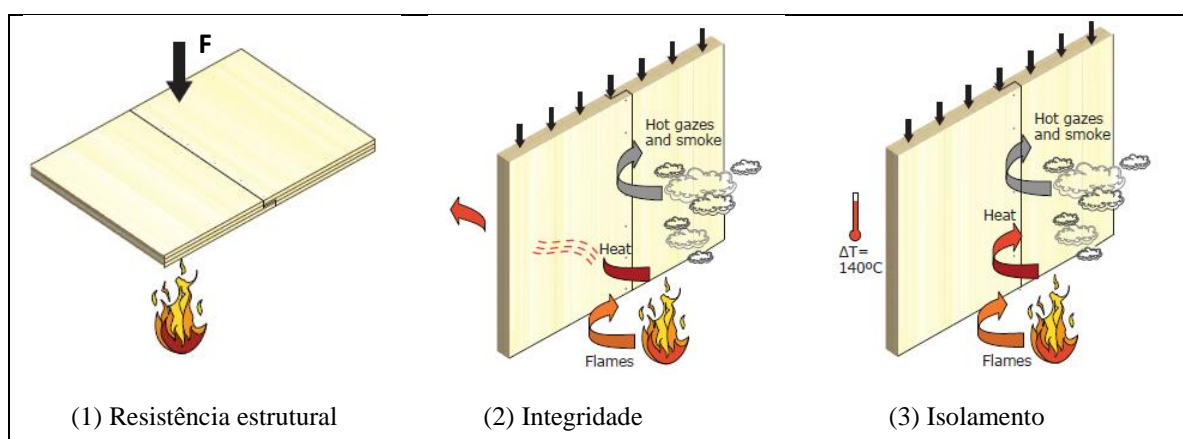


Figura 2.3 – Condições de segurança em placas de CLT.

Fonte: FPInnovations (2011).

Quando calor suficiente é aplicado à madeira e, com a presença de oxigênio, um processo de degradação térmica (pirólise) ocorre, produzindo gases combustíveis,

acompanhados por uma perda da massa. Uma camada de madeira carbonizada é, então, formada sobre as superfícies expostas ao fogo, essa camada de carvão cresce em espessura e o fogo progride, reduzindo as dimensões transversais do elemento de madeira (MOHAMMAD et al., 2013). A camada de carvão é um bom isolante e protege a seção transversal residual remanescente contra o calor.

Frangi et al. (2009) demonstraram que o comportamento da CLT, em situação de incêndio, depende do comportamento das camadas individuais. Se a camada carbonizada se desprender, um aumento da taxa de carbonização precisa ser levado em conta, pois a camada de carvão que agiria como isolante térmico não estará mais presente.

Esse desprendimento da camada carbonizada pode ser causado pela degradação do adesivo que une as tábuas. Uma investigação do comportamento do adesivo em altas temperaturas pode comprovar essa teoria, uma simples análise termogravimétrica, por exemplo, pode ser utilizada.

Uma série de testes foi realizada, para estudar o comportamento de cisalhamento de adesivos diferentes, a temperaturas elevadas; demonstrou-se que o comportamento do fogo de painéis de madeira CLT é fortemente influenciado pelo comportamento do adesivo que foi utilizado (FRANGI et al. 2008; 2009).

Em países onde a CLT encontra-se inserida nas construções, o comportamento do painel, em situações de incêndios, está sendo utilizado em abordagem numérica por elementos finitos, a fim de ampliar e confirmar os resultados experimentais aos modelos simplificados (WONG; TEE, 2014).

Segundo Yeh et al. (2010), as normatizações europeias e norte-americanas estipulam que a CLT pode ser feita com qualquer espécie de madeira resinosa, conífera, que possua uma densidade superior a $0,35 \text{ g/cm}^3$. De acordo com os mesmos autores, a espessura mínima das lâminas é de 16 mm e a máxima de 51 mm, não podendo variar dentro da mesma camada.

Para compreensão da possibilidade do uso do dormente, para fabricar a CLT, nos tópicos a seguir, será descrita a concepção de uma linha férrea e como os fatores dos dormentes precisam ser analisados.

2.3 Constituição das linhas férreas e a importância do dormente

A estrutura, que forma as ferrovias, é dividida em duas partes: infraestrutura e superestrutura. A infraestrutura é a subdivisão da ferrovia que engloba terraplenagem, obras de arte especiais, drenagem e taludes. A parte da infraestrutura que irá receber diretamente a superestrutura ferroviária é denominada plataformas. A superestrutura das estradas de ferro é constituída pela via permanente. A superestrutura ferroviária é composta pelos elementos trilhos, dormentes, fixações, palmilhas, talas de junção, retensores, lastro e, em alguns casos, o sublastro, conforme Figura 2.4.

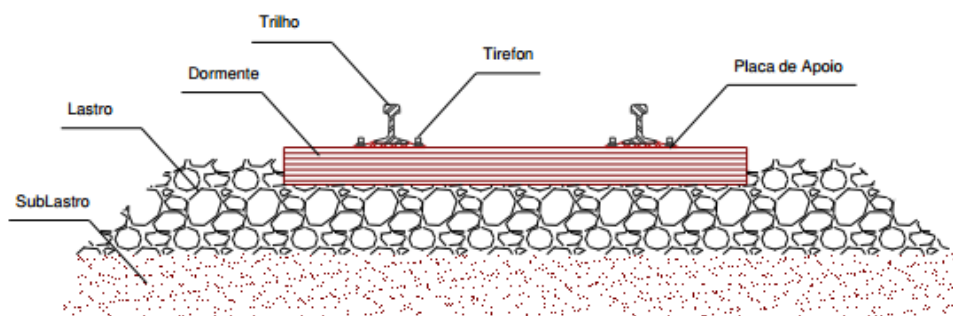


Figura 2.4 – Composição estrutural de uma linha férrea.

Fonte: Passos (2006).

Segundo Sucena (2004), o dormente é o elemento da superestrutura ferroviária que tem a função de receber e transmitir ao lastro os esforços produzidos pelas cargas dos veículos, servindo de suporte para os trilhos, permitindo a sua fixação e mantendo invariável a distância entre eles (bitola).

Segundo Passos (2006) para cumprir essa finalidade, é necessário que as suas dimensões, comprimento e largura, forneçam uma superfície de apoio suficiente, para que a taxa de trabalho no lastro não ultrapasse o limite determinado; que sua espessura dê a necessária rigidez, permitindo, entretanto, alguma elasticidade.

Além disso, o dormente precisa ter resistência suficiente para os esforços; tenha durabilidade; permita, com relativa facilidade, o nivelamento do lastro (socaria) na base; se oponha eficazmente aos deslocamentos longitudinais e transversais da via; e permita uma boa fixação do trilho, isto é, uma fixação firme, sem ser excessivamente rígida (PASSOS, 2006).

Os dormentes são peças que podem ser feitas de aço, concreto e madeira. Cada material propicia diferentes características ao dormente (CRUZ, 2002).

Os dormentes feitos com madeira possuem as características: relativa leveza, pesando cerca de 70 kg, o que facilita o manuseio; ótimo isolamento elétrico, podem ser reaproveitados quando ocorrem descarrilamentos ou substituição; instalação e fixações rápidas e fáceis; proporcionam boa elasticidade da via, diminuindo o nível de ruído e trepidações e possuem resistência à sobrecarga (PASSOS, 2006).

Possuem desvantagens como: vulneráveis ao ataque de organismos xilófagos; baixa vida útil quando comparados aos dormentes de aço ou concreto; têm um tempo de estocagem na fábrica pelo tratamento químico e a redução da oferta de dormentes de madeira nativa, por questões ambientais.

Segundo Passos (2006), os dormentes eram feitos de madeiras nativas tais como *Astronium urundeuva* (aroeira do sertão), *Tecoma impetiginosa* (Ipê roxo), *Ferreirea spectabilis* (Sucupira amarela), *Machaerium scleroxylon* (Caviúna). As espécies mais utilizadas em dormentes citadas pelo DNIT (2014) são: *Bowdichia nítida* (Sucupira), *Tabebuia* spp. (Ipê), *Swietenia macrophylla* (Mogno), *Carapa guianensis* (Andiroba), *Cedrella* spp (Cedro), *Hymenaea courbaril* (Jatobá) e a *Hyemenolobium petraeum* (Angelimpedra), espécies com excelentes propriedades mecânicas e elevada densidade que, no entanto, por desmatamento, risco de entrarem em extinção e seu corte passaram a ser proibidas. A demanda de dormentes de madeira passou a ser atendida por espécies do gênero *Eucalyptus*, madeiras de reflorestamento, sempre espécies com alta densidade, dureza e, conseqüentemente, elevadas propriedades mecânicas.

Após seu uso, o dormente de madeira é descartado e pode ser reaproveitado em outros produtos. Heebink e Superjcky (1977) estudaram os dormentes de partículas laminadas, em virtude da alta demanda de madeira para a produção de dormentes pelas ferrovias americanas e das restrições ambientais na queima e descarte de dormentes de refugo. Geimer (1982) apresentou um estudo da viabilidade de produção de dormentes de partículas laminadas.

No Brasil, Passos (2006) trabalhou com a reciclagem do dormente, fabricando um novo, utilizando a técnica de laminado colado, o que possibilitou concluir a viabilidade do uso. Atualmente os dormentes são empregados na fabricação de móveis (móveis de madeira de demolição), degraus de escadas ao ar livre, mourões de cerca, pocilgas, jardinagem ou abandonados em campo para seu apodrecimento.

2.4. Princípios de adesão

As madeiras utilizadas na fabricação de dormentes são de alta densidade, ou seja, madeiras com baixa porosidade. A baixa porosidade prejudica a passagem de fluidos, pois o tecido lenhoso apresenta paredes celulares mais espessas, lúmens reduzidos e pontuações reduzidas. Essas características tendem a limitar a mobilidade do adesivo na estrutura lenhosa, assim, quanto mais densa for a madeira menos permeável será ao adesivo e, conseqüentemente, a ligação adesiva mais superficial e, provavelmente, mais fraca (TSOUMIS,1991; MARRA, 1992).

Os principais conceitos de uma ligação adesiva são: adesivo, adesão e aderentes. A adesão é o fenômeno interfacial ou a energia de separação de dois substratos, enquanto adesivo é o material que promove a união entre eles e aderentes são os materiais sólidos ligados ao adesivo, os quais podem ser chamados também de substratos (MARRA, 1992).

Para melhor entender o que acontece na colagem, é necessário compreender as teorias de adesão. Segundo Vital et al. (2006), existem várias teorias que procuram explicar o fenômeno da adesão, porém nenhuma delas é capaz de justificar todos os aspectos de aderência e, provavelmente, a combinação entre elas é que mais se aproxima da realidade.

Segundo os mesmos autores, ainda não existe uma única teoria unificadora da adesão, descrevendo a relação entre adesão efetiva e as interações intermoleculares e interanatómicas, que ocorrem entre o adesivo e o material aderido. As teorias existentes são, em sua maioria, racionalizações de fenômenos observados. Em seguida, apresentam-se algumas destas teorias, incluída a teoria de adesão mecânica, difusão de polímeros e adesão química.

A teoria da adesão mecânica parte de uma chave mecânica, ou ancoramento, do adesivo dentro de cavidades, poros e asperezas da superfície para ser o principal fator determinante da resistência adesiva. Na maioria dos casos, o aumento da adesão pela ligação mecânica pode ser atribuído simplesmente ao aumento da área interfacial pela rugosidade da superfície e no quanto as características do substrato iriam permitir a penetração do adesivo nos poros e cavidades (SCHULTZ; NARDIN, 1994).

O processo de colagem da madeira se inicia com o espalhamento do adesivo sobre a superfície do substrato, iniciando as fases de movimento e se finaliza com a sua solidificação, formando o ancoramento ou ganchos entre duas peças coladas. O grau de adesão depende da

intensidade de cada elo, ou seja, dos aderentes, do adesivo e das interfaces (SCHULTZ e NARDIN, 1994).

A teoria da difusão de polímeros admite que a adesão ocorra pela difusão de segmentos de cadeias de polímeros em nível molecular por meio da interface, que permite, conseqüentemente, uma absorção gradual. Tal mecanismo pressupõe que correntes moleculares ou elos de correntes são suficientemente móveis e mutuamente solúveis. Este fato é de grande importância para muitos problemas da adesão, tal como nos processos de penetração e solidificação. Portanto, se o fenômeno da inter-difusão está envolvido, a resistência da junta irá depender de diferentes fatores, como tempo de contato, temperatura, natureza e peso molecular dos polímeros (SCHULTZ e NARDIN, 1994).

Na teoria da adesão química, a adesão ocorre por ligações primárias iônicas ou covalentes e/ou por forças intermoleculares secundárias. Os termos primário e secundário originam-se da resistência relativa ou energia de colagem de cada tipo de interação, por exemplo, a força de uma ligação covalente, geralmente, encontra-se entre 100 a 1000 kJ/mol enquanto a ligação de *Van der Waals* e pontes de hidrogênio não passam de 50 kJ/mol. A formação da ligação química depende da reatividade entre o adesivo e o substrato (SCHULTZ; NARDIN, 1994).

De acordo com o Wood Handbook (2010) o intertravamento mecânico é provavelmente o mecanismo primário pelo qual os adesivos aderem a estruturas porosas, como a madeira (adesão mecânica). O intertravamento mecânico efetivo ocorre quando os adesivos penetram além dos detritos da superfície e das fibras danificadas, atingindo a madeira sadia, de duas a seis células de profundidade (teoria da difusão). A penetração mais profunda na microestrutura fina aumenta a área da superfície de contato entre adesivo e madeira, assim, um intertravamento mecânico mais efetivo. Acredita-se que as ligações estruturais mais duráveis na madeira não se desenvolvem apenas quando um adesivo penetra profundamente nas cavidades celulares, mas também quando o adesivo se difunde nas paredes celulares (adesão química), fazendo contato molecular com as hemiceluloses e celulosas da madeira.

2.5 Influência da pressão na colagem

A pressão de colagem é fator de grande importância para a qualidade de ligação. A pressão influencia a penetração do adesivo na madeira, pressões muito altas podem gerar uma movimentação excessiva do adesivo, fazendo com que ele transborde para fora da junta colada, enquanto pressões muito baixas podem diminuir a penetração do adesivo pela madeira. A pressão de colagem, também, pode variar com a variação da massa específica da madeira. Algumas pesquisas podem comprovar este fato; Petruski (1999), estudando diferentes níveis de pressão para madeira de *Eucalyptus grandis*, mostrou uma relação entre o aumento de pressão e a melhoria na resistência e da porcentagem de falha na madeira. O mesmo autor definiu que a pressão de colagem, para uma quantidade de adesivo que gira em torno de 300 g/m², seria de 1,14 MPa e a utilização de baixas pressões como 0,3 MPa gerou maior consumo de adesivo.

Carrasco (1989) relata que o adesivo resorcinol apresenta uma resistência razoável na ausência de pressão pela sua maior fluidez e penetração nos poros da madeira, porém essa ausência de pressão pode ocasionar uma menor penetração e uma camada mais espessa da linha adesiva. Por outro lado, para pressões elevadas, ocorre penetração excessiva, diminuindo a sua resistência. Segundo o mesmo autor, para as espécies castanheira (*Bertholetia excelsa*), pinus (*Pinus elliottii*), pinho do Paraná (*Araucária angustifolia*) e peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*), coladas com polivinila acetato (PVA) e resorcinol, a pressão ideal de colagem variou entre 0,55 a 0,65 MPa.

Jesus et al. (2000), estudando resistência ao cisalhamento do adesivo à base de mamona em madeira de *Pinus caribea var. hondurensis* e *Eucalyptus grandis*, cuja massa específica aparente era de 0,50 g/cm³ e 0,60 g/cm³, averiguaram que os melhores resultados ocorreram nas menores pressões, 0,4 MPa para pinus e 0,6 MPa para eucalipto.

Nascimento et al. (2002), testando três níveis de pressão diferentes, concluíram que houve um aumento na resistência ao cisalhamento até a pressão de 1,0 MPa; acima dessa pressão houve, queda na resistência.

Zangiácomo e Rocco Lahr (2002) testaram algumas madeiras tropicais alternativas para uso em madeira laminada colada: a envira preta (*Xylopiá sp*), o cambará (*Erismá uncinatum*), a castanheira (*Bertholetia excelsa*) e o cedrinho (*Erismá sp*), com dois adesivos (resorcinol e um adesivo à base de mamona) e puderam concluir pela conveniência de se

utilizar pressão de colagem 1,6 MPa na confecção dos corpos-de-prova para determinação da resistência das emendas à tração. Quando adotada a pressão de 0,8 MPa, os resultados foram inferiores. Observou-se que os dois adesivos conduziram a resultados de resistência bastante próximos ao da madeira maciça, com alguma vantagem para o adesivo à base de mamona.

2.6 Influência da temperatura nas propriedades mecânicas

A madeira, quando é submetida a uma situação de incêndio, queima e forma carvão. Tanto a madeira quanto o carvão, oriundo da combustão da primeira camada, são isolantes térmicos e retardam o fluxo de calor para o interior da seção, abrandando a velocidade da degradação térmica e retardando o avanço da frente de carbonização. Dessa forma, quando submetidos ao fogo, os elementos estruturais de madeira exibem em seus interiores, conforme ilustrado na Figura 2.5, após a camada carbonizada, uma estreita camada aquecida, cujas propriedades mecânicas são afetadas pelo calor e um núcleo inalterado (FIGUEROA e MORAES, 2009).

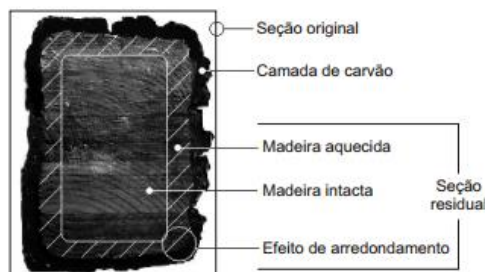


Figura 2.5 – Camadas de carbonização em uma seção de uma peça de madeira.

Fonte: Figueroa e Moraes (2009).

A combustão é a transformação térmica, em presença de oxigênio ou ar, em quantidade suficiente para promover sua decomposição completa por uma fonte externa de calor. Quando esta transformação não tem o aporte suficiente de oxigênio, ou o aporte é controlado, ocorre a carbonização, cujo resíduo sólido é o carvão.

As primeiras mudanças físico-químicas surgem a partir de 50°C (SCHAFFER, 1973). As reações exotérmicas iniciam-se entre 150°C e 160°C e aumentam com a elevação da temperatura. Acima de 200°C, esses fenômenos se refletem na perda acelerada de massa, a qual coincide com a redução da resistência mecânica da madeira decorrente do aumento da

temperatura (PONCSÁK et al., 2006). Os polímeros da madeira apresentam estabilidade térmica diferenciada em função da rede cristalina de cada um.

A degradação térmica da hemicelulose ocorre entre 160°C e 260°C (FENGEL; WEGENER, 1984; SCHNIEWIND, 1985), sendo o primeiro carboidrato da madeira a se degradar, por sua estrutura heterogênea, pela natureza não cristalina de sua estrutura e por seu baixo peso molecular em relação aos outros polímeros da madeira. Durante a degradação térmica da hemicelulose, a cristalinidade da celulose aumenta temporariamente e, segundo Kotilainen (2000) e Mangalam (2005), não há geração de gases combustíveis.

A degradação térmica da celulose ocorre a temperaturas entre 200°C e 280°C, com uma degradação progressiva que inclui despolimerização e desidratação. Em temperaturas superiores a 280°C ocorre uma rápida volatilização dos componentes químicos. Também foi observado que, quando a celulose é tratada termicamente, o teor de umidade retarda a sua degradação térmica (ROFFAEL; SCHALLER, 1971).

Schniewind (1985) afirma que lignina é termicamente mais resistente que os demais carboidratos que compõem a madeira. Sua degradação térmica está situada entre 225°C e 450°C, com a presença de reações exotérmicas. Em torno de 200°C, segundo o mesmo autor, ocorrem reações de desidratação. Entre 150°C e 300°C, ocorre o rompimento das ligações de carbono e, em torno de 300°C, as ligações laterais alifáticas começam a romper fora do anel aromático. A degradação desses polímeros se reflete em perda de massa. Para taxa de aquecimento lenta e atmosfera inerte, a maior perda de massa da celulose ocorre entre 300°C e 400°C, a da hemicelulose entre 250°C e 350°C e a da lignina entre 250°C e 450°C (ALÉ et al., 2002). Até 600°C, a perda de massa alcança mais de 80%, 95% e 60% para a celulose, a hemicelulose e a lignina, respectivamente.

Durante a combustão, há perda de resistência. Almeida e Sanches (1998), ao estudar a madeira de ipê, jatobá e pinus (3,00 cm × 3,00 cm × 9,00 cm), notaram que, em temperaturas superiores a 300°C, a resistência da madeira sofre redução significativa pela carbonização, precedida de considerável aumento da resistência à compressão no intervalo de temperatura de 100°C a 170°C. Vital et al. (1989), estudando amostra de *E. saligna* com dimensões de 2,00 cm × 2,00 cm × 30,00 cm, em combinação de diferentes temperaturas 105°C, 130°C e 155°C, com diferentes tempos de aquecimento 10 h, 20 h, 30 h, 40 h, 80 h e 160 h, observaram aumento das propriedades de resistência da madeira nos períodos iniciais de exposição. Contudo a combinação do aumento da temperatura e do tempo de exposição

ocasionou a redução da resistência a temperaturas superiores a 130°C, em que o efeito se mostrou linear, e a 155°C, em que o efeito se mostrou quadrático.

No Brasil, no entanto o uso da madeira ainda é restrito pelo preconceito que a madeira pega fogo fácil, enquanto outros países da Europa e América do Norte dominam esse tipo de construção. O desconhecimento e a falta de estudos podem justificar esse fato.

2.7 Análise não destrutivas por propagação de ondas

Segundo a ABENDE (2002), os ensaios não destrutivos são aqueles realizados em materiais, para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, por meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior.

Os métodos mais usuais utilizam-se de ultrassom, radiografia, ondas, análise de vibrações, emissão acústica, entre outros. Na área de pesquisas, as avaliações não destrutivas, utilizando vibrações e ultrassom, são empregadas para a determinação das propriedades físicas e mecânicas de materiais. Para alguns materiais, como os metais e ligas metálicas, essa técnica tem sido bastante usada, uma vez que pode detectar defeitos e descontinuidade nesses materiais. No caso da madeira, como esses problemas são característicos do material, os ensaios não destrutivos são usados, quase sempre, para verificar como essas ocorrências afetam as suas características físicas e mecânicas.

As primeiras pesquisas relativas à aplicação de ensaios não destrutivos, na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira, foram realizadas na década de 1950, nos Estados Unidos. Ainda que detenham a primazia de conhecimentos nessa área específica, alguns países como Suíça, Romênia, Alemanha, Japão e Reino Unido, entre outros, também já se destacam nesse cenário. Embora seja grande a variedade de técnicas não destrutivas para avaliação da madeira, algumas delas, citadas por Ross e Pellerin (1994), têm sido objeto de maior investigação e uso por parte dos institutos de pesquisa. Como exemplos, podem-se citar:

- Técnica da flexão estática - consiste na medição estática do módulo de elasticidade na flexão de um exemplar de madeira, sendo o princípio básico de funcionamento da máquina de classificação da madeira serrada. MSR – *Machine Stress Rating*.

- Técnica da vibração transversal (*transverse vibration technique or resonance technique*) – consiste na análise da vibração de um exemplar de madeira, com obtenção do módulo de elasticidade do material a partir da análise das frequências principais de vibração.

- Técnica das ondas de tensão (*stress wave method*) – consiste na aplicação de uma onda de tensão (impacto) no material e análise do fenômeno de propagação desse estímulo. A velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material são os principais parâmetros analisados nesses casos.

