

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DAS
CONSTANTES ELÁSTICAS DA MADEIRA POR
ULTRASSOM**

ALEX JULIO TRINCA

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DAS
CONSTANTES ELÁSTICAS DA MADEIRA POR
ULTRASSOM**

Tese de Doutorado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Agrícola na área
de concentração de Construções Rurais e
Ambiência

ALEX JULIO TRINCA

ORIENTADORA: PROF^a DR^a RAQUEL GONÇALVES

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

T736m Trinca, Alex Julio
Metodologia para determinação das constantes
elásticas da madeira por ultrassom / Alex Julio Trinca. --
Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Raquel Gonçalves.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Elasticidade. 2. Resistência ao cisalhamento. 3.
Madeira. 4. Ultrassom. 5. Madeira - Propriedades
mecânicas. I. Gonçalves, Raquel. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Methodology for determination of elastic constants of wood
by ultrasound

Palavras-chave em Inglês: Elasticity, Shear, Wood, Ultrasound, Wood -
Mechanical properties

Área de concentração: Construção Rurais e Ambiente

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Carlos Alberto Szucs, Francisco Antonio Rocco Lahr,
Joaquim Carlos Gonzalez, Julio Soriano

Data da defesa: 21/02/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Alex Julio Trinca**, aprovada pela Comissão Julgadora em 21 de fevereiro de 2011, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

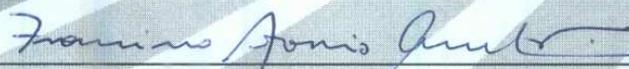


Profa. Dra. Raquel Gonçalves – Presidente e Orientadora
Feagri/Unicamp

FEAGRI



Prof. Dr. Carlos Alberto Szucs - Membro Titular
UFSC

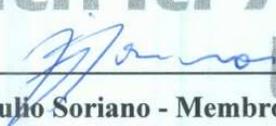


Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr - Membro Titular
EESC/USP



Prof. Dr. Joaquim Carlos Gonzalez - Membro Titular
UnB

Faculdade de Engenharia Agrícola
Unicamp



Prof. Dr. Julio Soriano - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Dedicatória.

Dedico este trabalho à três mulheres especiais na minha vida.

Minha mãe, Ione, que me criou

Minha esposa, Regina, que convive comigo.

Minha orientadora e amiga, Raquel Gonçalves.

Pessoas que nunca desistiram de mim.

“O sucesso é uma consequência e não um objetivo.”

Gustave Flaubert

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Doutora Raquel Gonçalves, pelo incentivo e apoio para o desenvolvimento deste trabalho, sem o qual, certamente não conseguiríamos delinear os objetivos e atingir as metas propostas, mais que tudo pela sua amizade .

À Prof.^a Doutora Voichita Bucur por estar sempre pronta a nos ajudar.

Ao departamento regional do SENAI São Paulo pelo apoio e incentivo para execução deste trabalho. Em especial ao SENAI escola ``Luiz Scavone``. Nas pessoas do Professor Amélio Vieira Neto e professora Eliana Aparecida Bisetto de Andrade.

Aos professores e funcionários da FEAGRI-UNICAMP, pela dedicação e pela ajuda nos diversos momentos nos quais foram solicitados. Em especial aos professores Prof Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhaes e Prof. Dr Julio Soriano.

Tenho de agradecer em muito ao corpo do laboratório de ensaios não destrutivos e principalmente a amizade de Fernando Augusto Franco Batista, Chiara Barros Secco, Tarik Ottoboni, Bruno Pellis Piva, Cinthya Bertoldo sem o que este trabalho não teria sido realizado.

Aos amigos Marcus Vinicius Massak, Gisleiva Cristina Ferreira dos Santos e Milton Giacom Junior e Domingos G. P. Cerri pelo incentivo e apoio.

A minha esposa Regina e minhas filhas Iasmin e Naiara que com muita compreensão me apoiaram em todos os momentos.

As empresas: Madreira Japi, Flayban Comercio de Madeira e Pupo Madeiras e Esquadilhas, que me auxiliaram no fornecimento das amostras

À **FAPESP** - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo auxílio financeiro à pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIMBOLOS/ABREVIATURAS	XVIII
RESUMO	XXI
ABSTRACT	XXIII
1. INTRODUÇÃO	<u>1</u>
1.1. Justificativa para o desenvolvimento do trabalho	<u>2</u>
1.2. OBJETIVOS	<u>4</u>
1.2.1. Objetivo Geral	<u>4</u>
1.2.2. Objetivos específicos	<u>4</u>
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	<u>5</u>
2.1. Ensaio de propagação de ondas: fundamentação teórica	<u>5</u>
2.1.1. Aspectos Gerais	<u>5</u>
2.1.2. Obtenção dos termos da matriz de rigidez em ensaios utilizando a madeira	<u>21</u>
2.2. Ensaio de propagação de ondas: aplicações	<u>24</u>
2.2.1. Correlações com o módulo de elasticidade longitudinal e utilização na classificação	<u>25</u>
2.2.2. Determinação das constantes elásticas	<u>26</u>
2.3. Coeficiente de Poisson e relações entre parâmetros elásticos da madeira	<u>45</u>
2.4 Aspectos gerais relativos à dimensão do corpo de prova e à frequência dos transdutores para a determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom	<u>50</u>
2.5 Acoplamento do transdutor e peça à ser ensaiado	<u>53</u>
2.6. Obtenção dos termos da matriz de flexibilidade	<u>54</u>
2.6.1. Aspectos teóricos da matriz de flexibilidade	<u>54</u>
2.6.1.1. Componentes de tensão	<u>54</u>
2.6.1.2. Componentes de Deformação	<u>55</u>
2.6.1.3. Parâmetros elásticos dos materiais	<u>57</u>

2.6.1.4. Matriz de flexibilidade – aspectos práticos para a determinação utilizando ensaio de compressão estática	<u>64</u>
2.7. Conclusões a respeito da revisão bibliográfica	<u>71</u>
3.MATERIAL E MÉTODOS	<u>73</u>
3.1.Material	<u>73</u>
3.2. Principais equipamentos e instrumentação	<u>74</u>
3.3. Justificativa para a adoção dos principais parâmetros do ensaio	<u>75</u>
3.3.1. Geometria do corpo de prova	<u>75</u>
3.3.2. Dimensão do corpo de prova, frequência do transdutor e ângulo de retirada	<u>76</u>
3.4. Definição final da frequência do transdutor e detalhamento das dimensões e forma de obtenção dos corpos de prova	<u>79</u>
3.4.1. Corpo de prova prismático	<u>79</u>
3.4.2. Corpo de prova em disco multifacetado	<u>81</u>
3.4.3. Corpo de prova em tetraetro	<u>83</u>
3.5. Ensaio de ultrassom	<u>84</u>
3.5.1. Prismas	<u>84</u>
3.5.2. Discos multifacetados	<u>85</u>
3.5.3. Tetraedros	<u>88</u>
3.6. Ensaio de compressão nos corpos de prova prismáticos	<u>89</u>
3.6.1. Aspectos Gerais	<u>89</u>
3.6.2. Detalhamento da metodologia de aquisição de dados durante o ensaio de compressão estática	<u>92</u>
3.6.2.1. Corpo de prova longitudinal	<u>92</u>
3.6.2.2. Corpo de prova radial	<u>92</u>
3.6.2.3. Corpo de prova tangencial	<u>93</u>
3.6.2.4. Corpo de prova inclinado no plano LT - 45° em relação ao eixo	<u>93</u>
3.6.3. Determinação dos parâmetros elásticos	<u>95</u>
3.7. Simulações	<u>96</u>
3.7.1. Condição A: Utilização da NBR 7190 (1997)	<u>96</u>
3.7.2. Condição B: Utilização da NBR 7190 (1997) e de relações apresentadas por Bodig e Jayne (1984)	<u>97</u>
3.7.3. Condição C: Valores das propriedades obtidas por ultrassom no prisma (Tabela 4.15)	<u>97</u>

4. RESULTADOS e DISCUSSÕES	<u>98</u>
4.1. Determinação de erros de medição e de variabilidade	<u>98</u>
4.2. Matriz de rigidez e de flexibilidade	<u>106</u>
4.3. Avaliação do melhor ângulo para a determinação dos elementos de fora da diagonal da matriz de rigidez.	<u>119</u>
4.4. Simulações	<u>121</u>
4.5. Custos do ensaio	<u>123</u>
5. CONCLUSÕES	<u>125</u>
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	<u>127</u>