- Técnica da propagação de ondas de ultrassom – diversos institutos de pesquisa têm voltado suas atenções para as técnicas de ondas acústicas (*Acoustic emission – AE*) e ultrassônicas (*Acousto-ultrasonic emission – AU*), que se têm mostrado eficientes para determinados propósitos, como, por exemplo, a avaliação da orientação da grã da madeira.

- Técnica da Excitação por impulso – o método de excitação por impulso, o corpo de prova sofre um impacto de curta duração e responde com vibrações em suas frequências naturais de vibração, de acordo com as condições de contorno impostas, com a vibração captada é possível determinar alguns parâmetros elásticos do material em estudo.

2.8 Ponderações a respeito do referencial

Diante do exposto no referencial e os trabalhos apresentados na Tabela 2.1, foi possível estabelecer a fronteira do conhecimento:

- 1) Com relação ao uso de madeiras de altas densidades (folhosas) as pesquisas são recentes e com espécies de reflorestamento. Quanto ao tema CLT, no Brasil as pesquisas estão em fase inicial e as publicações se baseiam em revisões dos trabalhos internacionais, são raras as de caracterização e definição de propriedades.
- 2) Não se encontraram trabalhos que utilizem dormentes descartados para a fabricação de madeira laminada colada cruzada. No Brasil principalmente há poucas pesquisas que estudam a reutilização dos dormentes, no caso, um estudo se baseou na fabricação de MLC e outro na produção de energia elétrica.
- 3) A pressão de colagem ideal em CLT, oriunda de dormentes reutilizados, não foi assunto de pesquisas nacionais e internacionais. Observa-se no Brasil pesquisa para colagem de MLC e no exterior pesquisas no uso de adesivos e sua colagem na fabricação de CLT com coníferas.

- 4) Nenhuma publicação a respeito do comportamento elástico da CLT considerando a ortotropia do material, isto é, a definição da matriz de flexibilidade. Até mesmo para a madeira maciça há poucos trabalhos que conseguem definir a matriz e a tendência dos mais atuais é a comprovação de um método não destrutivo para predizer tais valores. Ampliando para as pesquisas internacionais ainda são poucos os trabalhos com a definição completa de todos os parâmetros elásticos da CLT.
- 5) Não há informações do comportamento do material, feito a partir de dormentes, em altas temperaturas. Há trabalhos analisando o comportamento em incêndio da CLT tradicional e o fluxo de calor.
- 6) As principais pesquisas focam em sustentabilidade, instalação, custos, ligações e métodos numéricos. Assim, a utilização de outras espécies de madeiras para a fabricação de CLT ainda é recente.

Tabela 2.1 – Pesquisas relacionadas ao tema.

Atributo	Estudo	Autoria
Desempenho ambiental e sustentabilidade	- CLT has the capacity to store carbon in large quantities over a long period of time, offering the opportunity to turn buildings into ‘carbon sinks’.	Lehmann (2012)
	- CLT panels can be reused which further lowers the environmental footprint of the buildings.	FPInnovations (2013)
	- The use of CLT allows for a reduction of the use of fossil fuel during manufacturing of the panels.	FPInnovations (2013)
	- CLT buildings have less than a half the amount of embodied CO ₂ compared to concrete or steel.	Hammond; Jones (2008)
	- Heavy Timber offers negative net total GWP when compared with concrete or steel.	John et al. (2009)
	- CLT buildings have a lower operational energy demand.	Chen (2012)
	- CLT building offer lower environmental impact and allow to save 18% of non-renewable energy, compared to concrete buildings.	Robertson et al. (2012)
Simplicidade de instalação e competitividade de custos	- Concealed metal plates provide a good performance under fire situations.	FPInnovations (2013)
	- CLT buildings allow for greater construction simplicity than a traditional wood-frame solution, due to having fewer but larger elements.	Waugh (2010)
	- Construction per floor could take up to 4 days, compared to 21 days if concrete was used.	WoodWorks (2013)
	- CLT shifts the design from “frame” to “plates”.	Kirkegaard (2012)
	-CLT enables the reduction of construction time up to 30%, which significantly reduces the costs associated with on-site labor.	Silva et al. (2013)

Desempenho estrutural	- Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: Testing, properties, design and recommendations for harmonizing design provisions for structural timber products.	Brandner (2018)
	- Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of southern yellow pine cross laminated timbers	Sharifnia; Hindman (2017)
	- The combination of CLT and concrete could allow designers to have buildings as high as 150m tal.	Van de Kuilen et al. (2011)
	- Each CLT element constitutes a stable structure by itself that is able to resist forces in two directions.	Popovski et al. (2010)
	- Shear strength and stiffness in CLT was identified as key issues in the performance of CLT.	FPInnovations (2013)
	- Cross-laminated nature of CLT allows panels to perform well as load-bearing plates and shear panels.	Steiger; Gülzow (2010)
	- CLT represents a viable alternative to steel and concrete for mid and high-rise building construction.	Fountain (2012)
Flexibilidade de design	- Stiffness properties of CLT panels depend on the homogenization of the individual layers;	Steiger et al. (2008)
	- 9-inch-thick CLT panels allow to cover spans up 25 feet, similar to those covered by concrete slabs.	Malczyk (2011)
	- Wall-structures working as deep beams, and columns can be used to cover long spans without intermediate supports.	Silva et al. (2013)
	- Application of European design principles to cross laminated timber.	Fink et al. (2018)
Desempenho em incêndio	- Tightness between panels can prevent smoke and fire to spread, limiting the damage to specific areas.	Frangi et al. (2009)
	- CLT wall samples tested lasted more than hundred 80 min before collapsing.	AWC (2012)
	- Fire resistance of unprotected cross-laminated timber floor panels: Parametric study and simplified design	Menis et al. (2018)
	- The structural capacity of laminated timber compression elements in fire: A meta-analysis	Wiesner; Bisby (2018)
Desempenho sísmicos	- CLT structures showed no permanent deformation after being tested in an earthquake simulator.	Popovski; Karacabeyli (2012)
	- CLT systems offer strength and ductility, which helps the panels perform well under seismic forces.	Winter et al. (2010)
	- Fastening systems help dissipate the seismic energy.	Hristovski et al. (2012)
	- Connection layout and design has a strong	Pei et al. (2012)

	<p>influence on the overall behavior of the structure.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Seismic behaviour of Cross-Laminated Timber structures: A state-of-the-art review 	Izzi et al. (2018)
	<ul style="list-style-type: none"> - A 7-inch-thick CLT panel would have an R-value of approximately 8 ft²°F hr/Btu. 	Jowett (2011)
Comportamento térmico	<ul style="list-style-type: none"> - CLT offers the possibility of creating a tight construction with less air leakage, thus improving the thermal performance of the building. 	Skogstad et al. (2011)
	<ul style="list-style-type: none"> - The massive nature of CLT offers a good amount of thermal inertia, essential in energy eficiente building construction. 	Cambiaso; Pietrasanta (2014)
	<ul style="list-style-type: none"> - Cross laminated timber (CLT): Design approaches for dowel-type fasteners and connections. 	Ringhofer et al. (2018)
Conexões	<ul style="list-style-type: none"> - Bonding quality of industrially produced cross-laminated timber (CLT) as determined in delamination tests 	Knorz et al. (2017)
	<ul style="list-style-type: none"> - Mechanical characterization of a pre-fabricated connection system for cross laminated timber structures in seismic regions. 	Polastri et al. (2017)
	<ul style="list-style-type: none"> - Effects of surface treatment and adhesives on bond performance and mechanical properties of cross-laminated timber (CLT) made from small diameter Eucalyptus timber 	Lu et al. (2018)
CLT de folhosas	<ul style="list-style-type: none"> - Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers 	Liao et al. (2017)
	<ul style="list-style-type: none"> - A madeira laminada cruzada: aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento 	Amorim et al. (2017)
CLT no Brasil	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema construtivo em madeira laminada colada cruzada ou cross laminated timber (CLT): análise da viabilidade técnica da madeira com baixo valor agregado. 	Alencar (2015)
	<ul style="list-style-type: none"> - Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de madeira laminada colada cruzada 	Pereira (2014)
	<ul style="list-style-type: none"> - Viabilidade técnica do uso de madeira de <i>Pinus taeda</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> na fabricação de painéis CLT – cross laminated timber. 	Lessa (2017)
	<ul style="list-style-type: none"> - Cross laminated timber: diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no Estado de São Paulo 	Passarelli (2013)
	<ul style="list-style-type: none"> - Painéis de madeira laminada colada cruzada para lajes: avaliação experimental mecânica sob diferentes níveis de consumo de adesivo. 	Ecker et al. (2017)
	<ul style="list-style-type: none"> - Cross laminated timber (CLT): uma tecnologia construtiva viável no Brasil? 	Silva et al. (2016)
Matriz de elasticidade da madeira no Brasil	<ul style="list-style-type: none"> - Considerações a respeito da anisotropia na madeira 	Mascia (1991)
	<ul style="list-style-type: none"> - Metodologia para determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom 	Trinca (2011)
	<ul style="list-style-type: none"> - Estimativas das constantes elásticas da madeira 	Gonzalez et al. (2001)

	por meio de ondas ultrassônicas (ultrassom).	
	- Um estudo sobre a variação numérica do coeficiente de Poisson na madeira, considerando a anisotropia do material.	Furlani (1995)
	- Caracterização elástica da Madeira de <i>Eucalyptus citriodora</i>	Ballarin; Nogueira (2003)
	- Determinação de parâmetros elásticos e de resistência e a influência da madeira nas propriedades de compensados de <i>Pinus ellioHii Engelm.</i> e <i>Pinus taeda L.</i>	Palma (1994)
	- Propriedades de resistência e de rigidez da madeira obtidas a partir da avaliação acústica na árvore.	Pedroso (2014)
	- Determinação das constantes elásticas da madeira considerando sua ortotropia.	Alves (2017)
Aproveitamen to de dormentes	- Reaproveitamento de dormentes de madeira da estrada de ferro Carajás para a cogeração de energia elétrica	Damasceno et al. (2017)
	- Avaliação experimental do comportamento mecânico de dormentes reciclados de madeira visando redução do impacto ambiental	Passos (2006)

3.

ANÁLISE TEÓRICA

3.1 Matriz de flexibilidade da madeira

Para estudar a rigidez da madeira, segundo Bodig e Jayne (1993), é necessário obter as relações tensão-deformação, para diferentes tipos de carga, tais como: tensão uniaxial, compressão uniaxial e cisalhamento. Como se encontra num regime elástico linear, obtêm-se as relações tensão-deformação uniaxiais pela Lei de Hooke. Nesta equação, as tensões são diretamente proporcionais às deformações e as constantes de proporcionalidade formam a matriz de flexibilidade da madeira. Esta equação é conhecida como equação constitutiva do material.

Segundo Bodig e Jayne (1993), o comportamento mecânico e elástico, no plano de materiais ortotrópico, é caracterizado pelo módulo de rigidez ou módulo de Young, efeito de Poisson e módulo de cisalhamento. O módulo de elasticidade (E) é a proporção das tensões aplicadas e deformação. Quanto maior esse módulo maior a tensão necessária para o mesmo grau de deformação, portanto mais rígido é o material. O efeito de Poisson é a função que relaciona a deformação transversal e a deformação longitudinal. A deformação na direção da força é denominada deformação ativa, enquanto a que ocorre na direção normal da força é chamada deformação passiva. O módulo de cisalhamento é obtido, quando um conjunto de forças tangenciais, de mesmo módulo e sentidos diferentes, são aplicados no plano do material, fazendo com que uma camada do material deslize sobre outra de modo a produzir um deslizamento no material.

3.2 Aspectos teóricos da matriz de flexibilidade

O desenvolvimento dos itens e as deduções dos equacionamentos a seguir foram baseados nas teses de Lekhnitskii (1981), Mascia (1991), Trinca (2011) e Alves (2017), partiu-se dos tensores de 4ª ordem já simplificados para os tensores de 2ª ordem, que representam melhor a metodologia que foi utilizada na presente tese.

3.2.1 Componentes de tensão

A princípio, considerando um elemento tridimensional (eixos x, y, z ou 1, 2, 3), Figura 3.1, sujeito a um estado de tensões, em cada face o elemento estará sujeito a três componentes de tensão σ_{ij} onde o primeiro subscrito indica a superfície onde a tensão atua e o segundo a direção da componente de tensão. Exemplo: σ_{zx} = tensão atuando no plano Z e na direção X.

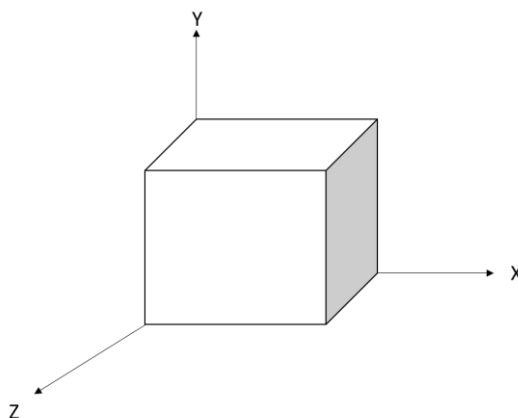


Figura 3.1 – Elemento tridimensional e eixos de orientações.

Quando as componentes apresentam índices iguais (σ_{ii}) representam as tensões normais e quando estes índices são diferentes (σ_{ij}) representam as tensões de cisalhamento. As tensões normais agem perpendicularmente ao plano e as de cisalhamento agem tangente à superfície.

Assim, considerando o elemento tridimensional seria possível a existência de 18 componentes (6 faces com 3 componentes cada). Apesar disso, apenas 9 componentes são independentes uma vez as tensões normais que atuam em planos paralelos têm que ser iguais

(reduzindo 3) e as tensões de cisalhamento que atuam em planos perpendiculares também serão iguais (reduzindo 6) para que o elemento esteja em equilíbrio.

Dessa forma a matriz de tensões de um elemento pode ser escrita como descrito na Equação 1, note que os elementos da diagonal dessa matriz representam as tensões normais e os elementos fora da diagonal as tensões de cisalhamento.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2.2 Componentes de deformação

A deformação específica é definida como sendo a relação entre a variação do comprimento (comprimento final subtraído do comprimento original) pelo comprimento original. De forma simplificada, se um elemento de dimensões pequenas (δ_{xi}) sofre uma deformação também pequena na direção i (δ_{ui}) essa deformação é dada pela Equação 2. Para $i = 1, 2$ e 3 que representam as três deformações normais.

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\delta_{ui}}{\delta_{xi}} \quad (2)$$

Da mesma forma esse elemento também pode sofrer distorção quando se consideram seus planos sob a ação de tensões de cisalhamento. A deformação tangencial do elemento no plano é descrita por meio de seus ângulos de distorção. No caso, por exemplo, dos planos 1 e 2, têm-se: $\tan \alpha_1 = \frac{\Delta_{u1}}{\Delta_{x2}}$ e $\tan \alpha_2 = \frac{\Delta_{u2}}{\Delta_{x1}}$, para as deformações pequenas os ângulos em radianos são: $\alpha_1 = \frac{\Delta_{u1}}{\Delta_{x2}}$ e $\alpha_2 = \frac{\Delta_{u2}}{\Delta_{x1}}$. A deformação de cisalhamento total do elemento no plano 1-2 (γ_{12}) é dada pela soma dos dois ângulos de distorção de forma que a Equação 3.

$$\gamma_{12} = \frac{\Delta_{u1}}{\Delta_{x2}} + \frac{\Delta_{u2}}{\Delta_{x1}} \quad (3)$$

Com o mesmo raciocínio nos demais planos 1-3 e 2-3 se determinam as 3 distorções que somadas às três deformações constituem o estado de deformação do elemento: γ_{11} , γ_{12} ,

$\gamma_{33}, \gamma_{23}, \gamma_{13}, \gamma_{12}$. Esses elementos são, normalmente, suficientes para descrever completamente a distorção de um elemento de volume. Se as deformações não forem muito grandes esses componentes podem ser determinados com precisão necessária para a maioria das aplicações. Para grandes deformações as formulações matemáticas são mais complexas. No entanto, para pequenos deslocamentos a matriz das componentes de deformação pode ser escrita de forma simplificada, conforme Equação 4.

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta u_1}{\Delta x_1} & \frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} & \frac{\Delta u_1}{\Delta x_3} \\ \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1} & \frac{\Delta u_2}{\Delta x_2} & \frac{\Delta u_2}{\Delta x_3} \\ \frac{\Delta u_3}{\Delta x_1} & \frac{\Delta u_3}{\Delta x_2} & \frac{\Delta u_3}{\Delta x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Considerando que $\delta_{ij} \neq \delta_{ji}$, a matriz de deformações não é simétrica como a matriz de tensões. Porém, essa pode ser decomposta em duas outras, a matriz simétrica e a antissimétrica, tomando-se metade da soma e metade da diferença dos elementos de posições idênticas em lados opostos em relação à diagonal, Equação 5.

$$[\delta_{ij}] = \frac{1}{2}([\delta_{ij}] + [\delta_{ji}]) + \frac{1}{2}([\delta_{ij}] - [\delta_{ji}]) \quad (5)$$

A primeira parte da equação é a matriz de deformação (ε) que é simétrica e a segunda parte é a matriz de rotação (ω) que é antissimétrica. Na maior parte das aplicações apenas a matriz de deformações é utilizada, uma vez que a matriz de rotação não tem efeito direto na relação tensão \times deformação. A matriz de deformações pode ser escrita de acordo com a Equação 6.

$$\varepsilon = \frac{1}{2}([\delta_{ij}] + [\delta_{ji}]) \quad (6)$$

Ou, conforme Equação 7:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta u_1}{\Delta x_1} & \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} + \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_1}{\Delta x_3} + \frac{\Delta u_3}{\Delta x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_2}{\Delta x_1} + \frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} \right) & \frac{\Delta u_2}{\Delta x_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_2}{\Delta x_3} + \frac{\Delta u_3}{\Delta x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_3}{\Delta x_1} + \frac{\Delta u_1}{\Delta x_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_3}{\Delta x_2} + \frac{\Delta u_2}{\Delta x_3} \right) & \frac{\Delta u_3}{\Delta x_3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sendo que a deformação de cisalhamento total é dada por: $\gamma_{12} = \frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} + \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1}$, tem-se: $\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} + \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1} \right) = \varepsilon_{12}$ e $\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_2}{\Delta x_1} + \frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} \right) = \varepsilon_{21}$, como essa matriz é simétrica têm-se que: $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} = \frac{1}{2} \gamma_{ij} = \frac{1}{2} \gamma_{ji}$.

3.2.3 Parâmetros elásticos dos materiais

A descrição completa das relações entre tensões e deformações dos materiais pode necessitar de muitos parâmetros independentes, em função da organização dos elementos que o constitui. O fato de que a maior parte dos materiais apresenta alguma organização ajuda simplificar as relações entre tensão e deformação.

As propriedades elásticas dos sólidos podem ser definidas por meio da generalização da Lei de Hooke, Equação 8.

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad (8)$$

Na qual: σ_{kl} = componentes de tensão, incluindo as normais e de cisalhamento, ε_{ij} = componentes de deformação, incluindo as normais e de cisalhamento e i, j, k, l são as coordenadas que podem assumir valores de 1 a 3 e S_{ijkl} = a matriz de flexibilidade que pode ser obtida por métodos estáticos. Já utilizando a simplificação dos índices a lei de Hooke pode ser escrita conforme a Equação 9.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

A matriz de flexibilidade é a inversa da matriz de rigidez e vice-versa, ou seja $[C]^{-1} = [S]$ ou $[S]^{-1} = [C]$. A redução da matriz $[S]$, com 36 elementos, para 21 elementos independentes é mais fácil de ser explicada do que para a matriz $[C]$ e, por isso, essa explicação será feita de maneira resumida.

Suponha-se um experimento no qual as tensões sejam aplicadas uma a uma em um elemento de pequeno volume. A cada vez que a tensão é aplicada haverá deformações específicas, as quais serão função linear dessa tensão. A soma total de todas as deformações é a lei de Hooke e a matriz obtida dessa forma é a de flexibilidade. A matriz de rigidez poderia ser obtida da mesma forma, mas, do ponto de vista prático, isso não é possível porque as deformações não podem ser aplicadas de forma independente, por causa do coeficiente de Poisson que induz deformações normais e tangenciais ao mesmo tempo.

Considere-se, por exemplo, um bloco com eixos de simetria em x, y e z denominados aqui 1, 2 e 3. A aplicação da tensão σ_1 de forma isolada produzirá três deformações normais ε_1 , ε_2 , ε_3 . A ocorrência das deformações ε_2 , ε_3 é decorrente do coeficiente de Poisson. Os coeficientes da relação linear serão os termos S_{11} , S_{21} e S_{31} . Assim: $\varepsilon_1 = S_{11} \cdot \sigma_1$, $\varepsilon_2 = S_{21} \cdot \sigma_1$ e $\varepsilon_3 = S_{31} \cdot \sigma_1$. Se a tensão σ_1 for removida e então se aplicar σ_2 de forma isolada as deformações serão dadas por: $\varepsilon_1 = S_{12} \cdot \sigma_2$, $\varepsilon_2 = S_{22} \cdot \sigma_2$ e $\varepsilon_3 = S_{32} \cdot \sigma_2$. Agora por vez aplicando somente σ_3 , tem-se: $\varepsilon_1 = S_{13} \cdot \sigma_3$, $\varepsilon_2 = S_{23} \cdot \sigma_3$ e $\varepsilon_3 = S_{33} \cdot \sigma_3$.

Organizando os termos pelo princípio da superposição, a deformação total produzida pela aplicação de todas as tensões normais será a soma das contribuições individuais, obtém-se as Equações 10, 11 e 12.

$$\varepsilon_1 = S_{11} \cdot \sigma_1 + S_{12} \cdot \sigma_2 + S_{13} \cdot \sigma_3 \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = S_{21} \cdot \sigma_1 + S_{22} \cdot \sigma_2 + S_{23} \cdot \sigma_3 \quad (11)$$

$$\varepsilon_3 = S_{31} \cdot \sigma_1 + S_{32} \cdot \sigma_2 + S_{33} \cdot \sigma_3 \quad (12)$$

Tendo em vista que a aplicação de tensões normais produz deformações em direção ortogonal de sinal contrário, alguns dos coeficientes deverão ser negativos, ou seja, algumas deformações serão de alongamento e outras de redução nas dimensões.

Para as tensões de cisalhamento apenas ocorrerão deformações de cisalhamento, de forma que para uma tensão de cisalhamento aplicada no plano 2-3 (representado pelo índice

4): $\varepsilon_{23} = S_{44} \cdot \sigma_{23}$, para o plano 1-3 (representado pelo índice 5): $\varepsilon_{13} = S_{55} \cdot \sigma_{13}$ e para o plano 1-2 (representado pelo índice 6): $\varepsilon_{12} = S_{66} \cdot \sigma_{12}$.