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1	Propagação de uma onda ao longo do eixo x_1 de simetria de um sólido ortotrópico.Fonte: Mascia(1991)	13
Figura 2.2	Propagação de uma onda ao longo do plano 12 de simetria do sólido.Fonte: Mascia(1991)	19
Figura 2.3	Esquema do corpo-de-prova retirado em ângulo (no caso 45°). Fonte: Mascia (1991)	22
Figura 2.4	Corpo de prova em poliedro de 26 faces. Fonte: François (1995)	38
Figura 2.5	Posição dos corpos-de-prova e dos extensômetros. Fonte: Mascia(1991)	69
Figura 3.1	Prancha de garapeira (a) e de Eucalipto saligna (b) durante a confecção dos corpos de prova	73
Figura 3.2	Esquema de retirada dos corpos de prova nos eixos de simetria e em ângulo com os planos principais. Adaptado de Mascia (1991)	81
Figura 3.3	Disco multifacetado sendo confeccionado em máquina CNC no SENAI de Itatiba.	82
Figura 3.4	Montagem dos corpos de prova para entrada no CNC (a) e verificação dos ângulos das faces após usinagem (b)	82
Figura 3.5	Corpo de prova em disco multifacetado (b)	83
Figura 3.6	Corpos de prova em forma depoliedro.	84
Figura 3.7	Exemplo de ensaio no corpo de prova prismático.	85
Figura 3.8	Ensaio de ultrassom no disco multifacetado na direção radial (a) e a 45° no plano RL	87

Figura 3.9	Ensaio de ultrassom no poliedro na direção radial (a) e a 45° no plano RL (b)	88
Figura 3.10	Esquema de montagem do ensaio para obtenção de G_{LT} . Fonte: Mascia (1991).	90
Figura 3.11	Corpo de prova instrumentado para o ensaio estático de compressão. No caso (a) trata-se de um corpo de prova tangencial de 50 mm x 50 mm x 150 mm, no caso (b) corpo de prova de 50 mm x 50 mm x 150 mm retirado com ângulo de 45° e no caso (c) corpo de prova de 30 mm x 30 mm x 30 mm retirado também em ângulo de 45°	91
Figura 3.12	Montagem dos corpos de prova na máquina de ensaio (a) e canais do sistema de aquisição de dados durante execução do ensaio(b)	91
Figura 3.14	Exemplo de colocação dos gages em corpos de prova retirados com inclinação de 45°	94
Figura 3.15	Exemplo de gráfico de Tensão (Pa) x Deformação (mm) obtido com a manipulação dos dados no Software MatLab.	95
Figura 4.1	Resultados comparativos de velocidades nas diferentes geometrias de corpos de prova. Espécie: Garapeira	105
Figura 4.2	Resultados comparativos de velocidades nas diferentes geometrias de corpos de prova. Espécie: Cupiúba	105
Figura 4.3	Resultados comparativos de velocidades nas diferentes geometrias de corpos de prova. Espécie: Eucalipto saligna	106

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1	Relação entre as notações tensorial e matricial	10
Tabela 2.2	Obtenção dos termos da diagonal da matriz de rigidez [C] da madeira em ensaios de ultrassom.	22
Tabela 2.3	Constantes técnicas de três espécies de madeira (MPa). Umidade \cong 14%. Adaptado de Preziosa <i>et al.</i> (1981).	28
Tabela 2.4	Espécies de madeira e condição de umidade dos ensaios de Preziosa(1982).	29
Tabela 2.5	Constantes técnicas obtidas por meio de ultrassom. Adaptado de Preziosa (1982)	30
Tabela 2.6	Comparação de resultados das constantes elásticas obtidas por ultrassom (U) e por ensaios estáticos de Hearman (1966 citado por PREZIOSA, 1982) – S1; Schelder (sem referência, citado por PREZIOSA, 1982) – S2 e Gunnerson <i>et al.</i> (1973 citado por PREZIOSA, 1982) – S3. Adaptado de Preziosa (1982).	31
Tabela 2.7	Constantes técnicas obtidas por meio de ultrassom. Adaptado de Bucur e Archer (1984).	34
Tabela 2.8	Resultados médios apresentados por Sinclair e Farshad. (1987)	35
Tabela 2.9	Elementos da matriz de rigidez obtidos por ultrassom (MPa). Adaptado de Bucur e Perrin (1988)	37
Tabela 2.10	Resumo dos resultados dos parâmetros elásticos obtidos por François (1995).	40
Tabela 2.11	Parâmetros elásticos obtidos por Keunecke <i>et al.</i> (2007) utilizando ensaio de ultrassom	43

Tabela 2.12	Coeficientes de rigidez determinados por Gonzalez <i>et al.</i> (2001) utilizando ultrassom	44
Tabela 2.13	Resultados dos coeficientes de rigidez (CLL) obtidos por ultrassom e dos módulos de elasticidade obtidos em flexão estática (E_{L1} e E_{L2}) utilizando, respectivamente, as normas AFNOR (1942 citada por GONÇALEZ <i>et al.</i> 2001) e pela COPANT (1972, citada por GONÇALEZ <i>et al.</i> 2001) .	45
Tabela 2.14	Relações dos termos da matriz de flexibilidade (10^{-5}) obtidas em ensaio de compressão.	48
Tabela 2.15	Valores de coeficientes de Poisson obtidos por ultrassom. Fonte: Bucur (2006)..	48
Tabela 2.16	Valores dos coeficientes de Poisson sugeridos por Bodig e Jayne (1982) para dicotiledôneas .	50
Tabela 2.17	Resumo da posição dos corpos de prova e dos extensômetros associados à determinação das constantes de flexibilidade da madeira. Adaptado de Mascia (1991)	69
Tabela 3.1	Características dimensionais dos transdutores	76
Tabela 3.2	Valores aproximados dos comprimentos de onda esperados para cada frequência de transdutor	76
Tabela 4.1	Resultados médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom utilizando corpos de prova prismáticos de 30 mm x 30 mm x 90 mm. Espécie Garapeira	99
Tabela 4.2	Resultados médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom utilizando os discos multifacetados. Espécie Garapeira.	99
Tabela 4.3	Resultados médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom utilizando os tetraedros. Espécie Garapeira.	100
Tabela 4.4	Resultados médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom utilizando	100

corpos de prova prismáticos de 30 mm x 30 mm x 90 mm. Espécie Cupiúba.

Tabela 4.5	Resultados médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom utilizando os discos multifacetados. Espécie Cupiúba.	101
Tabela 4.6	Resultados médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom utilizando os tetraedros. Espécie Cupiúba.	101
Tabela 4.7	Resultados médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom utilizando corpos de prova prismáticos de 30 mm x 30 mm x 90 mm. Espécie Eucalipto saligna.	102
Tabela 4.8	Resultados médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom utilizando os discos multifacetados. Espécie Eucalipto saligna.	102
Tabela 4.9	Resultados médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom utilizando os tetraedros. Espécie Eucalipto saligna.	103
Tabela 4.10	Velocidade, coeficientes de rigidez e erros obtidos para a madeira Beech e Douglas fir. Adaptado de Bucur, (2006).	103
Tabela 4.11	Erros de medição das velocidades (%).	104
Tabela 4.12.	Coeficientes médios da matriz de rigidez (MPa) para cada tipo de corpo de prova. Espécie: Garapeira.	107
Tabela 4.13	Coeficientes médios da matriz de rigidez (MPa) para cada tipo de corpo de prova. Espécie: Cupiúba.	107
Tabela 4.14	Coeficientes médios da matriz de rigidez (MPa) para cada tipo de corpo de prova. Espécie: Eucalipto saligna.	108
Tabela 4.15	Parâmetros elásticos (médias e intervalo de confiança) obtidos pela inversão da matriz de rigidez e no ensaio estático de compressão. Espécie: Garapeira.	108