Como no caso dos outros termos da matriz de flexibilidade S_{44} , S_{55} e S_{66} são os termos da correlação linear entre deformação e tensão. Assim, pode-se concluir que aplicações de tensões de cisalhamento em um meio ortotrópico resultam em apenas uma deformação de cisalhamento, a qual é restrita ao plano de aplicação. Tensões normais não produzem deformações de cisalhamento e tensões de cisalhamento não produzem deformações normais nem deformações de cisalhamento fora do plano de aplicação. Dessa forma, a matriz de flexibilidade para um material com comportamento ortotrópico, como a madeira, se resume a 12 elementos, pois os demais serão nulos. Essa simplificação da matriz só ocorre se a simetria e os eixos geométricos forem coincidentes, obtendo-se as novas matrizes, conforme a Equação 13.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Considerando o conceito da energia de deformação, a matriz pode ainda ser mais simplificada. A energia de deformação armazenada por um material é uma quantidade única e independente da sequência de aplicação de tensões no corpo. Se uma tensão σ_1 é aplicada em um corpo a deformação será dada por $\varepsilon_1 = S_{11} \cdot \sigma_1$ e a energia de deformação armazenada é a área sob o gráfico tensão deformação. Já o trabalho por unidade de volume, ou energia de deformação é dado pela Equação 14.

$$\omega_1 = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1 \quad (14)$$

Substituindo na Equação 14 a expressão acima citada para a deformação tem-se a Equação 15

$$\omega_1 = \frac{1}{2} S_{11} \sigma_1^2 \quad (15)$$

Se agora σ_2 for aplicado no mesmo elemento enquanto σ_1 continua também sendo aplicado, a energia de deformação será dada pela Equação 16.

$$\omega_2 = \frac{1}{2}\sigma_2\varepsilon_2 + \sigma_1\varepsilon_1 \quad (16)$$

O primeiro termo é a área abaixo do diagrama tensão \times deformação como no caso anterior. Como a tensão σ_1 continua sendo aplicada, uma quantidade adicional de energia é armazenada pelo elemento. Substituindo as deformações $\varepsilon_1 = S_{12}\cdot\sigma_2$ e $\varepsilon_2 = S_{22}\cdot\sigma_2$ na equação da energia, Equação 16, obtém-se a Equação 17.

$$\omega_2 = \frac{1}{2}S_{22}\sigma_2^2 + S_{12}\sigma_1\sigma_2 \quad (17)$$

A soma de ω_1 com ω_2 resulta na energia total armazenada pelo elemento, Equação 18.

$$\omega_{12} = \frac{1}{2}S_{11}\sigma_1^2 + \frac{1}{2}S_{22}\sigma_2^2 + S_{12}\sigma_1\sigma_2 \quad (18)$$

As duas tensões são agora removidas e aplicadas na ordem inversa, ou seja, primeiro σ_2 e depois σ_1 . A aplicação de σ_2 resulta na deformação γ_2 dada pela por $\gamma_2 = S_{22}\cdot\sigma_2$. Portanto, a energia armazenada é dada pela Equação 19.

$$\omega_3 = \frac{1}{2}S_{22}\sigma_2^2 \quad (19)$$

Se σ_1 for aplicada novamente a energia adicional armazenada no material será dada pela Equação 20.

$$\omega_4 = \frac{1}{2}S_{11}\sigma_1^2 + S_{21}\sigma_1\sigma_2 \quad (20)$$

A soma da energia total armazenada nessa sequência de aplicação de tensão será pela Equação 21.

$$\omega_{34} = \frac{1}{2}S_{11}\sigma_1^2 + \frac{1}{2}S_{22}\sigma_2^2 + S_{21}\sigma_1\sigma_2 \quad (21)$$

Tendo em mente que energia armazenada em um material precisa ser uma quantidade única, independente da sequência de aplicação da tensão, tem-se que $\omega_{12} = \omega_{34}$, portanto, substituindo as Equações 18 e 21 nessa igualdade, encontra-se a Equação 22.

$$\frac{1}{2}S_{11}\sigma_1^2 + \frac{1}{2}S_{22}\sigma_2^2 + S_{12}\sigma_1\sigma_2 = \frac{1}{2}S_{11}\sigma_1^2 + \frac{1}{2}S_{22}\sigma_2^2 + S_{21}\sigma_1\sigma_2 \quad (22)$$

Concluindo que S_{12} é igual a S_{21} , realizando-se a mesma análise com as tensões σ_1 e σ_3 , σ_2 e σ_3 , obtém-se de maneira similar que: $S_{13} = S_{31}$, $S_{23} = S_{32}$ e logo, $S_{ij} = S_{ji}$. Como resultado dessa simetria se conclui que a matriz dos materiais ortotrópicos é composta por 9 elementos independentes, desde que a geometria e os eixos ortotrópicos sejam coincidentes. A matriz de flexibilidade pode então ser escrita pela Equação 23.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (23)$$

A matriz de flexibilidade está relacionada com os parâmetros de engenharia. No caso dos materiais ortotrópicos haverá três relações entre tensão normal e deformação e três relações entre tensões e deformações tangenciais considerando os três eixos de simetria. Cada uma dessas relações é obtida com a aplicação de uma tensão única durante a qual a deformação é medida. Assim, cada módulo será dado pela tangente do diagrama tensão \times deformação que será: $\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = E_1$, $\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = E_2$, $\frac{\sigma_3}{\varepsilon_3} = E_3$, $\frac{\sigma_{12}}{\varepsilon_{12}} = G_{12}$, $\frac{\sigma_{13}}{\varepsilon_{13}} = G_{13}$ e $\frac{\sigma_{23}}{\varepsilon_{23}} = G_{23}$.

Nessas equações E_1 , E_2 e E_3 são denominados módulos de elasticidade longitudinais ou módulos de Young e G_{12} , G_{13} e G_{23} são denominados módulos de cisalhamento ou módulos de elasticidades transversais. Comparando as equações acima com as equações: $\varepsilon_1 = S_{11} \cdot \sigma_1$, $\varepsilon_2 = S_{22} \cdot \sigma_2$, $\varepsilon_3 = S_{33} \cdot \sigma_3$, $\varepsilon_{23} = S_{44} \cdot \sigma_{23}$, $\varepsilon_{13} = S_{55} \cdot \sigma_{13}$ e $\varepsilon_{12} = S_{66} \cdot \sigma_{12}$, encontram-se as seguintes relações: $\frac{1}{S_{11}} = E_1$, $\frac{1}{S_{22}} = E_2$, $\frac{1}{S_{33}} = E_3$, $\frac{1}{S_{44}} = G_{23}$, $\frac{1}{S_{55}} = G_{13}$ e $\frac{1}{S_{66}} = G_{12}$. Em síntese, os módulos elásticos são a recíproca dos coeficientes da diagonal da matriz de flexibilidade.

Por definição o coeficiente de Poisson (ν_{ij}) é a relação entre a deformação passiva (ϵ_j) e a deformação ativa (ϵ_i), Equação 24. Materiais isotrópicos são caracterizados por um único coeficiente de Poisson, no entanto, materiais ortotrópicos, como a madeira, possuem 6 coeficientes de Poisson.

$$-\nu_{ij} = \frac{\epsilon_j}{\epsilon_i} \quad (24)$$

Com aplicação de uma tensão σ_1 são produzidas três deformações, uma no eixo de aplicação e as outras nos outros dois eixos, de acordo com as expressões: $\epsilon_1 = S_{11} \cdot \sigma_1$, $\epsilon_2 = S_{21} \cdot \sigma_1$ e $\epsilon_3 = S_{31} \cdot \sigma_1$, que a seguir foram substituídas na Equação 24 serão encontradas as Equações 25 e 26.

$$-\nu_{12} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{S_{21} \cdot \sigma_1}{S_{11} \cdot \sigma_1} = \frac{S_{21}}{S_{11}} \quad (25)$$

$$-\nu_{13} = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} = \frac{S_{31} \cdot \sigma_1}{S_{11} \cdot \sigma_1} = \frac{S_{31}}{S_{11}} \quad (26)$$

De maneira similar aplicando-se uma tensão σ_2 , tem-se as Equações 27 e 28.

$$-\nu_{21} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{S_{12}}{S_{22}} \quad (27)$$

$$-\nu_{23} = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} = \frac{S_{32}}{S_{22}} \quad (28)$$

Por fim, aplicando-se uma tensão σ_3 , obtém-se as Equações 29 e 30.

$$-\nu_{31} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_3} = \frac{S_{13}}{S_{33}} \quad (29)$$

$$-\nu_{32} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3} = \frac{S_{23}}{S_{33}} \quad (30)$$

Desta forma, os coeficientes de Poisson podem ser escritos em função dos termos da matriz de flexibilidade: $S_{12} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}$, $S_{13} = -\frac{\nu_{31}}{E_3}$, $S_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}$, $S_{23} = -\frac{\nu_{32}}{E_3}$, $S_{31} = -\frac{\nu_{13}}{E_1}$ e $S_{32} = -\frac{\nu_{23}}{E_2}$.

Utilizando todas as equações acima definidas e deduzidas a matriz de flexibilidade pode ser escrita conforme Equação 31.

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c}
 \varepsilon_1 & & \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{-\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 & \sigma_1 \\
 \varepsilon_2 & & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 & \sigma_2 \\
 \varepsilon_3 & = & \frac{\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 & \sigma_3 \\
 \varepsilon_{23} & & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 & \sigma_{23} \\
 \varepsilon_{13} & & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 & \sigma_{13} \\
 \varepsilon_{12} & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & \sigma_{12}
 \end{array} \quad * \quad (31)$$

2.3 Aspectos práticos para a determinação utilizando ensaio de compressão estática

A metodologia para a determinação da matriz de flexibilidade utilizando ensaio de compressão, abaixo proposta e adaptada, foi desenvolvida por Mascia (1991) e Furlani (1995) e mais recentemente utilizada por Trinca (2011) e Alves (2017). Para a obtenção de todos os termos da matriz de flexibilidade utilizando ensaio de compressão estática é necessária a utilização de três corpos de prova prismáticos retirados nos eixos de simetria, eixos denominados como: 3L (3 camadas de lâminas longitudinais e 2 normais), 2L (2 camadas de lâminas longitudinais e 3 normais) e N (todas camadas normais). Bem como, outros três corpos de prova prismáticos retirados em ângulo nos três planos de simetria elástica, sendo esse denominados: 3L,N; 3L,2L e 2L,N. A Figura 3.2(a) destaca os eixos de orientação e a Figura 3.2(b) a retirada de cada corpo de prova.

Os três corpos de prova retirados nos eixos principais (3L; 2L; N) permitem a obtenção dos três módulos de elasticidade longitudinais e dos seis coeficientes de Poisson, enquanto os três corpos de prova retirados nos eixos intermediários (3L,N; 3L,2L; 2L,N), em

ângulo, permitem a obtenção dos módulos de cisalhamento (G). A seguir são detalhados os procedimentos e cálculos para a determinação desses parâmetros utilizando cada corpo de prova.

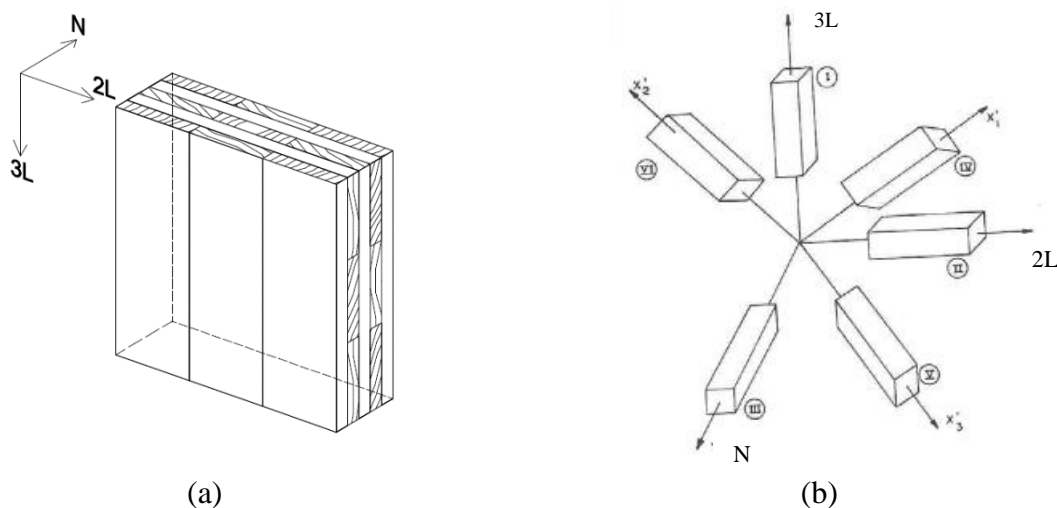


Figura 3.2. – (a) Eixos de orientação para os ensaios. (b) orientação dos 6 corpos de prova retirados.

Fonte: Adaptado de Mascia (1991).

2.3.1 Corpo de prova com 3 camadas longitudinais e 2 normais (3L)

Aplicando-se a solicitação na direção 3L obtêm-se a tensão na direção 3L (σ_{3L}) e é possível medir-se as deformações específicas, 3L (ε_{3L}), 2L (ε_{2L}) e N (ε_N). Assim, desse corpo de prova obtém o módulo de elasticidade na direção 3L (E_{3L}) e os coeficientes de Poisson $\nu_{3L,2L}$ e $\nu_{3L,N}$, utilizando-se as Equações 32, 33 e 34.

$$E_{3L} = \frac{\sigma_{3L}}{\varepsilon_{3L}} \quad (32)$$

$$\nu_{3L,2L} = \frac{\varepsilon_{2L}}{\varepsilon_{3L}} \quad (33)$$

$$\nu_{3L,N} = \frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_{3L}} \quad (34)$$

2.3.2 Corpo de prova com 2 camadas longitudinais e 3 normais (2L)

Aplicando-se a solicitação na direção 2L obtêm-se a tensão na direção 2L (σ_{2L}) e é possível medir-se as deformações específicas, 3L (ε_{3L}), 2L (ε_{2L}) e N (ε_N). Assim, desse corpo de prova obtém o módulo de elasticidade na direção 2L (E_{2L}) e os coeficientes de Poisson $\vartheta_{2L,3L}$ e $\vartheta_{2L,N}$, utilizando-se as Equações 35, 36 e 37.

$$E_{2L} = \frac{\sigma_{2L}}{\varepsilon_{2L}} \quad (35)$$

$$\vartheta_{2L,3L} = \frac{\varepsilon_{3L}}{\varepsilon_{2L}} \quad (36)$$

$$\vartheta_{2L,N} = \frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_{2L}} \quad (37)$$

2.3.3 Corpo de prova com todas as camadas normais (N)

Aplicando-se a solicitação na direção N obtêm-se a tensão na direção N (σ_N) e é possível medir-se as deformações específicas, 3L (ε_{3L}), 2L (ε_{2L}) e N (ε_N). Assim, desse corpo de prova obtém o módulo de elasticidade na direção N (E_N) e os coeficientes de Poisson $\vartheta_{N,3L}$ e $\vartheta_{N,2L}$, utilizando-se as Equações 38, 39 e 40.

$$E_N = \frac{\sigma_N}{\varepsilon_N} \quad (38)$$

$$\vartheta_{N,3L} = \frac{\varepsilon_{3L}}{\varepsilon_N} \quad (39)$$

$$\vartheta_{N,2L} = \frac{\varepsilon_{2L}}{\varepsilon_N} \quad (40)$$

2.3.4 Corpo de prova inclinado no plano 3L,2L

Para determinar o G no ensaio de compressão simples é necessário que o corpo de prova seja retirado com inclinação, de forma a existirem distorções, sem as quais não é possível a determinação do mesmo. Assim, considerando um plano 3L,2L inclinado de α em relação à 3L, a deformação no plano inclinado é dada Equação 41.

$$\varepsilon'_{11} = \varepsilon_{11} \cdot \cos^2 \alpha + \varepsilon_{33} \cdot \sin^2 \alpha + \gamma_{13} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (41)$$

Onde ε'_{11} é a deformação na direção do plano inclinado; ε_{11} e ε_{33} são as deformações nas direções 3L e 2L e γ_{13} é deformação tangencial. De posse de ε'_{11} , ε_{11} e ε_{33} e o ângulo α pode-se determinar a única variável não conhecida da expressão γ_{13} . Com γ_{13} se determina deformação tangencial no plano inclinado (γ'_{13}) pela Equação 42.

$$\gamma'_{13} = 2. (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11}). \text{sen } \alpha. \text{cos } \alpha + \gamma_{13}. (\text{cos}^2 \alpha - \text{sen}^2 \alpha) \quad (42)$$

A tensão tangencial no plano inclinado é dada pela Equação 43 e o módulo de cisalhamento pela Equação 44.

$$\tau'_{13} = 2. (\sigma_{33} - \sigma_{11}). \text{sen } \alpha. \text{cos } \alpha + \tau_{13}. (\text{cos}^2 \alpha - \text{sen}^2 \alpha) \quad (43)$$

$$G'_{31} = \frac{\tau'_{13}}{\gamma'_{13}} \quad (44)$$

Os autores acima citados adotam $\alpha = 45^\circ$ e considerando um estado de compressão simples onde $\gamma_{13} = 0$, tem-se as Equações 45 e 46.

$$\varepsilon'_{11} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}}{2} \quad (45)$$

$$\gamma'_{13} = (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11}) \quad (46)$$

Ainda, utilizando-se as transformações de coordenadas, a tensão na direção inclinada, encontra-se a Equação 47.

$$\sigma'_{11} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \text{cos} 2\alpha + \tau_{13}. \text{sen} 2\alpha \quad (47)$$

Considerando o mesmo estado de compressão simples acima citado e $\alpha = 45^\circ$, tem-se que $\tau_{13} = 0$, $\sigma_3 = 0$ e $\text{cos } 2\alpha = 0$, reduzindo a Equação 47 para a 48 e a 44 para a 49.

$$\sigma'_{11} = \frac{\sigma_1}{2} \quad (48)$$

$$G'_{31} = \frac{\sigma_1}{2.(\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})} \quad (49)$$

Outra maneira para a determinação de G é a utilização das Equações 50 e 51, propostas por Mascia (1991). Conforme já demonstrado anteriormente, para $\alpha = 45^\circ$ e ensaio de compressão simples: $\sigma_\alpha = \frac{\sigma}{2}$. Considerando que os demais módulos elásticos e coeficientes de Poisson forem obtidos utilizando ensaios em corpos de prova retirado nos eixos de simetria o único valor desconhecido da equação é o $G_{3L,2L}$.

$$\frac{1}{G_{3L,2L}} = \frac{1}{E_\alpha(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} - \frac{\cos^4\alpha}{E_{2L}(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_{3L}(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{3L,2L}}{E_{3L}} \quad (50)$$

$$E_\alpha = \frac{\sigma_\alpha}{\varepsilon_\alpha} \quad (51)$$

2.3.5 Corpo de prova inclinado no plano 3L,N

Agora para o plano 3L,N utilizando do mesmo equacionamento detalhado no item 2.3.4, o valor de $G_{3L,N}$ é dado pelas Equações 52 e 53.

$$G'_{21} = \frac{\sigma_1}{2(\varepsilon_{22} - \varepsilon_{11})} \quad (52)$$

$$\frac{1}{G_{3L,N}} = \frac{1}{E_\alpha(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} - \frac{\cos^4\alpha}{E_N(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_{3L}(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{3L,N}}{E_{3L}} \quad (53)$$

2.3.6 Corpo de prova inclinado no plano 2L,N

Por fim para o plano 2L,N, o valor de $G_{2L,N}$ é dado pelas Equações 54 e 55.

$$G'_{23} = \frac{\sigma_3}{2(\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})} \quad (54)$$

$$\frac{1}{G_{2L,N}} = \frac{1}{E_\alpha(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} - \frac{\cos^4\alpha}{E_N(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_{2L}(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{2L,N}}{E_{2L}} \quad (55)$$

4.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, estão apresentados os materiais e os métodos empregados no trabalho. Os destrutivos e não destrutivos foram realizados no Centro de Pesquisa Avançado da Madeira e Novos Materiais (CPAM³), a caracterização física no Laboratório de Caracterização Física da Madeira (LACAF) e a montagem das placas de CLT foi feita no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), todos na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

4.1 Dormentes e desdobro

Foram obtidos sete dormentes descartados na região metropolitana de Belo Horizonte – MG – em revendedores que os adquiriram em empresas administradoras das linhas férreas. Em decorrência do tratamento preservativo e estado de degradação dos dormentes, a identificação das espécies não foi possível, preocupou-se em trabalhar com madeiras densas e em uma metodologia que poderia ser aplicada a qualquer espécie incluída nessa classificação. Assim, não houve preocupação em identificar as espécies, tornando as placas uma composição de várias espécies, placa heterogênea, que são as mesmas utilizadas em dormentes em qualquer parte do País.

Segundo Passos (2006), os dormentes são classificados, de acordo com o nível de degradação em mourão, sucata e lenha. Foram utilizados os dormentes do tipo mourão, Figura 4.1(a), com a finalidade de aumentar o rendimento de cada peça além de ser mais fácil a aquisição no mercado. Os sete dormentes foram desdobrados em 168 tábuas, Figura 4.1(b), com 10 cm de largura, espessura de 2 cm e comprimento de 50 cm. Cabe salientar que não foi

possível avaliar o rendimento do desdobro pela grande quantidade de pinos metálicos ainda presentes, que serviam para unir o trilho ao dormente e a ausência de equipamentos adequados. Do total de tábuas, 17 amostras foram destinadas para a determinação do teor de umidade e as demais passaram por processos de classificação visual e não destrutivos.



Figura 4.1 – Material utilizado na pesquisa. (a) Dormentes tipo mourão e (b) Tábuas oriundas do desdobro.

4.2 Determinação da umidade e densidade aparente

Os teores de umidade das 17 amostras e a densidade aparente das 151 amostras foram determinados no Laboratório de Caracterização Física da Madeira (LACAF) – UFMG. Todos os aparelhos, balanças e estufas foram calibrados por órgão competente, segundo as recomendações do Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

Inicialmente as amostras de umidade foram pesadas, para a determinação da massa inicial, em seguida, levadas à estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até massas constantes e novamente pesadas, sendo determinada a massa seca. Com a massa inicial e a massa seca, foi determinado o teor de umidade. Já as amostras de densidade foram pesadas e as dimensões mensuradas para o cálculo do volume. Com a relação da massa inicial e do volume, obteve-se a densidade aparente. Os procedimentos e cálculos de umidade e da densidade aparente foram feitos, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997) e utilizando as Equações 56 e 57.

$$U_{\%} = \frac{m_u - m_s}{m_s} \quad (56)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (57)$$

Em que:

- $U_{\%}$: umidade da amostra (%).
- m_u : massa úmida (g).
- m_s : massa seca (g).
- ρ : densidade aparente (g.cm^{-3}).
- m : massa da amostra (g).
- V : volume da amostra (cm^3), $V = \text{largura} \times \text{espessura} \times \text{comprimento}$.

4.3 Classificação inicial das lâminas

Com a finalidade de fazer uma pré-seleção das tábuas (lâminas), utilizadas na confecção das placas de CLT, quatro procedimentos de classificação foram empregados:

4.3.1 Classificação visual

Após o desdobro dos dormentes e a retirada da camada degradada, observaram-se alguns defeitos oriundos dos pinos utilizados para unir o trilho e rachaduras. As lâminas foram classificadas em cinco classes, de acordo com o tipo e número de defeitos. Na Tabela 4.1, estão as classes, tipo de defeitos, exemplos e total de amostras por classe.






A importância dessa classificação se faz, ao correlacionar essas descontinuidades ou defeitos com as classificações a seguir, pois podem intervir na passagem das ondas ultrassônicas e/ou nas ondas de excitação ou representar pontos críticos no ensaio de flexão

4.3.2 Classificação por ondas ultrassônicas

Para a propagação de ondas ultrassônicas, o aparelho utilizado foi FAKOPP Ultrasonic Timer, com transdutor de 150 kHz. A NBR 15521 (ABNT, 2007) estabelece que, para

frequências entre 101 a 200 kHz, o comprimento mínimo da amostra seja 12 cm e como as amostras em questão possuíam 50 cm, justificou-se o uso de tal transdutor no ensaio.

Tabela 4.1 – Classificação visual das lâminas.

Classe	Tipo de defeito	Exemplo	Total de amostras
A	Ausente		37
B	1 furo		62
C	2 furos		11
D	3 furos		8
E	Rachaduras		33

Para as medições, os transdutores foram posicionados nas extremidades (propagação longitudinal), em três pontos da seção transversal, Figura 4.2, de acordo com a NBR 15521 (ABNT, 2007).

O equipamento forneceu o tempo de propagação das ondas de ultrassom, a velocidade na lâmina, na direção longitudinal (V_{LL}), foi determinada utilizando-se a Equação 58:

$$V_{LL} = \frac{L}{t} \times 10^6 \quad (58)$$

Em que:

- V_{LL} : velocidade de propagação da onda em uma determinada direção (m.s^{-1}).
- L : comprimento de percurso da onda (m).
- t : tempo de propagação da onda em uma determinada direção (μs).

Com as velocidades de propagação das ondas (V_{LL}) e a densidade aparente (ρ), determinou-se a constante elástica (CE), por meio da Equação 59:

$$CE = \rho \times V_{LL}^2 \times 10^{-6} \quad (59)$$

Em que:

- CE: Constante elástica (MPa).
- ρ : densidade aparente da peça (kg.m^{-3}).
- V_{LL} : velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal (m.s^{-1}).



Figura 4.2 – Equipamento de ultrassom.

4.3.3 Classificação por ondas de excitação

Para realizar o ensaio de vibração natural, por meio de ondas de excitação, foi utilizado o aparelho *Sonelastic Stand Alone* da ATCP Engenharia, desenvolvido no Brasil. O equipamento é composto pelo suporte, pulsador, microfone e software. Cada amostra foi posicionada no suporte e, em seguida, o pulsador de impacto foi acionado gerando vibração

em uma das extremidades. O microfone pedestal foi posicionado, na extremidade oposta ao pulsador, para captar a resposta acústica e a transformou em sinal elétrico para medir a frequência. As amostras foram caracterizadas quanto aos modos de vibração flexional e torcional.

As amostras foram marcadas com traços distantes $0,224L$ de cada extremidade e L representa o comprimento. Estas posições corresponderam às linhas nodais das amostras, referentes ao modo de vibração flexional e torcional para as geometrias de barras retangulares. A função do suporte foi de sustentar as amostras, apoiando-as nas linhas nodais, de tal forma que ficasse livre para vibrar, ao receber o impulso mecânico de excitação, independentemente do modo de vibração que se desejava excitar. O que se alterou para cada modo de vibração foi a posição do pulsador (excitação) e do microfone (captação da resposta); esse procedimento foi proposto por Otani e Pereira (2013).

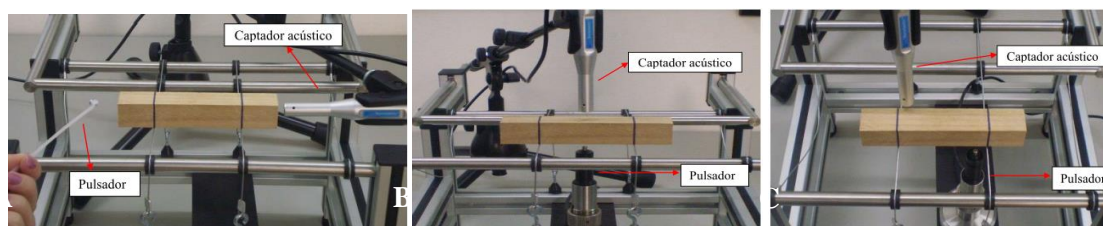


Figura 4.3- Posicionamento adequado das amostras para a obtenção das constantes elásticas. (a) Para a obtenção do modo longitudinal. (b) Para a obtenção do modo flexional e (c) Para a obtenção do modo torcional.

Na Figura 4.3, é possível ver o posicionamento adequado das amostras para a obtenção dos modos; Figura 4.3(a), para a obtenção do modo longitudinal; o impulso deve ser aplicado na face de uma das extremidades da amostra e o sinal captado na face oposta. Já para o modo flexional, Figura 4.3(b), o impulso e a captação do sinal devem ser realizados no centro da amostra. Para a obtenção do modo torcional, o impulso deve ser aplicado em uma região lateral da amostra, próximo de sua aresta. A captação deve ser feita em uma região oposta, também próxima à aresta, Figura 4.3(c).

Para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico (E_{din}), foi utilizada a frequência de vibração na flexional (ff) em seu cálculo. De acordo com Alves (2017), a equação simplificada, Equação 60 é obtida pelas equações presentes na ASTM

E1876 (2006); cabe salientar que esta equação e norma foram desenvolvidas, para materiais isotrópicos que, no entanto, se aplicam para madeira.

$$E_{din} = 0,9464 \times \left(\frac{m \times f_f}{w} \right) \times \left(\frac{l^3}{t'^3} \right) \times T_1 \quad (60)$$

Em que:

- E_{din} : módulo de elasticidade dinâmico (MPa).
- m : massa da amostra (g).
- l : comprimento da amostra (mm).
- t' : espessura da amostra (mm).
- w : largura da amostra (mm).
- f_f : frequência de ressonância fundamental da amostra (Hertz).
- T_1 : fator de correção para o modo de flexão fundamental para espessura finita, fornecido pelo equipamento.

4.3.4 Ensaio de flexão no regime elástico

Por último, as amostras foram submetidas ao ensaio de flexão, em uma prensa da marca EMIC, modelo 30 kN. Aplicou-se uma carga máxima de 2000 N, calculada, a fim de manter o regime elástico, não ocasionando sua ruptura nem deformações permanentes nas amostras.

A máquina possuía apoios em três pontos simetricamente espaçados, sendo um no centro e um em cada extremidade da amostra. A carga de 2000N foi aplicada no ponto central, conforme a Figura 4.4. Ao atingir a carga máxima definida, automaticamente a prensa interrompeu o processo. Para mensurar as deformações, foi acoplado junto a máquina de ensaio um deflectômetro da marca EMIC, com dupla configuração de sensores independentes.

De acordo com a ASTM D198-08 (2008), o ensaio em peças estruturais pode ser realizado com aplicação de carga no centro desde que a seção transversal e o vão não sejam muito grandes. O indicado, para que neste tipo de ensaio (carga centrada) não se tenha influência do cisalhamento, o vão livre mínimo da viga deverá ser pelo menos 15 vezes a sua altura. No mesmo item, a referida norma especifica que o ensaio com carga centrada não deve ser realizado, se a largura da peça a ser ensaiada for maior que 4 polegadas (10,16 cm).

Considerando a seção de 2 cm x 10 cm e comprimento de 50 cm adotado para as lâminas, o ensaio com carga centrada pôde ser realizado sem prejuízo para os resultados, pois se utilizou a relação entre o comprimento e altura (L/h) de 25 superior aos 21 exigidos.



Figura 4.4 – Ensaio de Flexão “semi” destrutivo.

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga \times deslocamento no meio do vão, Figura 4.5, definida pelos pontos ($F_{10\%}$; $v_{10\%}$) e ($F_{50\%}$; $v_{50\%}$) correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da carga máxima e dos seus deslocamentos (flecha). A Equação 61 foi usada para cálculo do módulo de elasticidade:

$$E = \frac{(F_{50\%} - F_{10\%}) \times L_f^3}{(v_{50\%} - v_{10\%}) \times 4 \times b \times h^3} \quad (61)$$

Em que:

- E: módulo de elasticidade na flexão (MPa).
- $F_{50\%}$: carga referente a 50% da carga máxima aplicada (N).
- $F_{10\%}$: carga referente a 10% da carga máxima aplicada (N).
- $v_{50\%}$: deslocamentos no meio do vão correspondentes a carga de 50% (m).
- $v_{10\%}$: deslocamentos no meio do vão correspondentes a carga de 10% (m).
- L_f : comprimento do vão (m).
- b: base da seção transversal (m).
- h: altura da seção transversal (m).

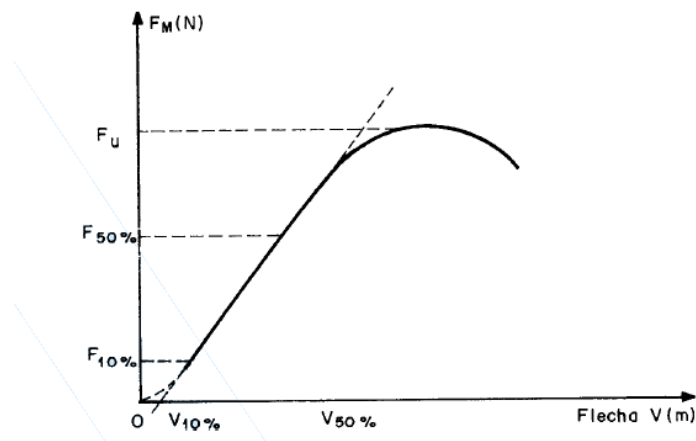


Figura 4.5 – Diagrama: Carga \times Flecha na flexão.

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997).

4.4 Colagem

4.4.1 Adesivo

O adesivo estrutural utilizado na colagem foi o CASCOPHEN RS-216-M, uma resina sintética, à base de Resorcinol-Formol, o CASCOPHEN RS-216-M (líquido) foi usado em conjunto com o preparado Endurecedor FM-60-M (em pó). De acordo com Carrasco (1989), na colagem de vigas laminadas, utilizam-se gramaturas de 300 a 500 g/m² de mistura por linha de cola, nesta pesquisa foi adotada a gramatura de 400 g/cm². As gramaturas mais altas são normalmente utilizadas nas colagens de madeiras menos densas, como os dormentes são feitos com madeiras de alta densidade, foi escolhida uma gramatura intermediária aos valores extremos. A proporção foi de 20% de pó e 80% da parte líquida, após o contato do aderente com a madeira, o conjunto permaneceu sobre pressão por 24 horas, tempo de cura previsto pelo fabricante.

4.4.2 Pressão de colagem

A pressão é fator importante na colagem de peças de madeira por ser determinante na resistência da linha de cola. Assim, a finalidade deste item foi avaliar a influência na resistência da linha de cola com a variação da pressão aplicada na colagem.

Como não foi possível a identificação da espécie predominante pelo aspecto visual, a pressão máxima de colagem foi determinada aleatoriamente e definindo um intervalo ideal de análise. A princípio foram determinados quatro valores de pressão: 0 MPa, 5 MPa, 7,5 MPa e 10 MPa. Na primeira verificação, mostrou-se que todos os intervalos de pressão diminuíram a resistência da linha de cola quando comparada às amostras sem pressão. Posteriormente foram definidos novos intervalos de pressão: 1 MPa; 1,5 MPa; 2 MPa; 2,5 MPa; 3 MPa; 3,5 MPa e 3,75 MPa, próximo ao valor ideal encontrado por Carrasco (1989).

Os corpos de prova (CP), para o ensaio da linha de cola, foram retirados das amostras iniciais já pré-classificadas. Cada CP ou junta de colagem era composta por duas porções de madeira com dimensões de 5 cm de largura, 5 cm de comprimento e 2,5 cm de espessura, Figura 4.6, conforme estabelecido pela NBR 7190 (ABNT, 1997). Foram coladas seis juntas para cada pressão, cabendo salientar que as porções foram coladas, ortogonalmente, assim como as camadas das placas de CLT.



Figura 4.6 – Amostras antes da colagem.

Após a colagem e pressão por 24 horas, tempo ideal para a cura do adesivo, as juntas foram reservadas por 14 dias e ensaiadas. O ensaio realizado foi o cisalhamento na linha de cola, na máquina universal EMIC 300 kN, equipada com um dispositivo próprio para cisalhamento e deslocamento, conforme Figura 4.7. O carregamento aplicado, nos ensaios de cisalhamento, foi monotônico crescente com uma taxa de 2,5 MPa/min, conforme prescrição da NBR 7190 (ABNT, 1997). De posse da pressão adequada de colagem, passou-se para o passo seguinte, a montagem das placas de CLT.



Figura 4.7 – Suporte e ensaio de cisalhamento da linha de cola.

4.5 Montagem da Placa de CLT

Classificadas as lâminas e definida a pressão ideal de colagem, foi feita a montagem de cinco placas de CLT, cada uma com 10 cm de altura, 30 cm de comprimento e 30 cm largura. Cabe salientar que a quantidade de placas foi definida em função da disponibilidade do adesivo doado pela empresa importadora. Para a confecção de cada placa, foram necessárias 15 tábuas, totalizando 75 tábuas, organizadas da seguinte forma, Tabela 4.2. A distribuição das tábuas foi organizada, deixando-as com maior elasticidade nas extremidades e valores menores no interior, conforme proposto por Carrasco (1989).

Cada placa possuía quatro camadas de adesivos com gramatura de 400 g/m² com face dupla, consumindo 288 g de adesivo, com um desperdício de 15% totalizando 332 g/placa e 1656 g para todo o projeto, o adesivo foi misturado até ficar homogêneo e em seguida foi aplicado com o auxílio de espátulas nas faces.

A prensagem foi feita em uma prensa hidráulica, com pressão máxima de 200 toneladas, sistema hidráulico e acionamento manual com ponteiro de arraste, adaptada com placas metálicas para distribuir uniformemente a pressão, Figura 4.8(c), com duração de 24 horas e após 7 dias foram retiradas as imperfeições nas dimensões. As etapas de montagem foram: (i) Pesagem e mistura do adesivo, Figura 4.8(a) e (b). (ii) Espalhamento do adesivo sobre as lâminas, Figura 4.8(d). (iii) Prensagem, Figura 4.8(e). (iv) Retira da placa da fôrma, Figura 4.8(f). (v) Regularização das dimensões.

Tabela 4.2 – Organização das camadas nas placas de acordo com módulo de elasticidade.

Placa	Camada	Tábua 1	Tábua 2	Tábua 3	Média
A	1	17165,82*	15271,70	16080,85	16172,79
	2	14986,32	14079,33	14466,11	14510,59
	3	13792,81	13153,99	12914,17	13286,99
	4	14649,64	14319,11	14486,09	14484,95
	5	16530,95	15452,00	15819,73	15934,23
Média					14877,91
B	1	17669,19	15163,87	16206,83	16346,63
	2	15097,36	13914,26	14389,97	14467,20
	3	13852,87	13426,15	12665,68	13314,90
	4	14714,72	14140,33	14591,37	14482,14
	5	16836,22	15371,62	15662,29	15956,71
Média					14913,52
C	1	16934,49	15342,65	15952,96	16076,70
	2	14859,65	14128,98	14472,37	14487,00
	3	13504,86	13059,56	13040,28	13201,57
	4	14623,21	14378,73	14478,69	14493,54
	5	16283,68	15503,36	15888,21	15891,75
Média					14830,11
D	1	17325,30	15223,33	16082,98	16210,54
	2	15010,17	14044,94	14461,56	14505,56
	3	13839,20	13304,22	12813,17	13318,86
	4	14667,14	14247,16	14547,15	14487,15
	5	16760,53	15402,46	15728,29	15963,76
Média					14897,17
E	1	17443,47	15185,14	16181,01	16269,87
	2	15031,94	13964,86	14442,34	14479,71
	3	13841,80	13343,95	12805,41	13330,39
	4	14710,32	14235,27	14550,23	14498,61
	5	16794,00	15390,50	15700,59	15961,70
Média					14908,06

*módulo de elasticidade em MPa.

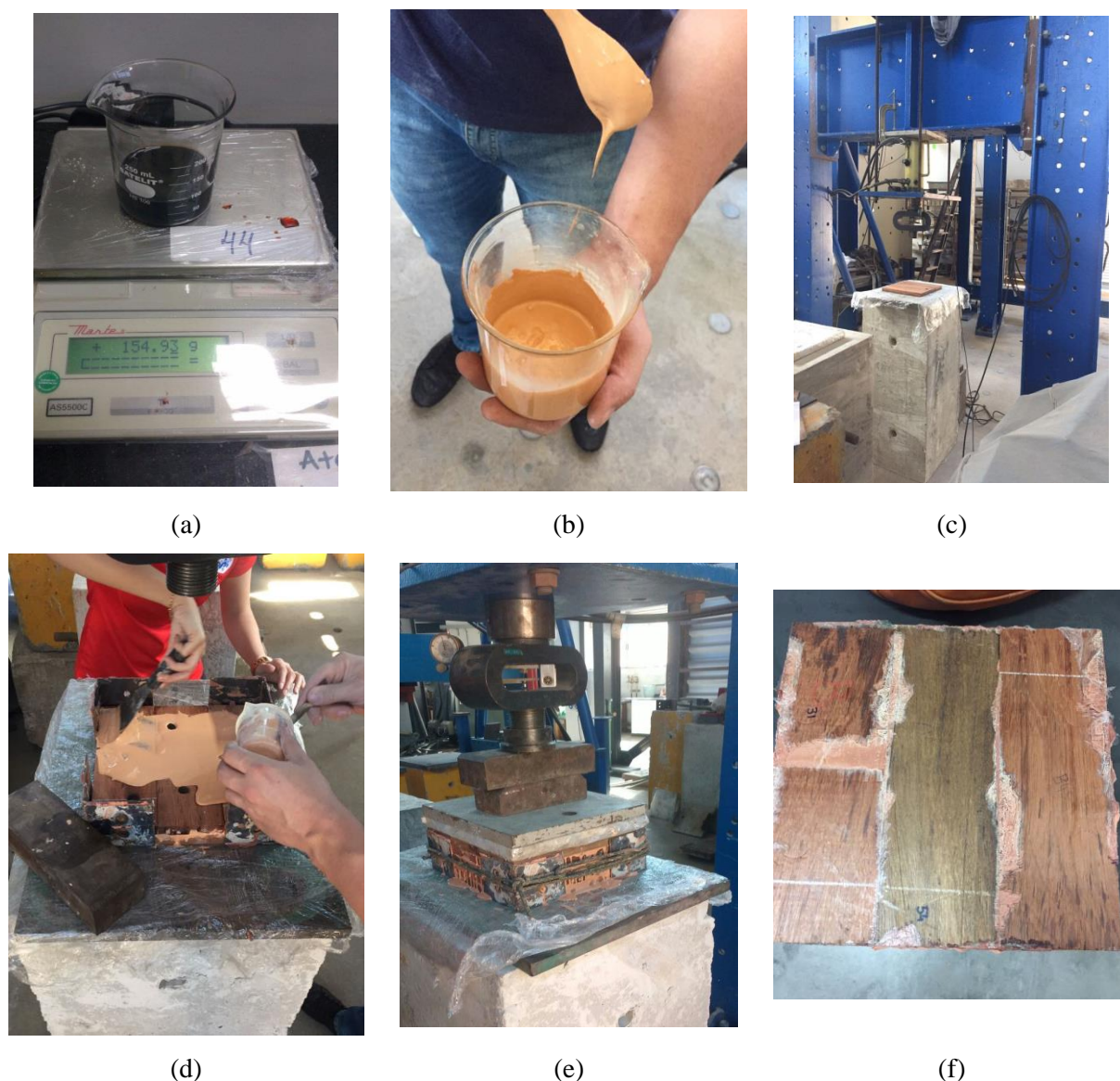


Figura 4.8 – Etapas de montagem das placas de CLT. (a) Pesagem dos adesivos. (b) Mistura do adesivo. (c) Equipamento de prensagem. (d) Espalhamento do adesivo sobre as lâminas. (e) Prensagem e (f) Retirada da placa da fôrma.

4.6 Ensaio de compressão nas placas

Primeiramente cabe salientar que foram considerados os eixos de orientação: eixo 3L três camadas de tábuas com as fibras longitudinais e duas normais, eixo 2L duas camadas de tábuas com as fibras longitudinais e três normais e eixo N todas as camadas normais.

Após regularização das dimensões das placas de CLT, foram colados extensômetros em suas faces para mensurar as deformações durante o ensaio de compressão. Nas faces

laterais, foram colados extensômetros de 8 cm (1 em cada face), Figura 4.9 (a), já nas faces principais de 12 cm (2 por face), Figura 4.9 (b). O esquema na Tabela 4.3 mostra a disposição aos pares dos extensômetros em toda a placa, os quais foram soldados a fios e ligados a um sistema de aquisição de dados (SAD), por ligação um quarto (1/4) de ponte.

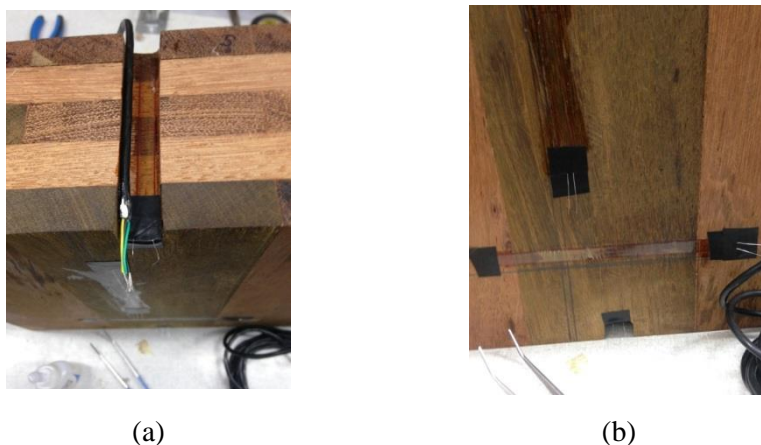


Figura 4.9 – Disposição dos extensômetros nas faces (a) Face lateral com extensômetro de 8 cm e (b) Face principal com extensômetros de 12 cm.

Ligada ao SAD, também, estava uma célula de carga, desenvolvida pelo autor com uma barra metálica e quatro extensômetros ligados por ponte completa de *Wheatstone* para suportar uma carga máxima de 500 kN, Figura 4.10. A célula de carga foi previamente calibrada e o ensaio de compressão foi realizado, em uma máquina universal EMIC, com capacidade de 3000 kN, seguindo prescrições da NBR 7190 (ABNT, 1997).



Figura 4.10 – Célula de carga desenvolvida para o ensaio nas placas.

O ensaio foi realizado em dois sentidos em cada placa: o primeiro com três camadas de tábuas com as fibras longitudinais ao esforço (3L) e o segundo com duas camadas com as fibras longitudinais ao esforço (2L). Todo o ensaio foi monitorado pelo Programa de Aquisição de Sinais AqDados 7.02 e os sinais tratados pelo Programa de Análise de Sinais AqDAnalysis 7. Os valores obtidos no ensaio foram de tensão e deslocamento dos extensômetros, estes valores foram tratados no programa EXCEL, para a obtenção das constantes desejadas. Utilizando os 8 extensômetros, a partir do deslocamento medido, foi feita a determinação das deformações em todas as direções.

Tabela 4.3 – Orientação das placas, disposição dos extensômetros e equações utilizadas.

Tipo de Ensaio	Deformações	Constantes elásticas	Condições de contorno
<p data-bbox="379 913 453 943">I – 3L</p>	$\varepsilon_{3L} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ $\varepsilon_{2L} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_4}{2}$ $\varepsilon_N = \frac{\varepsilon_7 + \varepsilon_8}{2}$	$E_{3L} = \frac{\sigma_{3L}}{\varepsilon_{3L}}$ $v_{3L,N} = \frac{-\varepsilon_N}{\varepsilon_{3L}}$ $v_{3L,2L} = \frac{-\varepsilon_{2L}}{\varepsilon_{3L}}$	$\sigma_{3L} \neq 0$ $\sigma_{2L} = 0$ $\sigma_N = 0$
<p data-bbox="379 1368 453 1397">II – 2L</p>	$\varepsilon_{2L} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_4}{2}$ $\varepsilon_{3L} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ $\varepsilon_N = \frac{\varepsilon_5 + \varepsilon_6}{2}$	$E_{2L} = \frac{\sigma_{2L}}{\varepsilon_{2L}}$ $v_{2L,3L} = \frac{-\varepsilon_{3L}}{\varepsilon_{2L}}$ $v_{2L,N} = \frac{-\varepsilon_N}{\varepsilon_{2L}}$	$\sigma_{3L} = 0$ $\sigma_{2L} \neq 0$ $\sigma_N = 0$

Durante o ensaio a força foi distribuída de maneira uniforme na face superior da placa por uma chapa metálica e também apoiou-se a face inferior da placa sobre outra chapa, o atrito da placa com as chapas foi responsável em impedir a movimentação na horizontal e o

desenvolvimento de tensões no eixos contrários a aplicação do esforço e o uso de uma rótula antes da célula de carga impediu a rotação (tensões devido ao momento fletor).

Algumas propriedades elásticas foram determinadas com esses dois ensaios; para a as demais, foram retiradas seis amostras orientadas convenientemente, a partir do desdobro da placa. Na Tabela 4.3, são mostradas as duas orientações e as propriedades elásticas obtidas a partir de cada um dos ensaios. Com os resultados de ensaio, com a aplicação das fórmulas apresentadas no Capítulo 3 e com a utilização de regressões lineares, foi possível determinar as propriedades elásticas.