Tabela 4.16	Parâmetros elásticos médios, obtidos pela inversão da matriz de rigidez, em cada tipo de corpo de prova. Espécie: Cupiúba.	109
Tabela 4.17.	Parâmetros elásticos médios, obtidos pela inversão da matriz de rigidez, em cada tipo de corpo de prova. Espécie: Eucalipto saligna.	109
Tabela 4.18.	Diferenças médias (%) entre os valores das constantes de rigidez obtidas por ultrassom e as propriedades elásticas obtidas pelo ensaio estático.	110
Tabela 4.19.	Coefficientes de correlação (R) entre os parâmetros da matriz de rigidez na direção longitudinal (C_{LL}), radial (C_{RR}) e tangencial (C_{TT}) e os módulos de elasticidade nas mesmas direções (E_L , E_R e E_T).	112
Tabela 4.20	Diferenças médias (%) entre os valores das constantes elásticas obtidas por ultrassom e obtidas pelo ensaio estático.	113
Tabela 4.21	Análise de equivalência estatística entre os resultados do ensaio de ultrassom e de compressão estática.	114
Tabela 4.22	Valores médios das relações dos termos da matriz de flexibilidade (10^{-5}) obtidas no ensaio de compressão estática.	116
Tabela 4.23	Relações médias dos termos da matriz de flexibilidade (10^{-5}) obtidas no ensaio de ultrassom.	117
Tabela 4.24	Relações médias entre parâmetros elásticos longitudinais e transversais.	118
Tabela 4.25	Erros relativos dos termos de fora da diagonal da matriz de rigidez (C_{12} , C_{13} e C_{23}) em relação ao ângulo de propagação α . Corpo de prova em disco multifacetado.	120
Tabela 4.26.	Resultados médios de deformações específicas (10^{-6}) obtidas nos ensaios uniaxiais de compressão.	121

Tabela 4.27	Valores, em módulo, de deformações (10^{-6}) obtidas em simulações de ensaios uniaxiais.	122
Tabela 4.28	Relação entre os resultados de deformações obtidos no ensaio estático e nas simulações utilizando propriedades obtidas nas condições A, B e C.	122
Tabela 4.29	Composição de custo (US\$) para montagem de infra-estrutura para ensaios de ultrassom e estático de compressão	124

LISTA DE SIMBOLOS/ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
E_L	Módulo de Elasticidade na direção paralela às fibras
E_R	Módulo de Elasticidade na direção radial às fibras
E_T	Módulo de Elasticidade na direção tangencial às fibras
L	Longitudinal
R	Radial
T	Tangencial
LR	Longitudinal Radial
LT	Longitudinal Tangencial
RT	Radial tangencial
G_{LR}	Módulo de elasticidade transversais longitudinal radial
G_{LT}	Módulo de elasticidade transversais longitudinal tangencial
G_{RT}	Módulo de elasticidade transversais radial tangencial
μ_{LR}	Coefficientes de Poisson longitudinal radial
μ_{RL}	Coefficientes de Poisson radial longitudinal
μ_{RT}	Coefficientes de Poisson radial tangencial
μ_{TR}	Coefficientes de Poisson tangencial radial
μ_{LT}	Coefficientes de Poisson longitudinal tangencial
μ_{TL}	Coefficientes de Poisson tangencial longitudinal
σ_{ik}	Tensões
v_i	Velocidade
C_{iklm}	Constantes de rigidez do material

ϵ_{lm}	Deformações.
i, k, l e m	Índices
1,2,3 e 4	Índices
ρ	Densidade aparente
u_{0i}	Amplitude do deslocamento
k_j	Componentes do vetor de onda
α_i	Cossenos diretores do vetor deslocamento
δ_{im}	Tensor unitário ou delta de Kronecker
C	Constantes elásticas
λ_{im}	Tensor de Christoffel
u	Vetor deslocamento da partícula
n	Vetor unitário normal às frentes de onda
α	Angulo
S	Matriz de flexibilidade
E_M	Flexão estática
f_m	Módulo de ruptura na flexão
U	Constantes elásticas obtidas por ultrassom
UR	Umidade relativa
PSF	Ponto de saturação das fibras
R	Coefficientes de correlações
AFNOR	Associação Francesa de normatização
COPANT	Comissão Panamericana de Normas Técnicas
λ	Comprimento de onda
L	Comprimento de percurso da onda

N	Comprimento do campo próximo
D	Diâmetro do elemento cristalino
f	Frequência do transdutor
ω	Energia armazenada
ν_{ij}	Coefficiente de Poisson
τ	Tensão tangencial no plano inclinado
NBR	Norma Brasileira
M_t	Momento de torção

RESUMO

A madeira apresenta grande potencial para ser utilizada como material estrutural, por possuir propriedades mecânicas compatíveis com essa utilização e por ser material ecologicamente correto. Proveniente de árvores, cujo crescimento se faz a partir de energia limpa e, adicionalmente, estoca carbono, a madeira, embora em menor grau, continua atuando na mitigação do carbono enquanto está sendo utilizada como material. No Brasil, no entanto, esse material, tão nobre e reconhecido em outros países, não tem sido adequadamente utilizado. Uma das razões para o uso reduzido e inadequado da madeira em elementos estruturais em nosso país é a falta de conhecimento de suas propriedades. Essa questão, aliada à complexidade em termos de comportamento, dificulta seu correto dimensionamento, principalmente considerando o desenvolvimento de programas computacionais de simulação e de cálculo estrutural. Sendo material considerado ortotrópico, para a caracterização da madeira é necessária a determinação de 12 constantes elásticas - três módulos de elasticidade longitudinais (E_L , E_R , E_T), três módulos de elasticidade transversais (G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}) e seis coeficientes de Poisson (μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TR} , μ_{LT} , μ_{TL}). Essa pesquisa teve como objetivo principal propor e avaliar metodologia de ensaio utilizando ultrassom para a determinação das constantes elásticas da madeira. Para os ensaios foram adotadas três espécies - Eucalipto (*Eucalyptus saligna*), Garapeira (*Apulleia leiocarpa*) e Cupiúba (*Goupia glabra*). Os ensaios de ultrassom foram realizados utilizando-se as geometrias de corpos de prova – prismática, disco multifacetado e poliedro de 26 faces. Ensaios estáticos de compressão foram realizados para a comparação dos resultados. Os valores dos módulos de elasticidade longitudinais e de cisalhamento, determinados utilizando-se a metodologia de ensaio por ultrassom apresentada nessa pesquisa, foram compatíveis com os obtidos nos ensaios de compressão estática. Para a obtenção dos módulos longitudinais e de cisalhamento não houve destaque de nenhum tipo de geometria de corpo de prova. Para a obtenção dos coeficientes de Poisson a geometria prismática apresentou resultados mais compatíveis com os obtidos no ensaio de compressão, seguido do disco e, por último do poliedro. Os coeficientes de Poisson determinados por ultrassom apresentaram resultados discrepantes dos obtidos no ensaio de compressão estática, principalmente para os planos RL e LR. No entanto, os valores foram compatíveis com resultados obtidos por outros autores que utilizaram metodologia semelhante. Além disso, os coeficientes de Poisson determinados pelo ensaio estático também não foram compatíveis com

resultados médios indicados na literatura, comprovando que a determinação desses coeficientes da madeira apresenta dificuldades qualquer que seja o método utilizado. O ensaio de ultrassom, para a determinação dos parâmetros elásticos da madeira é mais fácil e mais econômico do que o ensaio estático de compressão e seus resultados são igualmente adequados, principalmente para a determinação dos módulos de elasticidade longitudinal e de cisalhamento.

Palavras-chave: módulo de elasticidade longitudinal, módulo de cisalhamento, coeficiente de Poisson, matriz de rigidez.

ABSTRACT

Wood offers a great potential for being used as structural material, considering the suitability of its mechanical properties and the fact that it is an environmentally correct material. Originating from trees, which growth takes place from clean energy, and additionally stocks carbon, even if in a lower degree, wood continues carrying out a carbon mitigation process while applied as material. However, such material, acknowledged as noble by other countries, has not been properly used in Brazil, where its reduced and inadequate application in structural elements is explained by a lack of knowledge about wood properties. Along with the complexity of wood in terms of behavior, that issue has made it difficult to accurately dimension wood, especially when we also take into account the fast development of simulation and structural calculus software. Considered as an orthotropic material, wood characterization requires establishing 12 elastic constants - the three Young's moduli (E_L , E_R , E_T), the three shear moduli (G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}) and the six Poisson's ratios (μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TR} , μ_{LT} , μ_{TL}). The present research aims at proposing and evaluating test methodology using ultrasound in order to establish wood elastic constants. For such tests three specimen have been used – Eucalipto saligna (*Eucalyptus saligna*), Garapeira (*Apulleia leiocarpa*) and Cupiúba (*Goupia glabra*). The ultrasonic tests were performed based on three different geometries of test specimen – cubic prism, multifaceted disc and polyhedron with 26 faces. Static tests of compression were carried out in order to compare results. The values of the Young and shear moduli determined using the ultrasonic test methodology showed compatibility with static tests. The Poisson's ratios determined by ultrasonic tests showed results contradicting from those obtained using compressions test, especially for RL and LR. However, values were compatible with results obtained by other authors using similar methodology. Furthermore, the Poisson's ratios determined by the static test were also not compatible with the average results indicated in the literature, proving how challenging it is to determine wood coefficients, whatever is the method applied. No highlight was noticed in any type of geometry of test specimen. For the Poisson's ratios the prismatic geometry showed results more compatible to those obtained in the compression test, followed by the disc and afterwards by the polyhedron, respectively. For establishing elastic parameters of wood, the