4.7 Ensaio de compressão nas amostras menores

As cinco placas foram desdobradas, cada uma, em seis amostras para a determinação das demais propriedades elásticas. Os ensaios seguiram os procedimentos do item 4.6, a variação foi no uso de medidor de deslocamento (MD) em vez de extensômetros. O medidor e a metodologia foram propostos e desenvolvidos por Alves (2017). O MD era composto por uma tira de aço em forma de arco, Figura 4.11(a), na qual foram colados quatro extensômetros elétricos de resistência, sendo dois na parte superior e outros dois na parte inferior ligados em ponte completa. Foram utilizados seis MD's que foram ligados ao SAD e previamente calibrados pelo dispositivo na Figura 4.11(c).

Previamente foram coladas cantoneiras metálicas aos pares nas faces das amostras, Figura 4.11(b), um ímã com grande força de atração foi utilizado para unir a extremidade do MD à cantoneira. O ensaio de compressão foi realizado em uma máquina universal EMIC, DL 30000 com capacidade de 300 kN, a Figura 4.12 mostra o ensaio e todo o sistema montado, a determinação das deformações específicas foi feita aplicando-se a Equação 62:

$$\varepsilon_i = \frac{M_i}{L_i} \quad (62)$$

Em que:

- ε_i : deformação específica.
- M_i : medida do deslocamento do MDi.
- L_i : distância inicial entre as cantoneiras de fixação do MDi.
- i : número do MD ($i= 1, \dots, 6$).

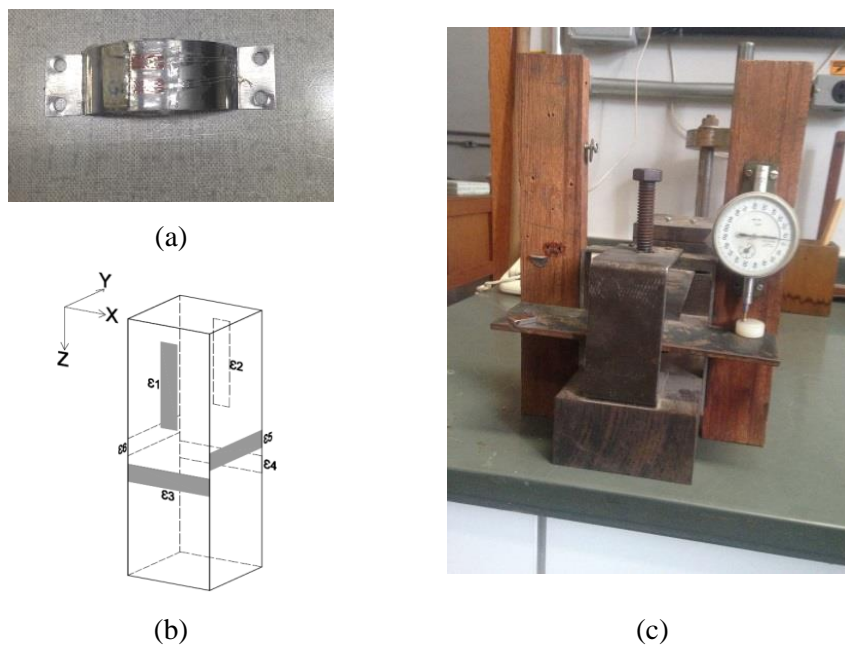





Figura 4.11 – (a) Medidor de deslocamento. (b) Distribuição dos MD's na amostra e (c) Dispositivo para calibração do MD.



Figura 4.12 – Ensaio de compressão nas amostras menores.

Todas as propriedades elásticas foram determinadas com os seis tipos de amostras orientadas convenientemente. A determinação dos módulos de deformação transversal foi possível a partir das formulações expostas no Capítulo 3.

Tabela 4.4 – Amostras orientadas de acordo com os eixos, deformações e propriedades elásticas.

Tipo de Amostra	Deformações	Constantes elásticas
I – 3L		$\varepsilon_{3L} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ $\varepsilon_{2L} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_4}{2}$ $\varepsilon_N = \frac{\varepsilon_5 + \varepsilon_6}{4}$ $E_{3L} = \frac{\sigma_{3L}}{\varepsilon_{3L}}$ $\nu_{3L,N} = \frac{-\varepsilon_N}{\varepsilon_{3L}}$ $\nu_{3L,2L} = \frac{-\varepsilon_{2L}}{\varepsilon_{3L}}$ $G'_{3L,N} = \frac{\sigma_{3L,2L}}{2 \times (\varepsilon_N - \varepsilon_{3L,2L})}$ $\rightarrow G_{3L,N}$ $G'_{3L,2L} = \frac{\sigma_{3L,2L}}{2 \times (\varepsilon_* - \varepsilon_{3L,2L})}$ $\rightarrow G_{3L,2L}$
II – 2L		$\varepsilon_{2L} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ $\varepsilon_{3L} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_4}{2}$ $\varepsilon_N = \frac{\varepsilon_5 + \varepsilon_6}{4}$ $E_{2L} = \frac{\sigma_{2L}}{\varepsilon_{2L}}$ $\nu_{2L,3L} = \frac{-\varepsilon_{3L}}{\varepsilon_{2L}}$ $\nu_{2L,N} = \frac{-\varepsilon_N}{\varepsilon_{2L}}$ $G'_{2L,N} = \frac{\sigma_N}{2 \times (\varepsilon_N - \varepsilon_{2L})}$ $\rightarrow G_{2L,N}$
III – N		$\varepsilon_N = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ $\varepsilon_{2L} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_4}{2}$ $\varepsilon_{3L} = \frac{\varepsilon_5 + \varepsilon_6}{2}$ $G'_{3L,2L} = \frac{\sigma_{3L,2L}}{2 \times (\varepsilon_* - \varepsilon_{3L,2L})}$ $\rightarrow G_{3L,2L}$

IV – 3L,N



$$\varepsilon_{3L,N}^{45} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$$

$$E_{3L,N}^{\infty} = \frac{\sigma_{3L,N}^{45}}{\varepsilon_{3L,N}^{45}}$$

$$G_{3L,N}$$

V – 2L,N



$$\varepsilon_{2L,N}^{45} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$$

$$E_{2L,N}^{\infty} = \frac{\sigma_{2L,N}^{45}}{\varepsilon_{2L,N}^{45}}$$

$$G_{2L,N}$$

VI – 3L,2L



$$\varepsilon_{3L,2L}^{45} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$$

$$E_{3L,2L}^{\infty} = \frac{\sigma_{3L,2L}^{45}}{\varepsilon_{3L,2L}^{45}}$$

$$G_{3L,2L}$$

Na Tabela 4.4, foram mostradas as orientações e as propriedades elásticas obtidas com os resultados dos ensaios, a aplicação das fórmulas apresentadas e a utilização de regressões lineares. Cabe reforçar que as amostras I e II foram réplicas do ensaio nas placas e que foi estabelecido que a tensão era atuante apenas no eixo de aplicação e nulas nos demais.

4.8 Propagação de ondas de excitação nas amostras

Os procedimentos de ensaio são os mesmos descritos anteriormente no item 4.3.3, no entanto, além do módulo de elasticidade longitudinal, também, foi determinado o módulo de elasticidade transversal de todas as amostras descritas na Tabela 4.4. Nas Figuras 4.13 e 4.14, estão mostrados os esquemas de ensaio para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal e transversal, respectivamente.

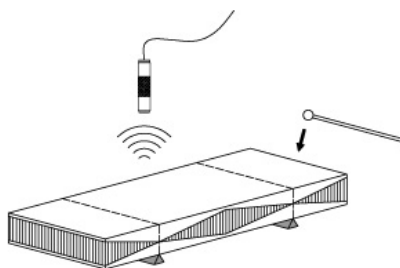


Figura 4.13 – Esquema de ensaio para determinar o módulo de elasticidade longitudinal.

Fonte: IMCE (2015).

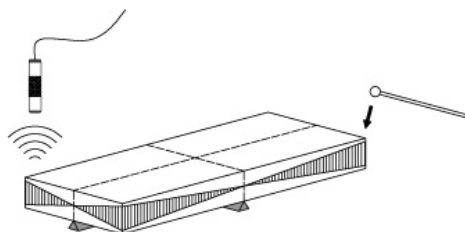


Figura 4.14 – Esquema de ensaio para determinar o módulo de elasticidade transversal.

Fonte: IMCE (2015).

A determinação do módulo de elasticidade transversal (G) foi feita pela frequência de vibração na torção, utilizando a massa e as dimensões das amostras, inseridas na Equação 63. As normas utilizadas foram ASTM E1876, ISO 12680-1, ENV 843-2 (IMCE, 2015) e ressalta-se que as normas, desenvolvidas para materiais isotrópicos e como ainda não há normatizações para materiais anisotrópicos, são empregadas na madeira.

$$G = \left(\frac{4 \times l \times m \times f_t^2}{w \times t} \right) \times (r) \quad (63)$$

Sendo:

$$r = \left[\frac{1 + \left(\frac{bw}{t}\right)^2}{4 - \frac{2,521 \cdot t}{b} \cdot \left(1 - \frac{1,991}{e \cdot \frac{w}{t} + 1}\right)} \right] \cdot \left(1 + \frac{0,00851 \cdot n^2 \cdot w^2}{l^2}\right) - 0,06 \cdot \left(\frac{n \cdot w}{l}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{w}{t} - 1\right)^2 \quad (64)$$

Em que:

- G: Módulo de elasticidade transversal (MPa).
- f_t : frequência na torção (Hertz).
- m: massa da amostra (g).
- l: comprimento da amostra (mm).
- t: espessura da amostra (mm).
- w: largura da amostra (mm).
- r: fator adimensional dependente da relação entre a largura, altura e comprimento da amostra e o número de linhas nodais.
- n: número de linhas nodais.

4.9 Ensaio em altas temperaturas

O software e o princípio de aquisição de dados utilizados foram os mesmos da propagação de ondas de excitação; a diferença consistiu na amostra que ficou apoiada em fios de platina e um perfil metálico em um forno durante todo o ensaio, Figura 4.15. As frequências foram excitadas, por meio de um pulsador, seguido da captação da resposta acústica por um sensor, em função do aumento da temperatura. O forno utilizado foi desenvolvido pela empresa criadora do sonelastic e suas características são: caracterizações até 1200 °C em atmosfera controlada, adequado para barras de secção retangular, empregando o modo de vibração flexional, apoio com fios de platina para temperaturas de até 850°C e com elementos de alumina para até 1200°C.

Com a obtenção do espectro de frequências correspondente, aplicou-se um tratamento matemático ao sinal (OTANI e PEREIRA, 2013). A partir daí, foram calculados os módulos elásticos dinâmicos longitudinal e transversal para temperaturas até 235°C com as Equações apresentadas no item 4.6.

Para verificar se o aumento da temperatura causa degradação térmica do adesivo, foi realizada uma análise termogravimétrica em um aparelho DTG-60H, Shimadzu. As análises foram submetidas à atmosfera de gás nitrogênio, a uma vazão constante de $50 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$, utilizando-se, aproximadamente, 2 mg, em cápsula de alumina aberta. As curvas termogravimétricas foram obtidas, a partir de 50°C , até a temperatura máxima de 400°C , com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. A curva termogravimétrica (TG) avalia a perda de massa em função da temperatura e da curva da derivada primeira da perda de massa (DTG).

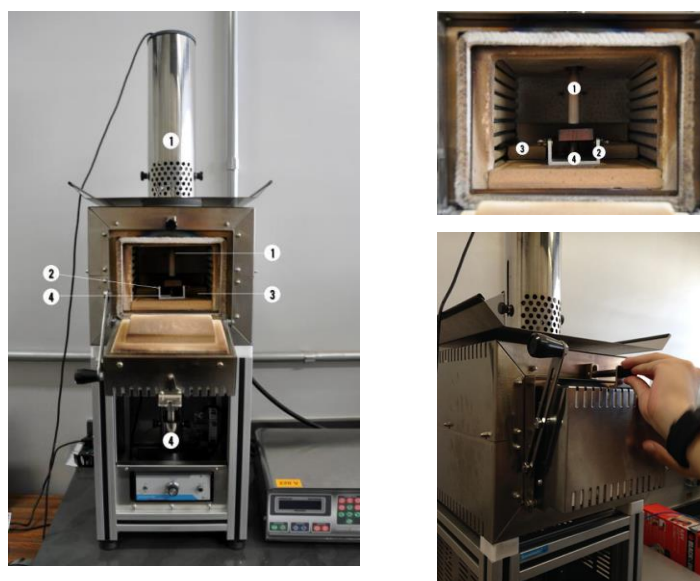


Figura 4.15 – Forno para análise em altas temperaturas. (1) Microfone. (2) Perfil de metálico e fios de platina. (3) Molde cerâmico para acomodação do perfil metálico e (4) Pulsador.

5.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Teor de umidade e densidade das lâminas

Com os resultados obtidos nos ensaios, de acordo com NBR 7190 (1997) para a umidade, verifica-se que as amostras possuíam um percentual de água médio de 11,31% e desvio padrão de $\pm 0,33\%$; esse resultado comprova que a madeira está em equilíbrio com o ambiente.

Os valores, para as densidades aparentes das 151 lâminas, ficaram contidos no intervalo de $0,63 \text{ g/cm}^3$ a $0,93 \text{ g/cm}^3$, com média de $0,79 \text{ g/cm}^3$ ($\pm 0,08$), portanto elas são classificadas como madeiras de média a alta densidade (ALVES, 2017).

As espécies mais utilizadas em dormentes, citadas pelo DNIT (2014), sucupira (*Bowdichia nitida*), o ipê (*Tabebuia* spp.), o mogno (*Swietenia macrophylla*), a andiroba (*Carapa guianensis*), o cedro (*Cedrella* spp.), o jatobá (*Hymenaea courbaril*) e o Angelim pedra (*Hyemenolobium petraeum*), de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1983), possuem densidades aparentes, respectivamente: $1,11 \text{ g/cm}^3$; $1,07 \text{ g/cm}^3$; $0,63 \text{ g/cm}^3$; $0,72 \text{ g/cm}^3$; $0,50 \text{ g/cm}^3$; $1,07 \text{ g/cm}^3$ e $0,69 \text{ g/cm}^3$. Como não foi possível identificar as espécies de madeiras de cada dormente, com o resultado da densidade aparente, foi possível verificar que todas as amostras possuem densidades inseridas entre os valores das espécies mais usuais.

5.2 Avaliação não destrutiva das lâminas

Os gráficos inseridos nas Figuras 5.1 e 5.2 estão correlacionando os resultados do ensaio de flexão com o ultrassom e ondas de excitação para todas as amostras. Foram

apresentados os gráficos para os coeficientes de determinação linear (Figuras 5.1 (a) 5.2 (a)) e exponencial (Figuras 5.1 (b) 5.2 (b)) as duas mostraram-se similares e a escolha da linear se baseou nas bibliografias utilizadas abaixo para comparar os resultados. O coeficiente de determinação entre ensaio de flexão e o ultrassom foi de $R^2 = 0,69$, o valor obtido no estudo é significativo e compatível com os valores usualmente encontrados na literatura. Diversas pesquisas nacionais e internacionais demonstram a viabilidade do método de ultrassom, por meio de correlações entre os módulos de elasticidade obtidos em ensaios destrutivos (compressão paralela às fibras e flexão estática) e em ensaios não destrutivos. Os valores encontrados na literatura indicam valores de coeficiente de determinação (R^2) entre 0,57 e 0,89 (BARTHOLOMEU, 2001; CANDIAN, SALES, 2009; NOGUEIRA, 2003; OLIVEIRA, 2005; ROSS, PELLERIN, 1991, 1994).

O coeficiente de determinação entre o ensaio de flexão e ondas de excitação foi de $R^2 = 0,71$; comparando com dados da literatura, foi possível verificar que o valor está abaixo do encontrado por Cossolino et al. (2009), que trabalharam com o mesmo equipamento e estudaram a espécie *Pinnus Oocarpa*, encontrando uma correlação de 0,89 e próximo do valor encontrado por Pizzol et. al (2017) que estudaram compensados de *Virola surinamensis* utilizados e reutilizados em fôrmas para concreto e encontraram $R^2 = 0,73$.

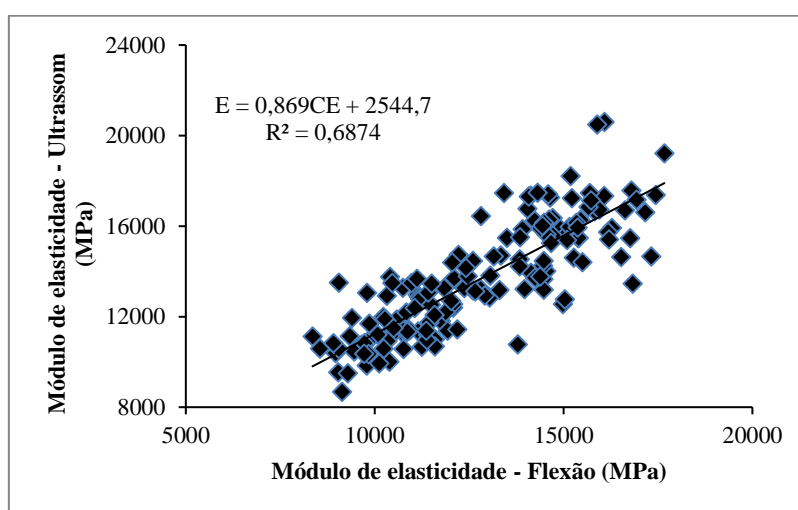
De acordo com a classificação visual, foi possível detectar defeitos nas lâminas e esses defeitos afetam a propagação das ondas. Nas Figuras 5.3 até 5.12, estão as correlações obtidas entre os ensaios de ultrassom e sonelastic com o ensaio de flexão, separados de acordo com as classes de classificação visual.

As correlações vão diminuindo com aumento do número de defeitos; para a classe A (sem defeitos), as correlações para o ultrassom e sonelastic são, aproximadamente, 0,86 e 0,80, já a classe D (três furos) encontrou-se $R^2 = 0,62$ e $R^2 = 0,61$. Comparando as correlações encontradas para a classe E, os valores foram superiores às amostras com um, dois ou três furos, em razão das rachaduras encontradas nas peças dessa classe serem pequenas e superficiais enquanto os furos tinham diâmetro de, aproximadamente, 2 cm, de uma face a outra da peça.

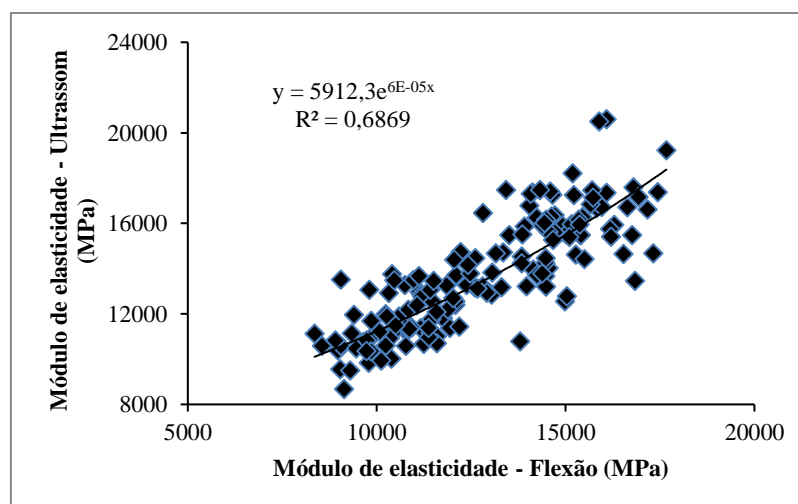
Os furos são descontinuidades que afetam na velocidade da onda de ambos os equipamentos, as ondas geradas pelo ultrassom e sonelastic são ondas mecânicas e precisam de meio material para se propagar. A velocidade na matriz lenhosa é muito maior do que a

velocidade no ar (furos), a densidade dos materiais é diferente. Com as bibliografias citadas a seguir verificaram-se e justificam-se esses resultados.

Segundo González et al. (2001) e Carrasco e Azevedo Júnior (2003), na madeira, alguns fatores influenciam a propagação de ondas: propriedades anatômicas, físicas (densidades básica e aparente), morfológicas (tipos de lenhos e ângulo de grã), presença de defeitos (nós e rachaduras), geometria das amostras, condições do meio (temperatura e umidade relativa) e procedimento utilizado para tomada das medidas (frequência e tipo de transdutor).

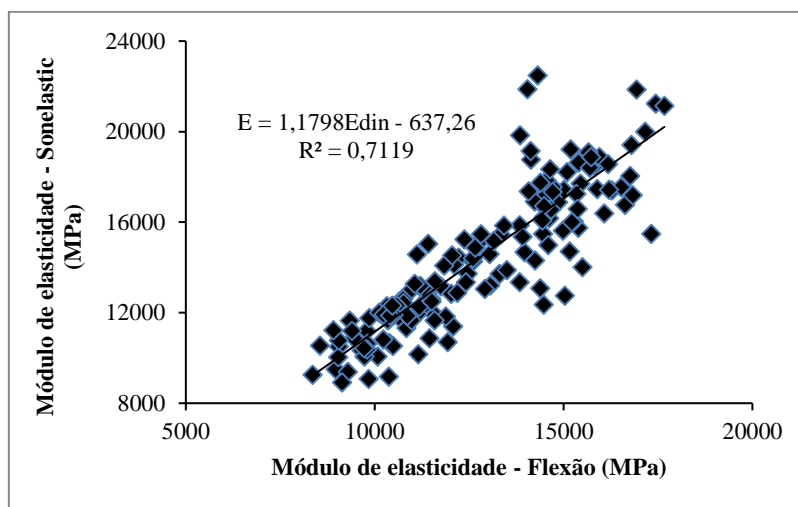


(a)

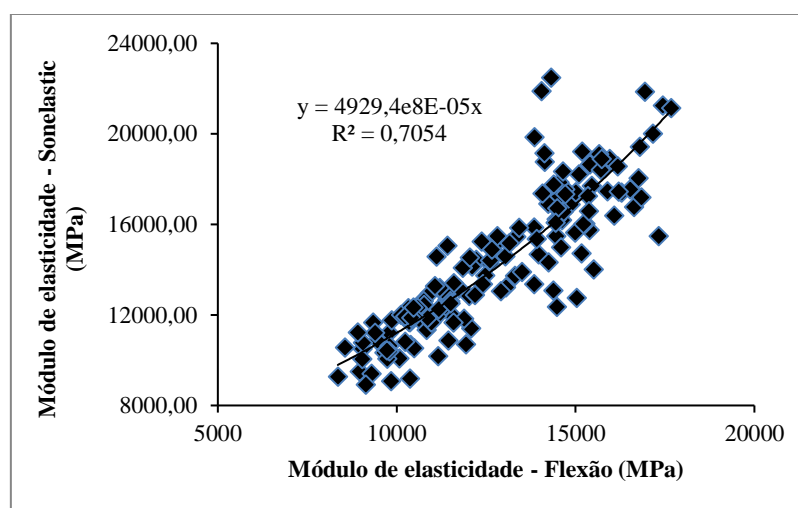


(b)

Figura 5.1 – Gráficos: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para todas as amostras. (a) Correlação linear. (b) Correlação exponencial.



(a)



(b)

Figura 5.2 – Gráficos: correlação entre ensaio de flexão e sonelastíc para todas as amostras. (a) Correlação linear. (b) Correlação exponencial.

Candian e Sales (2009) estudaram a aplicação de ondas de excitação em um disco, com um furo (defeito) e verificaram que houve uma diminuição da velocidade nas direções entre os sensores que cruzaram o furo. Isso ocorreu, segundo os autores, porque a onda possui maior velocidade de propagação na madeira sadia em relação à madeira com presença de defeitos (heterogeneidades), havendo uma atenuação da onda, quando ela passa por uma região com defeito ou vazio.

Puccini (2002) analisou a influência da presença de nós e observou que influenciaram, significativamente, a velocidade de propagação das ondas; reduzindo-a, constatou que quanto maior o somatório dos seus diâmetros menor a velocidade.

Fuller et al. (1995) observaram grande redução da velocidade de propagação das ondas em tábuas de carvalho vermelho que, após a secagem, apresentaram rachaduras superficiais e internas. Gonçalves e Puccini (2000) compararam a inspeção visual e a velocidade de percolação das ondas em amostras defeituosas. Concluíram que o ultrassom é capaz de detectar defeitos não visíveis.

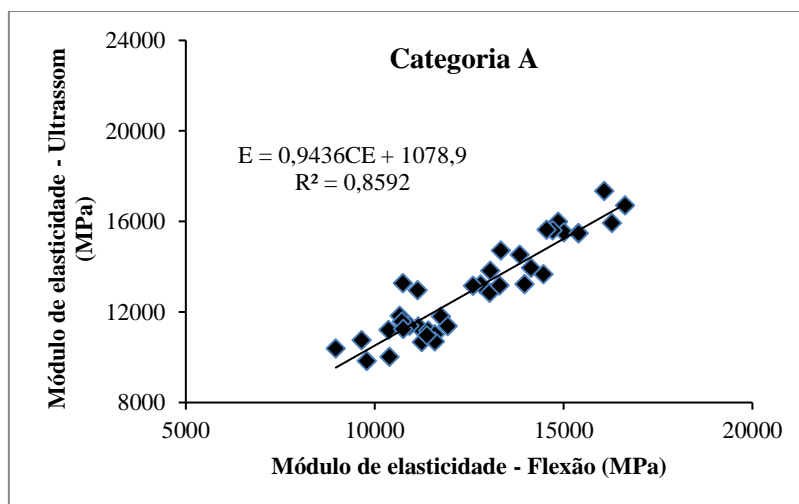


Figura 5.3 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para a categoria A (sem defeitos).

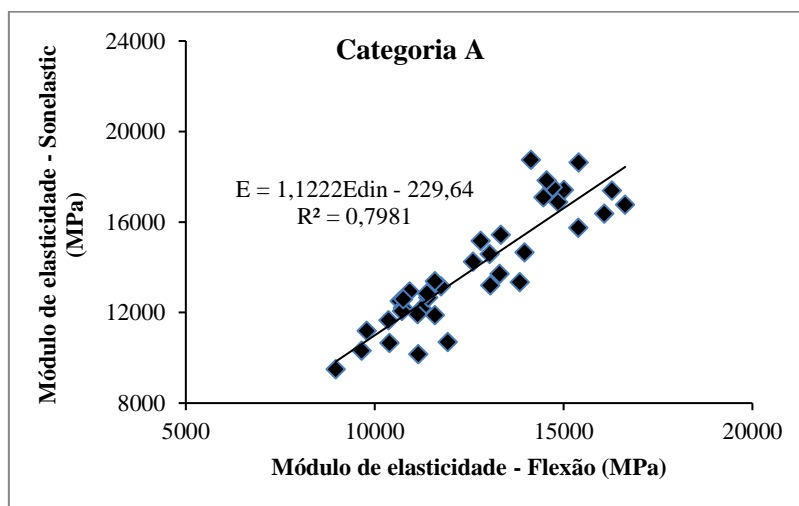


Figura 5.4 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e sonelastic para a categoria A (sem defeitos).

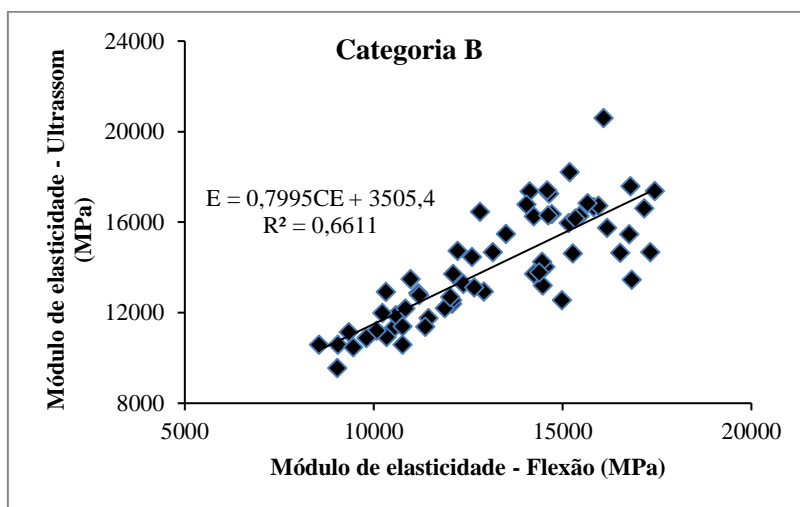


Figura 5.5 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para a categoria B (um furo).

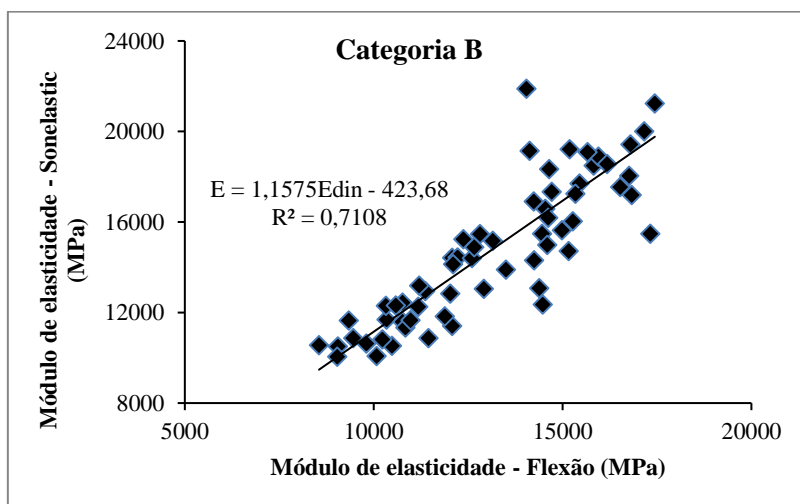


Figura 5.6 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e sonelastic para a categoria B (um furo).

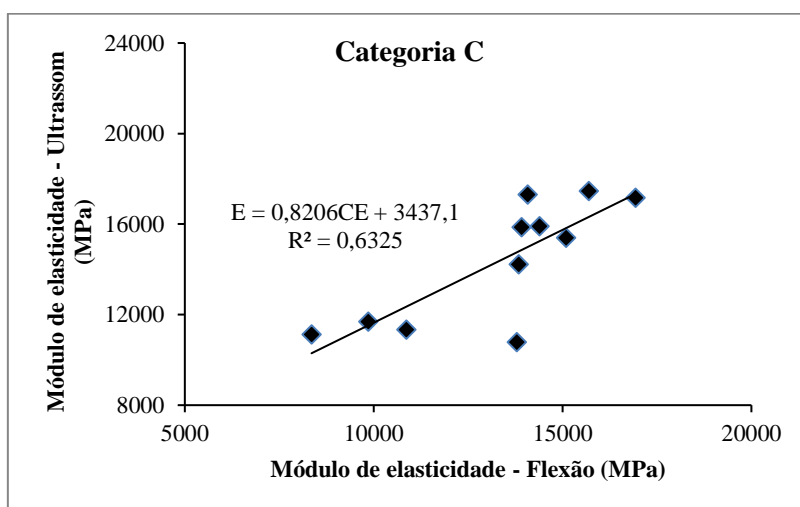


Figura 5.7 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para a categoria C (dois furos).

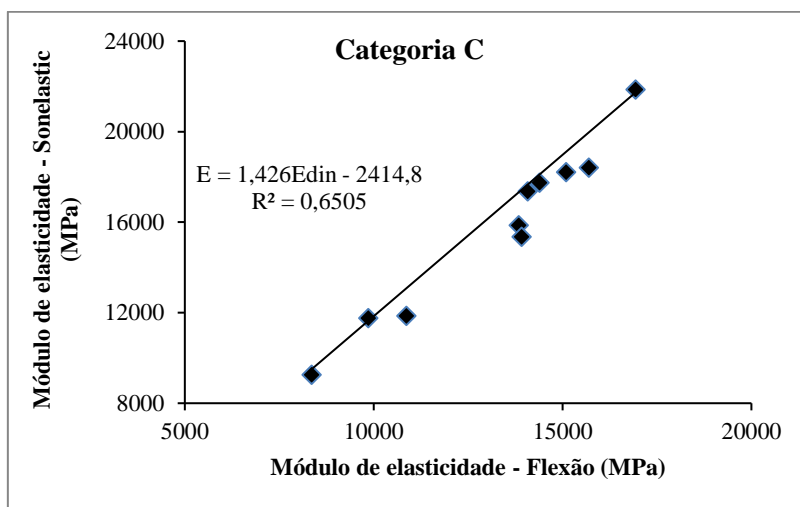


Figura 5.8 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e sonelastic para a categoria C (dois furos).

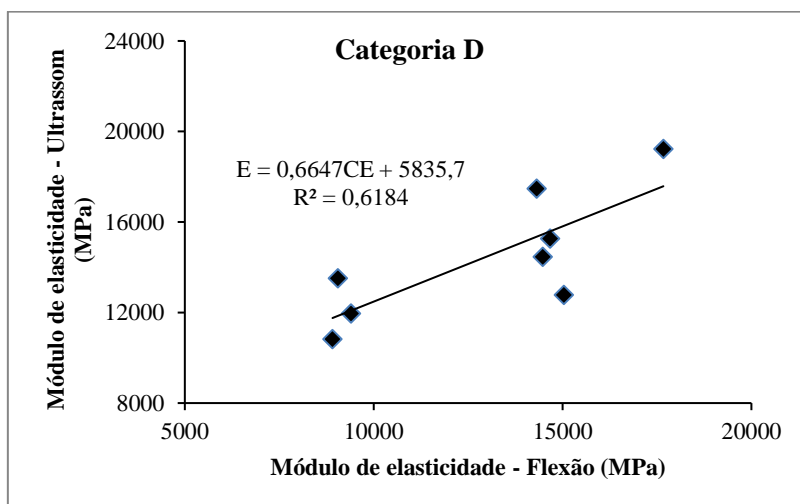


Figura 5.9 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para a categoria D (três furos).

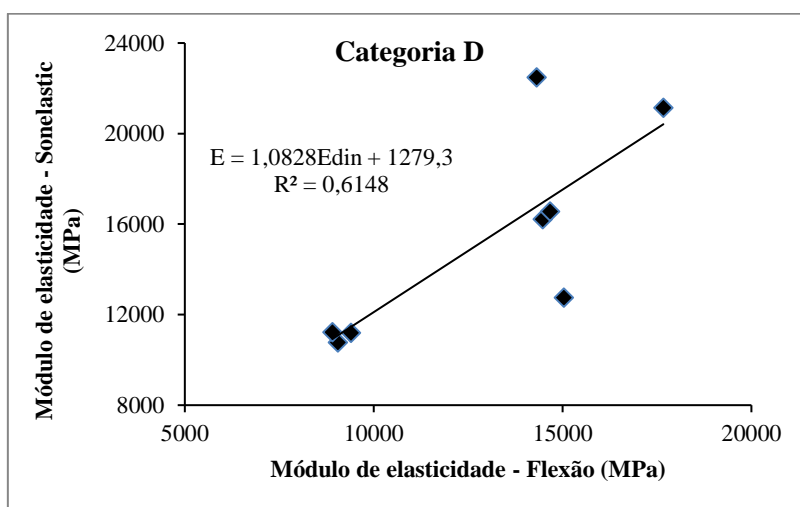


Figura 5.10 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e sonelastic para a categoria D (três furos).

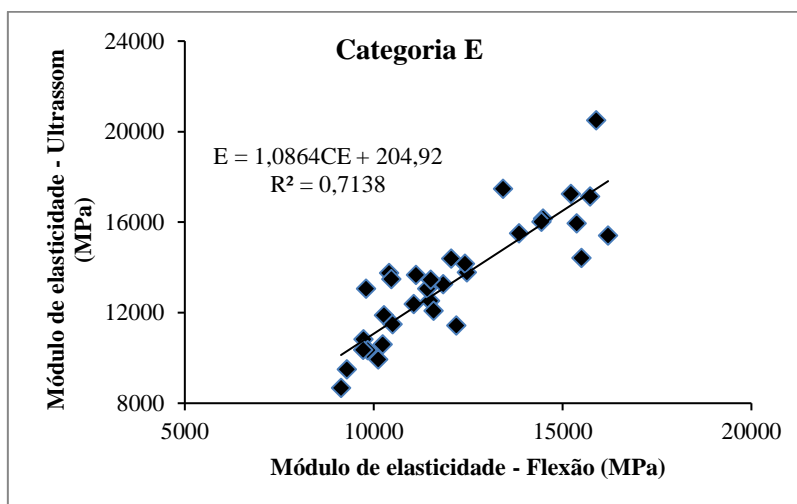


Figura 5.11 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e ultrassom para a categoria E (rachaduras).

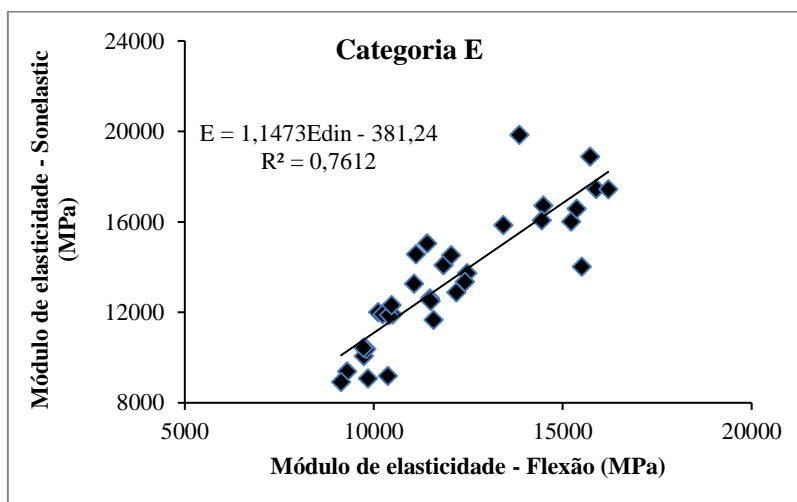


Figura 5.12 – Gráfico: correlação entre ensaio de flexão e sonelastic para a categoria E (rachaduras).

Com relação aos módulos de elasticidade encontrados para as lâminas, os valores estão inseridos entre 8353,76 e 17669,19 MPa, com média de 12793,13 MPa. Os resultados encontrados, quando comparados com os valores do módulo de elasticidades, IPT (1989), das espécies mais usuais, assim como os valores de densidade, assemelham-se e estão inseridos no intervalo, sucupira (16060 MPa, verde), ipê (15298 MPa, verde), mogno (9110 MPa, verde), andiroba (11376 MPa, verde), cedro (8336 MPa, 12%), jatobá (14837 MPa, verde) e angelim pedra (11572 MPa, 12%).

5.3 Pressão de colagem

De acordo com a Figura 5.13, a resistência da linha de cola ao cisalhamento em pressões elevadas proporcionou valores baixos de resistência, pois, em madeiras com densidades médias a altas e em elevadas pressões, o adesivo não penetra, escorrendo durante o período de prensagem. Nas pressões de 5, 7,5 e 10 MPa, a resistência da linha de cola foi de, respectivamente, 2,01, 1,98 e 1,93 MPa.

A ausência de pressão mostrou, como o descrito em Carrasco (1989), que o adesivo resorcinol-formol apresenta uma resistência razoável por sua maior fluidez e penetração nos poros da madeira. Entretanto a falta de pressão, durante a cura das peças de madeira colada, ocasiona menor penetração do adesivo e formação de uma película mais espessa.

Os melhores resultados encontrados, para a resistência da linha de cola, foram nas pressões entre 1 e 1,5 MPa. Adotou-se como pressão ideal, para confecção das placas, a pressão de 1,5 MPa. Pfeil e Pfeil (2003) afirmam que lâminas de madeiras podem ser unidas com adesivos sob pressão variável de 0,7 a 1,5 MPa para a fabricação de MLC; Petruski (1999), estudando diferentes níveis de pressão para madeira de *Eucalyptus grandis*, concluiu que a pressão ideal seria de 1,1 MPa, no entanto Carrasco (1989) relata que, para as espécies castanheira (*Bertholetia excelsa*), pinus (*Pinus elliottii*), pinho do Paraná (*Araucária angustifolia*) e peroba rosa (*Aspidosperma polyneuron*), a pressão ideal de colagem variou entre 0,55 a 0,65 MPa.

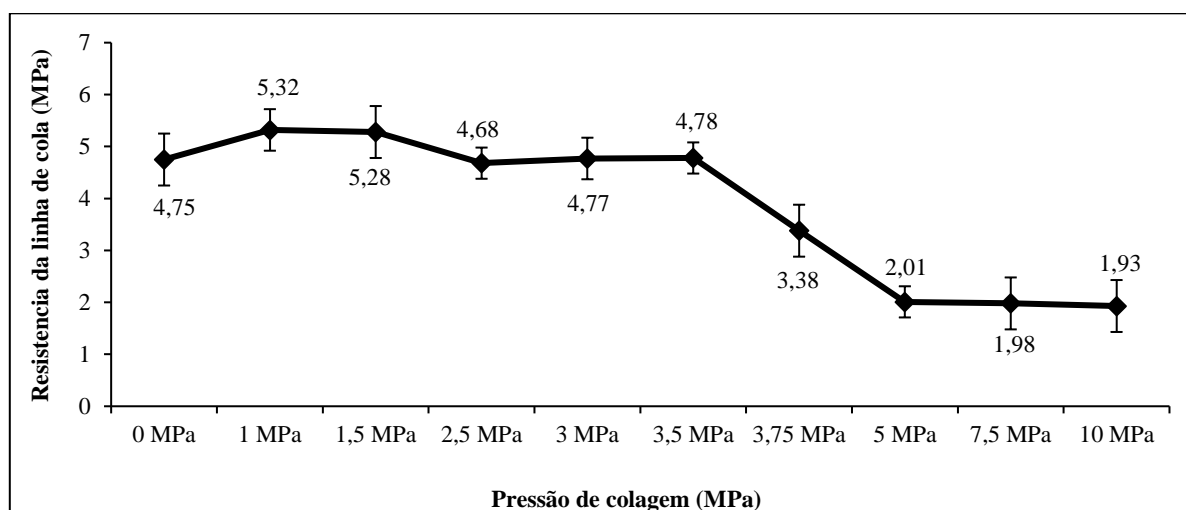


Figura 5.13 – Gráfico: Resistência da linha de cola em função da pressão de colagem.

5.4 Propriedades determinadas nas placas

Na Tabela 5.1, estão expostos os valores médios das propriedades elásticas, determinados a partir do ensaio de compressão nas placas, com a utilização de extensômetros, a partir da inclinação das retas do gráfico de tensão \times deformação, Figura 5.14 (a) e da deformação horizontal \times deformação vertical, Figura 5.14 (b) e (c), que apenas foram utilizadas para ilustrar e exemplificar a obtenção dos valores dispostos na Tabela 5.1 sem nenhum critério de escolha.

O valor do módulo de elasticidade no eixo 3L variou de 9596,3 a 11492 MPa com média de 10434,9 MPa. Pereira (2014), trabalhando com CLT de Pinus, encontrou um valor médio de 6669,32 MPa, Pereira e Calil Junior (2017) 6732 MPa; Buck et al. (2016) estudaram *Picea abies* com média de 8243 MPa e Liao et al. (2017), analisando madeira de *Eucalyptus* (*Eucalyptus urophylla* \times *E. grandis*), obtiveram E_{3L} de 10417 MPa. No entanto as espécies dos três primeiros autores são de grupos diferentes e o segundo, terceiro e quarto autores trabalharam com a determinação do módulo de elasticidade pelo ensaio de flexão o que dificulta o comparativo entre os resultados da presente tese.

Em relação ao eixo 2L, o módulo de elasticidade médio encontrado foi de 4699 MPa, o valor representa redução de, aproximadamente, 55% em comparação ao eixo 3L. Tal fato é explicado, pois o eixo em questão possuía apenas duas camadas de tábuas longitudinais e três normais, Pereira (2014) encontrou E_{2L} médio de 3431,83 MPa, 51% do E_{3L} , o que confirma a similaridade na perda da elasticidade.

Os valores obtidos não podem ser comparados aos valores mínimos exigidos pela norma americana e canadense PRG 320 (ANSI/APA, 2012), pois nessa norma só há classificação para madeiras coníferas.

Em relação aos coeficientes de Poisson, o maior valor encontrado foi para o eixo 3L, N, seguido pelos eixos 2L, N; 3L,2L e 2L,3L. Serrano e Enquist (2010), em sua abordagem numérica, adotaram valores de $\nu_{RT} = 0,56$, $\nu_{RL} = 0,035$ e $\nu_{TL} = 0,015$. No entanto, as placas de CLT produzidas na presente tese, possuíam algumas ou todas as tábuas radiais e/ou tangenciais e/ou intermediárias, por exemplo, o eixo 3L possuía 3 camadas que eram longitudinais e outras duas que poderiam ser tangenciais e/ou radiais e/ou intermediárias, fato que novamente dificulta a comparação de resultados.

Tabela 5.1 – Resultados das propriedades elásticas para as placas de CLT.

Placa	Densidade (g/cm ³)	E _{3L} (MPa)	E _{2L} (MPa)	$\nu_{2L,3L}$ (ad.)	$\nu_{3L,2L}$ (ad.)	$\nu_{3L,N}$ (ad.)	$\nu_{2L,N}$ (ad.)
A	0,85	9596,3	4380,2	0,05	0,13	0,53	0,30
B	0,85	11492,0	4759,0	0,04	0,15	0,57	0,28
C	0,84	10547,0	5105,0	0,04	0,12	0,65	0,31
D	0,85	10630,0	4458,0	0,06	0,13	0,50	0,30
E	0,82	9909,0	4793,0	0,04	0,11	0,52	0,30
Média	0,84	10434,9	4699,0	0,05	0,13	0,55	0,30
D.P*.	0,01	545,8	224,0	0,01	0,01	0,04	0,01

*Desvio Padrão.

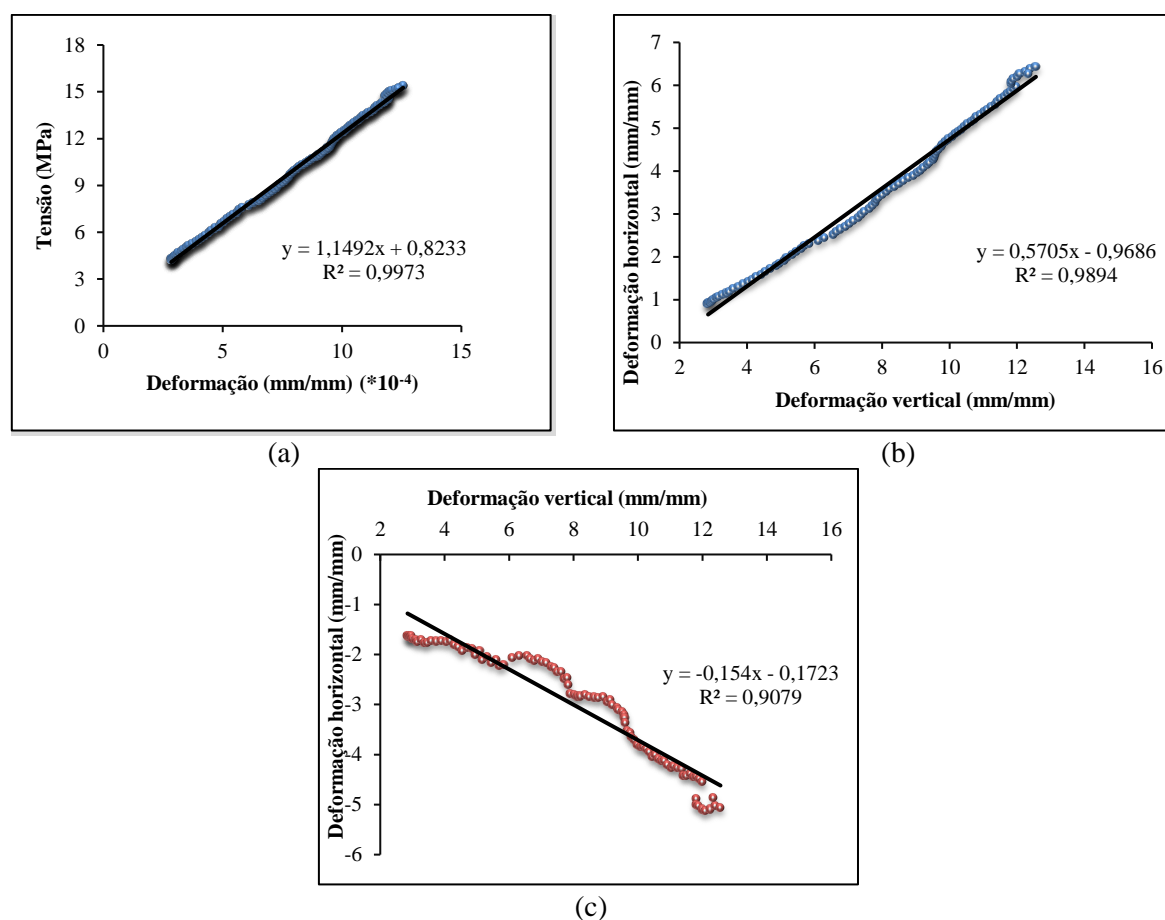


Figura 5.14 – Exemplo dos resultados do ensaio de compressão da placa B na direção 3L com a utilização de extensômetros: (a) Módulo de elasticidade 3L. (b) Coeficiente de Poisson 3L, N e (c) Coeficiente de Poisson 3L,2L.