ultrasound test is easier and of lower cost compared to static compression test, and its results are similarly suitable, mainly when determining Young' and shear moduli.

Key-words: Young's modulus, shear modulus, Poisson ratio, Stiffness matrix.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, país que detém uma das maiores florestas do planeta, a madeira ainda é pouco utilizada, sendo em grande parte exportada em sua forma in natura, sem que a ela seja agregado valor de beneficiamento. Isso ocorre, em grande parte, porque este material requer, para sua correta utilização, muita tecnologia, tanto no que se refere aos procedimentos de processamento quanto na qualificação de propriedades para a sua adequada aplicação. Um dos vários problemas enfrentados pela indústria da madeira é a não classificação, dificultando a elaboração de Projetos de Engenharia, nos quais o conhecimento das propriedades do material se torna fundamental. Essa questão se torna ainda mais crítica quando se verifica o rápido desenvolvimento de programas computacionais de cálculo estrutural, os quais vêm tornando o uso de modelagem estrutural cada dia mais acessível aos projetistas. Além disso, a modelagem estrutural é uma importante ferramenta para a realização de simulações, o que também permite a redução de tempo e de material em pesquisas e desenvolvimento de novas propostas de esquemas estruturais. Essas simulações podem ser muito úteis, tanto no caso de projetos de estruturas civis quanto no caso da busca por novos modelos de embalagens e mobiliários.

Nesse contexto os profissionais e as empresas que desejam utilizar a madeira de forma mais adequada, buscam métodos que permitam a obtenção dos parâmetros de engenharia necessários para a execução de projetos com certificação de qualidade de seus produtos, o que muitas vezes não podem ser alcançados com o conhecimento apenas do Módulo de Elasticidade na direção paralela às fibras (E_L). Em várias situações de projetos é necessário, além de E_L , conhecer as propriedades na direção perpendicular as fibras (E_R , E_T), os módulos transversais e os coeficientes de Poisson, visto que a madeira é um material Ortotrópico e, portanto, possui propriedades mecânicas diferenciadas em três direções perpendiculares entre si, Longitudinal (L), Radial (R) e Tangencial (T) e suas interações, Longitudinal Radial (LR), Longitudinal Tangencial (LT) e Radial tangencial (RT).

Para os materiais ortotrópicos há, portanto, a necessidade de se conhecer doze parâmetros que descrevem o comportamento elástico: três módulos de elasticidade longitudinais (E_L , E_R , E_T), três módulos de elasticidade transversais (G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}) e seis coeficientes de Poisson (μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TR} , μ_{LT} , μ_{TL}).

Todavia, determinar essas propriedades por métodos de ensaio convencionais é dispendioso, complicado e trabalhoso, além de exigir equipamento de elevado custo em função da capacidade de carga requerida, o que faz com que dificilmente esses dados estejam disponíveis no país.

Por outro lado, a possibilidade de obtenção desses parâmetros de forma menos dispendiosa possibilitará, a engenheiros, arquitetos e pesquisadores, o uso adequado de ferramentas de modelagem, permitindo a simulação e o estudo de sistemas estruturais mais adequados às diferentes aplicações que utilizam a madeira.