Quanto à densidade aparente das placas de CLT, o valor médio foi de 0,84 g/cm³ e desvio padrão de 0,01 g/cm³. A peculiaridade das placas é observada, quando comparada sua

densidade elevada com os demais trabalhos que confeccionaram placas com coníferas: Pereira (2014) 0,33 g/cm³; Serrano e Enquist (2010) 0,43 g/cm³. Lessa (2017) fabricou placas de *Eucalyptus grandis* que apresentaram massa específica média de 0,565 g/cm³.

Nota-se, também, que as propriedades elásticas aumentam com o aumento da densidade da placa, assim como definido por Markwardt e Wilson (1935), como também Lobão (2004), ao afirmar que a variabilidade da maior parte das propriedades mecânicas da madeira pode ser estimada com base na variação da densidade.

5.5 Propriedades elásticas determinadas nas amostras menores e matriz de flexibilidade

Na Figura 5.15, estão apresentados os gráficos determinados pela análise dos dados obtidos no ensaio de compressão das amostras menores com todas as orientações e com o uso de medidores de deslocamento. Comparando os resultados obtidos, Tabela 5.2, com os resultados determinados nos ensaios das placas, Tabela 5.1, foi possível verificar a eficácia da metodologia, assim como descrito por Alves (2017). As vantagens pelo uso de tais dispositivos foram: redução de tempo, pois não há o processo minucioso de colagem dos extensômetros, bem como o isolamento e soldagem dos cabos e de custo, o MD pode ser utilizado várias vezes enquanto os extensômetros, após o ensaio são perdidos.

O pequeno aumento observado entre os valores encontrados para as placas e para as amostras menores, 5% no E_{3L} e 6% no E_{2L} , pode ser causado pela variação dentro das tábuas que formam a CLT; enquanto para o primeiro caso, tem-se um resultado global (todas as tábuas), no segundo, um resultado local (algumas tábuas).

Na Tabela 5.2, estão inseridas todas as propriedades elásticas obtidas para cada placa e o valor médio. Em relação ao módulo de elasticidade, verificou-se a razão: $E_{3L} = 2,24.E_{2L} = 8,35.E_N$. Alves (2017) encontrou, para as madeiras de angelim vermelho (*Dinizia excelsa*, 1,13 g/cm³), garapa (*Apuleia leiocarpa*, 0,95 g/cm³) e roxinho (*Peltogyne discolor*, 0,93 g/cm³), respectivamente, as relações: $E_L = 10.E_R = 11,3.E_T$; $E_L = 10,5.E_R = 12,2.E_T$ e $E_L = 9,8.E_R = 12,7.E_T$. Ballarin e Nogueira (2003) encontraram uma relação E_L/E_R de 9,3, para a madeira de *Eucalyptus citriodora* (1,04 g/cm³). Bodig e Jayne (1993) sugerem as relações entre propriedades elásticas da madeira: $E_L : E_R : E_T \approx 20 : 1,6 : 1$. Em todas as literaturas, o sentido longitudinal é o que apresenta maior módulo de elasticidade; no critério comparativo,

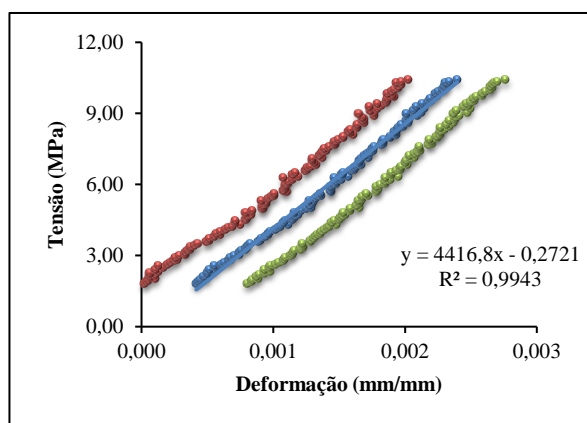
no presente trabalho, o eixo definido com maior número de camadas longitudinais também apresentou maior elasticidade, seguido pelo eixo 2L e por último o eixo normal em que as camadas são radiais e/ou tangenciais.

Para o módulo de elasticidade transversal (G), tem a razão: $G_{3L,2L} : G_{3L,N} : G_{N,2L} \approx 3 : 1,6 : 1$. Alves (2017), para as espécies já citadas acima, identificou $G_{LR} : G_{LT} : G_{RT}$, respectivamente: $2 : 1,3 : 1$; $2,5 : 1,6 : 1$ e $2,7 : 1,5 : 1$. No entanto Bodig e Jayne (1993) apresentam $G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \approx 10 : 9,4 : 1$.

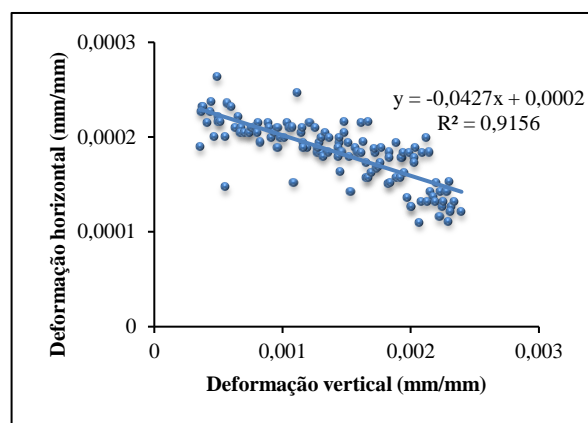
O Wood Handbook (2010) estabelece uma razão dos três módulos de elasticidade transversal pelo módulo de elasticidade longitudinal para algumas espécies de folhosas como a yellow birch (*Betula alleghaniensis*, $0,65 \text{ g/cm}^3$) e Sweetgum (*Liquidambar styraciflua*, $0,55 \text{ g/cm}^3$), encontrando os valores: G_{LR}/E_L 0,074 e 0,088; G_{LT}/E_L 0,068 e 0,061; G_{RT}/E_L 0,017 e 0,011. Fazendo as mesmas relações para os eixos orientados das placas, ou seja, $G_{3L,N}/E_{3L}$, $G_{3L,2L}/E_{3L}$ e $G_{N,2L}/E_{3L}$ obtiveram-se valores: 0,042; 0,081 e 0,026.

Em relação aos coeficientes de Poisson, a primeira letra do sub-índice refere-se à direção da força aplicada e à segunda letra na direção da deformação lateral. Por exemplo, $\nu_{3L,N}$ é a razão de Poisson, para a deformação, ao longo do eixo N, causada pela força, ao longo do eixo 3L. Os valores em ordem decrescente foram: $\nu_{3L,N}$ (0,58) > $\nu_{2L,N}$ (0,31) > $\nu_{3L,2L}$ (0,12) > $\nu_{N,2L}$ (0,08) > $\nu_{N,3L}$ (0,07) > $\nu_{2L,3L}$ (0,05). O Wood Handbook (2010) apresenta para yellow birch: ν_{RT} (0,697) > ν_{LT} (0,451) > ν_{LR} (0,426) = ν_{TR} (0,426) > ν_{RL} (0,043) > ν_{TL} (0,024) e para a Sweetgum: ν_{RT} (0,682) > ν_{LT} (0,403) > ν_{LR} (0,325) > ν_{TR} (0,309) > ν_{RL} (0,044) > ν_{TL} (0,023).

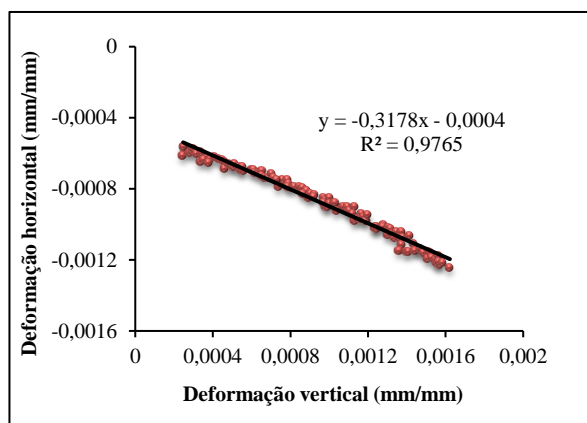
O mesmo comportamento foi verificado por Bodig e Jayne (1993) que definiram para as folhosas: ν_{RT} (0,67) > ν_{LT} (0,50) > ν_{LR} (0,37) > ν_{TR} (0,33) > ν_{RL} (0,044) > ν_{TL} (0,027). Foi possível verificar que, assim como nas espécies acima citadas, as placas possuem maiores coeficientes de Poisson, quando a força é aplicada no eixo com maior quantidade de camadas longitudinais e menores valores quando as deformações são medidas no eixo 3L. No entanto, segundo o Wood Handbook (2010), o índice de Poisson varia dentro e entre espécies, sendo afetado pelo teor de umidade e massa específica, dificultando e tornando inviável a comparação entre esses valores.



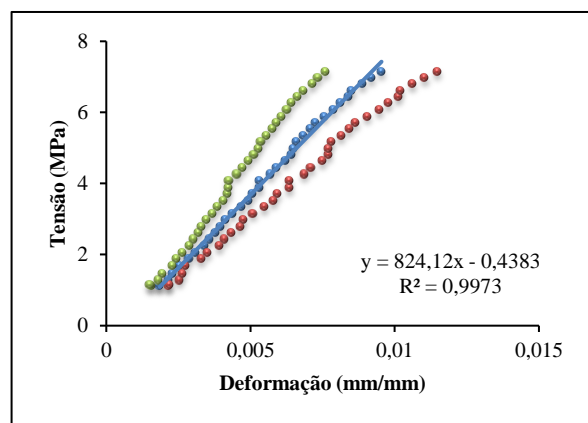
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.15 – Exemplo dos resultados do ensaio de compressão realizado nas amostras menores da placa B com a utilização de medidores de deslocamentos: (a) Módulo de elasticidade 2L. (b) Coeficiente de Poisson 2L,3L. (c) Coeficiente de Poisson 2L, N e (d) Módulo de elasticidade transversal $G_{3L,2L}$.

Tabela 5.2 – Resultados para todas as propriedades elásticas.

Placa	E_{3L}	E_{2L}	E_N	$E_{3L,2L}$	$E_{3L,N}$	$E_{2L,N}$	$\nu_{N,3L}$	$\nu_{2L,3L}$	$\nu_{N,2L}$	$\nu_{3L,2L}$	$\nu_{3L,N}$	$\nu_{2L,N}$	$G_{3L,2L}$	$G_{3L,N}$	$G_{2L,N}$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(ad.)	(ad.)	(ad.)	(ad.)	(ad.)	(ad.)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
A	9170,2	4104,6	1150,3	1516,7	710,5	597,0	0,06	0,06	0,07	0,11	0,56	0,30	755,98	347,62	245,18
B	10966	4416,8	1364,3	1948,8	1077,7	670,3	0,09	0,04	0,10	0,12	0,61	0,32	824,12	474,52	283,29
C	9762,9	4722,8	938,2	1836,9	959,5	596,7	0,07	0,04	0,08	0,10	0,67	0,33	761,18	466,61	263,11
D	10132	4434,7	1597,4	2183,5	1349,7	686,5	0,09	0,06	0,09	0,13	0,52	0,30	894,88	450,77	275,94
E	9605,5	4478	892,5	1923,9	747,9	534,7	0,06	0,05	0,06	0,13	0,53	0,30	778,76	348,03	249,5
Média	9927,32	4431,38	1188,54	1881,96	969,06	617,04	0,07	0,05	0,08	0,12	0,58	0,31	802,98	417,51	263,40
D.P*	497,34	136,54	233,85	164,13	195,71	49,09	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,02	45,21	55,75	12,97

* Desvio Padrão.

A seguir, foi determinada a matriz de flexibilidade para a CLT feita, a partir de madeiras reaproveitadas de dormentes considerando a ortotropia do material:

$$\begin{array}{c|c|ccccccc|c}
 \varepsilon_{3L} & & 1,01 \times 10^{-4} & -1,13 \times 10^{-5} & -5,89 \times 10^{-5} & 0 & 0 & 0 & \sigma_{3L} \\
 \varepsilon_N & & -1,20 \times 10^{-5} & 2,26 \times 10^{-4} & -6,73 \times 10^{-5} & 0 & 0 & 0 & \sigma_N \\
 \varepsilon_{2L} & & -5,84 \times 10^{-5} & -6,99 \times 10^{-5} & 8,41 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 0 & \sigma_{2L} \\
 \gamma_{2L,N} & = & 0 & 0 & 0 & 3,8 \times 10^{-3} & 0 & 0 & \tau_{2L,N} \\
 \gamma_{3L,N} & & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,4 \times 10^{-3} & 0 & \tau_{3L,N} \\
 \gamma_{3L,2L} & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,25 \times 10^{-3} & \tau_{3L,2L}
 \end{array}$$

5.6 Propriedades elásticas obtidas no ensaio de ondas de excitação

Na Tabela 5.3, estão apresentados os resultados para as propriedades elásticas determinadas nos ensaios de compressão e de ondas de excitação. Quanto ao valor médio do módulo de elasticidade para o eixo 3L, o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,8. No eixo 2L, por sua vez, o resultado obtido no ensaio dinâmico (ondas de excitação) foi 3% maior do que no estático (compressão). O E_N dinâmico em relação ao estático variou 20% e o R^2 entre os resultados, assim como o E_{3L} foi de 0,80. Alves (2017), para a madeira de angelim vermelho, utilizando ensaios similares, encontrou variações de 18% para o eixo longitudinal, 93% para o eixo radial e 51% para o eixo tangencial, uma discrepância superior aos dados encontrados para a CLT.

Quanto aos eixos inclinados, os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos foram superiores aos estáticos, assim como nos eixos principais, e os coeficientes de determinação encontrados foram 0,80 para o eixo 3L,2L, 0,82 para o eixo 3L, N e 0,72 para o eixo 2L, N.

Em termos de coeficientes de determinação entre os ensaios dinâmico e estático, Segundinho et al. (2012) encontraram valores de 0,88 a 0,98 e Cossolino et al. (2009) 0,89; no entanto ambos para o ensaio estático de flexão. Comparando com os resultados do item 5.3 (categoria A $R^2 \approx 0,80$) novamente os coeficientes de determinação estão próximos.

Tabela 5.3 – Resultados para o módulo de elasticidade determinado no ensaio de ondas de excitação.

Propriedade elástica	Estática	Dinâmica	Equação	R ²
E _{3L} (MPa)	9927,32 (610,40)*	9942,00 (497,34)*	$E_{3L} = 0,8016 E_{3L,din} + 1958,3$	0,80
E _{2L} (MPa)	4431,38 (136,54)	4527,84 (113,36)	$E_{2L} = 0,6905 E_{2L,din} + 1467,6$	0,82
E _N (MPa)	1188,54 (384,00)	1430,00 (233,85)	$E_N = 0,595 E_{N,din} + 337,73$	0,80
E _{3L,2L} (MPa)	1881,96 (241,60)	2163,00 (164,13)	$E_{3L,2L} = 0,6273 E_{3L,2L,din} + 525,08$	0,80
E _{3L,N} (MPa)	969,06 (125,28)	1123,40 (195,71)	$E_{3L,N} = 1,4445 E_{3L,N,din} - 653,7$	0,82
E _{2L,N} (MPa)	617,04 (110,24)	734,80 (49,09)	$E_{2L,N} = 0,3808 E_{2L,N,din} + 337,2$	0,72

*Desvio Padrão.

5.7 Ensaio com a propagação de ondas de excitação em altas temperaturas

Na Tabela 5.4, estão apresentados os valores para redução dos módulos de elasticidade, para todos os eixos, em função do aumento da temperatura. Nota-se que a variação é dada apenas até 150°C, porém, no item 4.9, foi definido que o ensaio seria realizado até 235°C; durante a sua realização, notou-se que as camadas na linha de cola separaram em temperaturas acima de 150°C, Figura 5.16 (a) e (b). O gráfico na Figura 5.16 (c) mostra a queda brusca do módulo de elasticidade na temperatura citada. Tal fato está relacionado com a degradação térmica do adesivo que, de acordo com análise termogravimétrica, inicia-se em temperaturas superiores a 150°C, como ilustrado no gráfico da Figura 5.17.

O comportamento foi similar, independente do sentido considerado, até 50°C a perda do módulo de elasticidade variou de 2 a 4%, a 75°C de 10 a 16%, a 100°C de 18 a 24%, a 125°C de 27 a 35% e a 150°C de 32 a 40%. A 175°C todos os módulos de elasticidade tiveram uma perda de 100%.

Alves (2017), para madeira angelim vermelho, encontrou redução de 2% a 50°C, 12% a 100°C e 40% a 150°C, comportamento similar aos resultados apresentados.

Carrasco et al. (2016) afirmaram que, para a madeira eucalipto, submetida a até 120°C, existe uma diminuição em torno de 8% e 120°C até 200°C a diminuição é mais acentuada, chegando a 38%.

Por meio dos resultados apresentados na Tabela 5.4 e do gráfico da Figura 5.16 (c), é possível afirmar que o comportamento inicial da CLT é semelhante aos apresentados na literatura, todavia a degradação do adesivo causa o desprendimento das camadas. Frangi et al.

(2009) afirmam que o comportamento da CLT, em situação de incêndio, depende do comportamento das camadas individuais. Assim, se a camada carbonizada se desprender, um aumento da taxa de carbonização precisa ser considerado, pois a camada de carvão que agiria como isolante térmico não estará mais presente.

Tabela 5.4 – Redução do módulo de elasticidade em função do aumento de temperatura.

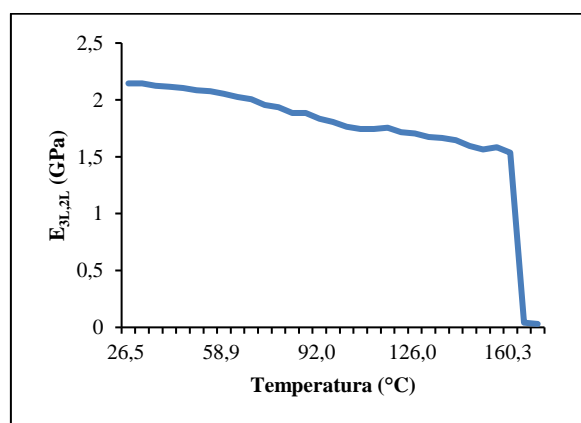
Propriedade elástica	50°C	75°C	100°C	125°C	150°C
E_{3L} (MPa)	4%	12%	18%	28%	32%
E_{2L} (MPa)	4%	16%	24%	35%	39%
E_N (MPa)	2%	10%	19%	30%	38%
$E_{3L,2L}$ (MPa)	4%	13%	23%	27%	35%
$E_{3L,N}$ (MPa)	3%	14%	21%	31%	38%
$E_{2L,N}$ (MPa)	2%	13%	22%	31%	40%



(a)



(b)



(c)

Figura 5.16 – Amostras após o ensaio em altas temperaturas e resultados: (a) Amostra da placa E com orientação 3L,2L após ensaio. (b) Amostra da placa E com orientação 3L após ensaio e (c) Gráfico: redução do módulo e elasticidade em função da temperatura para a amostra da placa E com orientação 3L,2L.

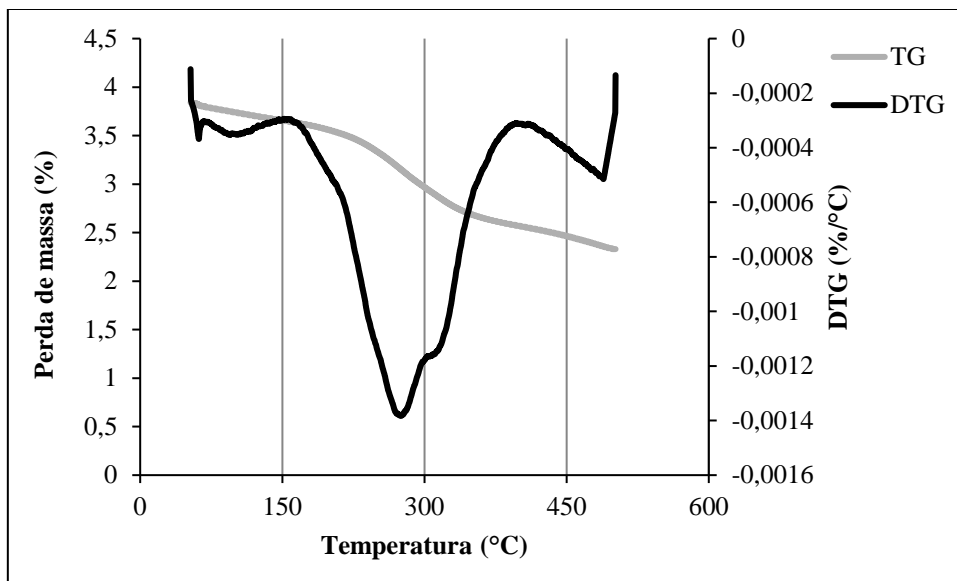


Figura 5.17 – Gráfico: análise termogravimétrica para o adesivo Resorcinol-Formol.

6.

CONCLUSÕES

Com base nos objetivos traçados, foi possível concluir que:

- Os métodos não destrutivos foram promissores como ferramentas de classificação mecânica e identificação de defeitos nas lâminas, visando a fabricação de CLT com madeiras de alta densidade.
- A pressão de colagem que proporcionou melhor resistência da linha de cola para madeiras reaproveitadas de dormentes e posicionadas ortogonalmente às fibras foi de 1,5 MPa, com isso obteve-se maior aderência mecânica.
- Com a metodologia proposta, foi possível determinar as propriedades elásticas e a matriz de flexibilidade da CLT feita a partir de dormentes descartados.
- O ensaio de ondas de excitação apresentou boas correlações, na determinação do módulo de elasticidade longitudinal, podendo gerar economia de tempo, de aporte financeiro e de material.
- O ensaio de ondas de excitação em altas temperaturas possibilitou verificar que, acima de 150°C, há uma queda no módulo de elasticidade, por degradação térmica do adesivo, comprovada pela análise termogravimétrica.

Quanto a fronteira do conhecimento ultrapassada pelos resultados do trabalho é possível verificar:

- A possibilidade do uso de um produto descartado para a confecção de uma placa estrutural que até então não usava o mesmo. A possibilidade de colagem com madeira descartadas e de alta densidade.

- A adição de mais uma literatura que trabalhou com madeiras de altas densidades para a fabricação de CLT bem como sua completa caracterização elástica considerando a ortotropia da madeira.
- O emprego de uma técnica não destrutiva de determinação de parâmetros elásticos principalmente em altas temperaturas.
- Uma metodologia para determinar todos os parâmetros elásticos de placas de CLT.

Espera-se que os dados apresentados, na presente tese, fomentem programas de dimensionamento de elementos de CLT; despertem interesse em estudo e desenvolvimentos de novos adesivos para colagem resistentes a altas temperaturas.

Em trabalhos futuros, o autor pretende quantificar os gases gerados, durante a queima da placa e sua toxicidade e, conseqüentemente, verificar possíveis usos.

7.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 2012. Disponível em: <<http://www.abende.org.br>>. Acesso: março 2013.

ALENCAR, J. B. M. **Sistema construtivo em madeira laminada colada cruzada ou cross laminated timber (CLT): análise da viabilidade técnica da madeira com baixo valor agregado.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, PR. 2015.

ALÉ, R.; KOTILAINEN, R.; ZAMAN, A. Thermochemical Behavior of Norway Spruce (*Picea abies*) at 180-225 °C. *Wood Science and Technology*, Nova York, v. 36, n.1, p. 71-163, 2002.

ALMEIDA, P. A. O.; SANCHES, S. B. O efeito da temperatura nas resistências da madeira e do concreto. *Revista Técnica*, março-abril, n. 33, 1998.

ALVES, R. C. **Determinação das constantes elásticas da madeira considerando sua ortotropia.** 2017. 91f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, MG.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198-08: Static tests of Timbers in Structural Sizes.** Philadelphia, Pa, USA, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E119: Standard Method of Fire Tests of Building Construction and Materials.** 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.** ASTM designation E1876 – 09, 2006.

AMORIM, S. T. A; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. A madeira laminada cruzada: aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento. *Matéria (Rio J.)*, Rio de Janeiro, v. 22, supl. 1, e -11937, 2017.

APA, **Standard for performance-rated cross-laminated timber**. ANSI/APA PRG 320-2012, APA – The Engineered Wood Association, Tacoma, WA, USA, 2012.

ASSAD, N. M. J. **Dormentes de Plástico Reciclado**. 2ª ed. Rio de Janeiro, Gráfica UNICOP, 2007. 15º cadernos.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15521: Ensaio não destrutivo — Ultra-som — Classificação mecânica de madeira Serrada de dicotiledôneas**. Rio de Janeiro, 2007. 8 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS – ANTF. **Anuário do setor ferroviário: relatório executivo 2017**. 2017. 19 p.

AUGUSTIN, M. Wood Based Panels. **Handbook 1 - Timber Structures; Educational Materials for Designing Testing of Timber Structures**. Graz: Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology, 2008.

AWC, 2012. **Preliminary CLT Fire Resistance Testing Report**. AmericanWood Council. Retrieved 2014 from: <http://www.awc.org/Code-Officials/2012-IBC-Challenges/Preliminary-CLT-Fire-Test-Report-FINAL-July2012.pdf>.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Caracterização elástica da madeira de *Eucalyptus citriodora*. CERNE. Lavras, v. 09, n. 1, p. 69-83, 2003.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultrassom. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.

BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultrassom**. 2001. 105f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, SP.

BLASS, H. J.; FELLMOSE, P. Design of Solid Wood Panels with Cross Layers, **Proceedings of the WCTE**, Lahti, Finland, 2004.

BODIG J.; JAYNE, B. A. Mechanics of Wood and Wood Composites. **Krieger publishing company**, Malabar, Florida. p. 712, 1993.

BRANDNER, R. Cross laminated timber (CLT) in compression perpendicular to plane: Testing, properties, design and recommendations for harmonizing design provisions for structural timber products. **Engineering Structures**, p. 1-17. 2018.

BUCK, D.; WANG, X.; HAGMAN, O.; GUSTAFSSON, A. Bending properties of cross laminated timber (CLT) with a 45° alternating layer configuration, **Bioresources**, n.11(2), p. 4633-4644, 2016.

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. 2. ed. New York: CRC Press, 2006. v. 1. 399p.

CAMBIASO, F.; PIETRASANTA, M. Innovative timber construction: sustainability and high-performance building skin. *IACSIT Int. J. Eng. Technol.* v. 6 (1), p. 47-54, 2014.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 83-98, out./dez. 2009.

CARRASCO, E. V. M. **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada**. 1989. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1989.

CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JÚNIOR, A. P. **Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultrassom – fundamentos físicos e resultados experimentais**. Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, v. 1, n. 16, p. 27-37, 2003.

CARRASCO, E. V. M.; OLIVEIRA, A. L. C.; MANTILLA, J. N. R. Influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucaliptos. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.26, n.2, p-389-400, 2016.

CECCOTTI, A. New Technologies for Construction of Medium-Rise Buildings in Seismic Regions: The XLAM Case. *Structural Engineering International*. n. 18 (2), 2008, p. 156-165.

CECCOTTI, A.; FOLLESA, M.; LAURIOLA, M. P.; SANDHAAS, C. Sofie Project – Test Results on the Lateral Resistance of Cross-Laminated Wooden Panels. **First European Conference on Earthquake Engineering and Seismicity**, Geneva, Switzerland, 2006.

CHEN, Y. J. **Comparison of Environmental Performance of a Five-storey Building Built with Cross-laminated Timber and Concrete (Thesis)**. Department of Wood Science. 2012.

COSSOLINO, L. C. et al. Avaliação da coerência entre três métodos de determinação do módulo de elasticidade da madeira de *Pinnus Oocarpa*. *Madeira: Engenharia & Arquitetura*. p. 33-42. 2009.

COSTA, A. A. P. **Construção de edifícios com cross laminated timber (CLT)**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto – Portugal, 2013. 129 p.

CREPEL, P.; GAGNON, S. **Cross Laminated Timber: a Primer**. Special Publication 52, FPInnovations, 2010.

CRUZ, I. Passivo Ambiental das Empresas de Transporte Ferroviário de Carga, **Monografia**. Instituto Militar de Engenharia, 2002. Rio de Janeiro.

DAMASCENO, F. G. Reaproveitamento de dormentes de madeira da estrada de ferro Carajás para a cogeração de energia elétrica. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais - RBCIAMB*, n. 45, set 2017. p. 1-18.

DEMARZO, M. A.; PORTO, A. L. G. Indicadores de Sustentabilidade (LCA) e Análise do Ciclo de Vida para Madeira de Reflorestamento na Construção Civil. *Revista Madeira Arquitetura & Engenharia*, n.21, ano 8, Julho-Dezembro, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Especificação Técnica do Material. ETM 003: Dormentes.** (2014). Disponível em: < <http://www.dnit.gov.br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/especificacoes-tecnicas-de-materiais-e-servicos-ferroviarios-etm-ets>>. Acesso em: 09 de abr. 2017

DUJIC, B.; PUCELJ, J.; ZARNIC, R. Study of Innovative Wooden House Based on Racking Test of Solid Wall Panels. **Proceedings of the COST-E29**, Florence, Italy, 2004.

ECKER, T. W. P.; MIOTTO, J. L.; TURMINA, G. Painéis de madeira laminada colada cruzada para lajes: avaliação experimental mecânica sob diferentes níveis de consumo de adesivo. *Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)*, v. 26. p. 17-25, 2017.

ELLIS, B. R.; BOUGARD, A. J. Dynamic testing and stiffness evaluation of a six-storey timber framed building during construction. *Eng Struct*. v. 23(10): p.1232–1242, 2001.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood Chemistry, Ultra Structure, Reactions.** Berlim, Walter de Gruyter Publisher, 1984.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. *Ambiente Construído*, 2009. v 9(4): 157-174.

FINK, G.; KOHLER, J.; BRANDNER, R. Application of European design principles to cross laminated timber. *Engineering Structures*, 2018. p. 1-10.

FPInnovations. **CLT Handbook.** 2013, FPInnovations. Montreal, Canadá. Disponível em: <<https://fpinnovations.ca/Pages/home.aspx>> Acesso: 12 janeiro de 2014.

FRANGI, A.; BOCHICCHIO, A.; CECCOTTI, A.; LAURIOLA, M. P. Natural full-scale fire test on a 3-storey X-Lam timber building. *World Conference on Timber Engineering.* Miyazaki, Japan. 2008.

FRANGI, A.; FONTANA, M.; HUGI, E.; JOEBSTL, R. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire, *Fire Safety Journal*, 2009, v 44(8), 1078-1087.

FULLER, J. J.; ROSS, R. J.; DRAMM, J. R. Nondestructive evaluation of honeycomb and surface checks in red oak lumber. *Forest Products Journal*, v.45, n.5, p. 42-44, 1995.

GEIMER, R. L. Feasibility of producing reconstituted railroad ties on a commercial scale. United States – Department of Agriculture, Forest Service, *Forest Products Laboratory – FPL*. v. 411. 1982. 7 p.

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

GONÇALVES, R.; PUCCINI, C. T. Utilização do ultra-som na avaliação de aspectos de qualidade da madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: IBRAMEM, 2000. 1 CD-ROM.

GSELL, D.; FELTRIN, G.; SCHUBERT, S.; STEIGER, R.; MOTAVALLI, M. Cross laminated timber plates: Evaluation and verification of homogenized elastic properties. **Journal of Structural Engineering**, v. 133(1), p. 132-138, 2007.

HAMMOND, G. P.; JONES, C. I. Embodied energy and carbon in construction materials. **Proc. Institut. Civ. Eng. Energy**. V. 161 (2), p. 87-98. 2018.

HEEBINK, B. C.; SUPERFESKY, M. J. Recycling the wood cross-tie: Researchers develop and test laminated particle tie. *Railway Track and Structures*. **FOREST PRODUCTS LABORATORY- FPL**. Forest Service. 73 (7). Jul.1977. p. 26-31.

HRISTOVSKI, V.; DUJIC, B.; STOJMANOVSKA, M.; MIRCEVSKA, V. Full-scale shaking-table tests of XLam panel systems and numerical verification: specimen 1. **J. Struct. Eng.** v. 139 (11), p. 2010-2018, 2012.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. **Madeira: o que é e como pode ser processada e utilizada**. São Paulo: IPT, Divisão de Madeiras; 1985.

IZZI, M. et al. Seismic behaviour of Cross-Laminated Timber structures: A state-of-the-art review. **Engineering Structures**, v. 170. p. 42-52. 2018.

JESUS, R. M.; DARIO, F. R.; DIAZ, M. P. Espaçamento em *Acacia auriculiformis*. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993. Curitiba. **Anais...** São Paulo: SBS, p. 286-288, 1993.

JOHN, S.; NEBEL, B.; PEREZ, N.; BUCHANAN, A. H. **Environmental Impacts of Multistorey Buildings Using Different Construction Materials**. Report. Department of Civil and Natural Resources Engineering. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2009.

JOWETT, O. The thermal behaviour of cross-laminated timber construction and its resilience to summertime overheating. **In: Proceedings of PLEA 2011-the 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture**, p. 339-344, 2011.

KIRKEGAARD, A. **Aesthetic Qualities of Cross Laminated Timber**. (Doctorate dissertation). Department of Civil Engineering, The Faculty of Engineering and Science, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2012.

KNORZ, M.; TORNO, S.; KUILEN, J. W. Bonding quality of industrially produced cross-laminated timber (CLT) as determined in delamination tests. *Construction and Building Materials*, v. 133, p. 219-225, 2017.

KOTILAINEN, R. **Chemical Changes in Wood During Heating at 150-260 1C**. Tese (Doutorado em Química) - Jyväskylä University, Finlândia; 2000.

KRETSCHMANN, D. E. Mechanical Properties of Wood. **Wood handbook: wood as an engineering material**: chapter 5 Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 5.1-5.44.

KUILEN, J. W. G.; V.; CECCOTTI, A.; ZHOUYAN, X.; MINJUAN, H. Very Tall Wooden Buildings with Cross Laminated Timber. *Procedia Engineering*, v. 14, p. 1621–1628. 2011.

LEHMANN, S. Sustainable construction for urban infill development using engineered massive wood panel systems. *Sustainability*, v.4 (10), p. 2707-2742. 2012.

LEKHNITSKII, S.G. **Theory of Elasticity of an Anisotropic Body**, translated from the revised 1977 Russian edition. Mir, Moscow, 1981.

LESSA, R. **Viabilidade técnica do uso de madeira de Pinus taeda e Eucalyptus grandis na fabricação de painéis CLT – cross laminated timber**. Dissertação (Mestre em Engenharia Florestal), Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau – SC. 2017. 124 p.

LIAO, Y.; TU, D.; ZHOU, J.; ZHOU, H.; YUN, H.; GU, J.; HU, C. Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers, *Construction and Building Materials*, v. 132, p. 508-515, 2017.

LOBÃO, M.S.; LÚCIA, R.M.D.; MOREIRA, M.S.S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.28, n.6, p.889-894, 2004.

LU, Z.; ZHOU, H.; LIAO, Y.; HU, C. Effects of surface treatment and adhesives on bond performance and mechanical properties of cross-laminated timber (CLT) made from small diameter Eucalyptus timber. *Construction and Building Materials*. v. 161, p. 9-15, 2018.

MALCZYK, R. Cross-laminated timber in british Columbia. **In**: Presentation. CLT Symposium. February 8, 2011.

MANGALAM, A. **Electroheating Novel Process for Modifying Wood**. Dissertação (Mestrado) – College of Graduate Studies, University of Idaho, Moscow, 2005.

MARRA, A. A., **Technology of wood bonding**. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 453p.

MARWARDT, L. J.; WILSON, T. R. C. **Strength and related properties of woods grown in the United States**. U. S. Dep. Agr. Tech. Bull. Washington, D.C., No. 479, 67 p. 1935.

MASCIA, N. T. **Considerações a respeito da anisotropia da madeira**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 1991.

MENIS, A.; FRAGIACOMO, M.; CLEMENTE, I. Fire resistance of unprotected cross-laminated timber floor panels: Parametric study and simplified design. *Fire Safety Journal*, p.1-10. 2018.

MOHAMMAD, M.; GAGNON, S.; BRADFORD, D.; PODESTO, L. Introduction to cross-laminated timber. *Journal of Contemporary Wood Engineering*. 2013. v 22(2), 3-12.

NASCIMENTO, A.M.; LELIS, R.C.C.; COSTA, D.L.; OLIVEIRA, C.S. Comportamento de ligações adesivas em madeira de reflorestamento. *Revista Floresta e Ambiente*, UFRRJ; Seropédica. RJ, v. 9, n.1, p.54-62, 2002.

NOGUEIRA, M. **Determinação de Módulos de Elasticidade à Compressão de Madeira de *Pinus taeda* L. com o Uso de Ultra-Som**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônomicas) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

OLIVEIRA, F. G. R. **Contribuição ao Estabelecimento de Parâmetros para Ensaios Não-Destrutivos em Madeira Serrada por Meio de Ondas de Ultra-Som**. 2005. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

OTANI, L.B.; PEREIRA, A.H.A. **Guia de caracterização dos módulos elásticos e do amortecimento de madeiras e derivados utilizando as soluções Sonelastic**. GC 02-ATCP. 2013.

PALMA, H. A. L. **Determinação de Parâmetros Elásticos e de Resistência e a Influência da Madeira nas Propriedades de Compensados de *Pinus ellioHii Engelm.* e *Pinus taeda* L.** Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR. 1994, 183 p.

PASSARELLI, R. N. **Cross laminated timber: diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no Estado de São Paulo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. 192 p.

PASSOS, L. B. **Avaliação experimental do comportamento mecânico de dormentes reciclados de madeira visando redução do impacto ambiental**. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG. 2006. 405 p.

PEDROSO, C. B. **Propriedades de resistência e de rigidez da madeira obtidas a partir da avaliação acústica na árvore.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. 2014. 146 p.

PEI, S.; POPOVSKI, M.; VAN DE LINDT, J.W. Seismic design of a multi-story cross laminated timber building based on component level testing. *World 15*, v.19, 2012.

PEREIRA, M. C. M. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de madeira laminada colada cruzada.** Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. 107 p.

PEREIRA, M. C. M.; CALIL JUNIOR, C. Comparativos entre painéis de cross laminated timber (CLT) produzidos no Brasil. In: II Congresso Latinoamericano de Estructuras de Madera e II Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción, 2017. Buenos Aires. *Anais...* Buenos Aires – Argentina, p. 1-9, 2017.

PETRAUSKI, S.M.F.C. **Desenvolvimento e teste de pórticos treliçados feitos de laminado colado com madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus grandis*.** 1999. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

PFEIL, W.; PFEIL, M. S. **Estruturas de Madeira.** Rio de Janeiro, Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos, 6. ed. 2003.

PIZZOL, V. D.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. Caracterização elástica de compensados de madeira utilizados e reutilizados em fôrmas através de excitação por impulso. *Matéria (Rio J.)*, Rio de Janeiro, v. 22, supl. 1, e11928, 2017.

POLASTRI, A.; GIONGO, I.; ANGELI, A.; BRANDNER, R. Mechanical characterization of a pre-fabricated connection system for cross laminated timber structures in seismic regions. *Engineering Structures*, v. 167, p. 705-715, 2018.

POPOVSKI, M., KARACABEYLI, E. Seismic behaviour of cross-laminated timber structures. *World 15*, v.19, 2012.

POPOVSKI, M.; SCHNEIDER, J.; SCHWEINSTEIGER, M. Lateral load resistance of cross laminated wood panels. **In:** World Conference on Timber Engineering, p. 20-24, 2010.

PONCSÁK, S. et al. Effect of High Temperature Treatment on the Mechanical Properties of Birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science and Technology*, v. 40, n. 8, p. 647-663, 2006.

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

RINGHOFER, A.; BRANDNER, R.; BLAß, H. J. Cross laminated timber (CLT): Design approaches for dowel-type fasteners and connections. *Engineering Structures*, 2018. p. 1-13.

ROBERTSON, A. B.; LAM, F. C. F.; COLE, R. J. A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: Laminated timber or reinforced concrete, *Buildings*, v. 2, p. 245-270, 2012.

ROFFAEL, R; SCHALLER, K. Einfluss Thermischer Behandlung auf Cellulose. *Holz Roh-Werkst*, v. 29, p. 275-278, 1971.

ROSS R. J.; PELLERIN R. F. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 1994.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. NDE of Green Material with Stress Waves: preliminary results using dimension lumber. *Forest Products Journal*, v. 41, n. 6, p. 57-59, 1991.

SCHAFFER, E. L. Effect of Pyrolytic Temperatures on the Longitudinal Strength of Dry Douglas Fir. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 1, n. 4, p.319-329, 1973.

SCHNIEWIND, A. P. **Concise Encyclopedia of Wood and Wood-Based Materials**. Nova York: Pergamon Press, 1985. p. 271-273.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. Theories and mechanisms of adhesion. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Ed.). **Handbook of adhesive technology**. New York: M. Dekker, 1994. p. 19-32.

SEGUNDINHO, P. G. A.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; CALIL JUNIOR, C. Aplicação do método de ensaio 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.

SKOGSTAD, H.; GULLBREKKEN, L.; NORE, K. Air leakages through cross laminated timber (CLT) constructions. In: 9th Nordic Symposium on Building Physics. 2011. Retrieved 2014 from: <http://www.tretekknisk.com/fullstory.aspx?m¼1585&amid¼14888>.

SERRANO, E.; ENQUIST, B. Compression strength perpendicular to grain in cross-laminated timber (CLT). *World Conference on Timber Engineering (WCTE)*, Riva del Garda, Italy, 2010.

SHARIFNIA, H.; HINDMAN, D. P. Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of southern yellow pine cross laminated timbers. *Construction and Building Materials*, v. 156, p. 314-320, 2017.

SILVA, C.; BRANCO, J.M.; LOURENÇO, P.B. MLCC na construção em altura. Congresso Construção. In: Congresso Nacional, 2012, Coimbra- Portugal. *Anais...* Coimbra - Portugal. p. 1-12, 2012.

SILVA, C. A.; CHIRINÉA, M. L. B.; BARROS, M. M. S. B. Cross Laminated Timber (CLT): uma tecnologia construtiva viável no Brasil? In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 2016.

SILVA, C. V.; BRANCO, J. M.; LOURENÇO, P. B. **A Project Contribution to the Development of Sustainable Multi-storey Timber Buildings**. Report. Department of Civil Engineering. University of Minho, Guimarães, Portugal. 2013.

SILVA, T. S. B. **Explorar a Potencialidade de um Edifício Construído com Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC). Da organização espacial interior à relação interior – exterior**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), Escola de Arquitectura, Universidade do Minho – Portugal, 2014, 144 p.

STEIGER, R.; GÜLZOW, A. Validity of bending tests on strip-shaped specimens to derive bending strength and stiffness properties of cross-laminated solid timber (X-lam). **In: The Future of Quality Control for Wood and Wood Products**, p. 4-7, 2010.

STEIGER, R.; GULZOW, A.; GSELL, D. Nondestructive evaluation of elastic material properties of cross-laminated timber. **In: Conference COST E53. 29e30 October 2008, Delft, The Netherlands**, pp. 171e182. Retrieved 2013 from: http://www.coste53.net/downloads/Delft/Presentations/COSTE53-Conference_Delft_Steiger_Guelzow_Gsell.pdf.

STURZENBECHER, R.; HOFSTETTER, K.; BOGENSPERGER, T. H.; SCHICKHOFER, G.; EBERHARDSTEINER, J. Development of high-performance strand boards: engineering design and experimental investigations. **Wood Sci. Technol.** 2010. v 44. 13–29.

SUCENA, M. P. **Notas de aula da Disciplina Sistemas de Transporte Ferroviário**. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2004.

TORRES, J. T. C. **Sistemas construtivos modernos em madeira**. Dissertação (mestrado): Universidade do Porto, Porto – Portugal, 2010. 156 p.

TSOUMIS, G. **Science and Technology of Wood, Structure. Properties and Utilization**. Van Nostrand Reinhold, New York. 1991.

VESSBY, J.; ENQUIST, B.; PETERSSON, H.; ALSMARKER, T. Experimental study of cross-laminated timber wall panels. **Eur. J. Wood Prod.** 67: p. 211–218, 2009.

VITAL, B. R.; ANDRADE, A. M. de; VALENTE, O. F.; CAMPOS, J. C. C. Influência da casca no rendimento e qualidade de carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 41-42, p. 44-49, jan./dez. 1989.

VITAL, B.R.; MACIEL, A.S.; DELLA LUCIA, R.M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, v. 30, nº 4, p. 637-644, 2006.

WAUGH, A., Bigger, taller, better. PowerPoint presentation. **In: Touch with Timber Conference**. 18th May. London, England, 2010.

WIESNER, F.; BISBY, L. The structural capacity of laminated timber compression elements in fire: A meta-analysis. **Fire Safety Journal**, p.1-12. 2018.

WONG, B.; TEE, K. The Fire Performance of Exposed Timber Panels. World Academy of Science, *Engineering and Technology*, v. 8(10), p.1045-1051. 2014.

WOODWORKS. Introducing Cross-laminated Timber. New Opportunities for Timber Construction. **WoodWorks Presentation**. 2013. Retrieved 2014 from: <http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/2013-14-Q4-Introducing-CLT.pdf>.

WRIGHT, K. Researching internet-based populations: advantages and disadvantages of online survey research, online questionnaire authoring software packages, and web survey services. *J. Comput. Med. Commun.* v.10, 2005.

XU, S. A Review on Cross Laminated Timber (CLT) and its Possible Application in North America. *WOOD 493*. 2013. 33 p.

YEH, B.; GAGNON, S.; WILLIAMSON, T.; PIRVU, C. The cross-laminated timber standard in north America, *Wood Design Focus*. 2010. v.22. n 2.

ZANGIÁCOMO, A. L., ROCCO LAHR, F. A.; Espécies tropicais alternativas na produção de madeira laminada colada In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2002. Uberlândia-MG. *Anais...* Uberlândia-MG: UFMG, (arquivo de computador), 2002.