Assim, a hipótese desta pesquisa é a de que a metodologia de determinação das constantes elásticas por ultrassom, detalhadas e propostas neste estudo, se constitui em alternativa viável, do ponto de vista técnico (precisão) e econômico (ensaio mais barato), aos ensaios estáticos convencionais. Desta forma, a primeira parte da pesquisa foi focada na metodologia propriamente dita, uma segunda parte na comparação de resultados com os obtidos em ensaios estáticos de compressão e um terceiro foco foi a utilização dos resultados em modelagem estrutural onde foram realizadas três simulações em uma situação de carregamento.

A proposição, adequação e utilização dessa metodologia se constituem em elemento inédito dessa pesquisa no país e ferramenta de grande importância para pesquisadores que atuam na área da madeira e das estruturas de madeira.

1.1 Justificativa para o desenvolvimento do trabalho

No Brasil, durante muitos anos se considerou que a madeira para a produção de elementos para comercialização deveria apresentar características especiais, como usinabilidade, resistência mecânica elevada, dimensões de peças avantajadas, dentre outras, o que fez com que o mercado fosse bastante restrito em relação às espécies utilizadas para esse fim.

Atualmente, devido à escassez de matéria prima considerada como clássica na fabricação de móveis, de elementos estruturais, de paletes e outros componentes, está se

tornando necessária a utilização de espécies pouco conhecidas no segmento de madeira para aplicação estrutural.

Como consequência, fez-se necessário o desenvolvimento de tecnologia que permita a utilização dos mais variados tipos de madeira, além do desenvolvimento de ferramentas específicas para serem utilizadas na usinagem desta fonte de matéria prima. Além disso, tornou-se imprescindível o conhecimento tecnológico do comportamento da madeira sob diferentes solicitações. De posse deste conhecimento será possível viabilizar a elaboração de projetos adequadamente fundamentados em conceitos atualizados e com a produção obedecendo a critérios de qualidade envolvendo o material, o equipamento e a mão de obra.

A tendência mundial atual é a de incorporar métodos não destrutivos na caracterização de materiais, inclusive a madeira, uma vez que tais métodos permitem caracterizar as propriedades com maior agilidade e menores custos, sem perda de precisão. Essas condições são possíveis, pois se trata de método que pode ser utilizado em uma grande quantidade de elementos, não ficando restrito a amostragens que, no caso da madeira, são altamente questionáveis devido à grande variabilidade natural deste material.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Propor e avaliar metodologia de ensaio não destrutivo (ultrassom), para a determinação das constantes elásticas de espécies de madeira crescidas no Brasil, provenientes de florestas plantadas ou nativas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a metodologia baseada em ultrassom para a determinação das doze constantes elásticas da madeira.

- Determinar, com o uso da metodologia proposta, as doze constantes elásticas de uma espécie de floresta plantada, Eucalipto (*Eucalyptus saligna*) e duas dicotiledôneas nativas Garapeira (*Apulleia leiocarpa*) e Cupiúba (*Goupia glabra*).

- Comparar os resultados das constantes elásticas obtidas com a metodologia de ultrassom proposta, com as obtidas utilizando-se o ensaio de compressão axial para as três espécies estudadas.

- Comparar a metodologia proposta, utilizando ultrassom, com a metodologia de compressão axial, em termos de facilidade de utilização, e de custo do ensaio.

- Realizar, utilizando o programa ANSYS 9.0 ED (SAS IP, Ind 2004, University of California, Berkeley, USA) simulações de comportamento estrutural utilizando as constantes elásticas obtidas por ultrassom e comparar os resultados com simulações utilizando propriedades de referência e modelos alternativos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi focada no tema principal da pesquisa, ou seja, a utilização do ultrassom para determinar as constantes elásticas da madeira. Primeiramente são apresentados aspectos teóricos gerais que embasam a utilização de métodos de propagação de ondas na determinação de propriedades de materiais e, em seguida, detalha-se a determinação da matriz de rigidez por meio de propagação de ondas. O item que se segue apresenta referências relativas às aplicações do método. O primeiro subitem se refere ao uso de método de propagação de ondas na determinação de correlações com ensaios estáticos, principalmente considerando a direção paralela às fibras ou longitudinal (L). O segundo subitem, apresenta referências que tratam da determinação dos parâmetros elásticos de forma mais geral, utilizando a matriz de rigidez, completa ou parcial. Por fim são destacados alguns parâmetros que foram utilizados para a definição da dimensão do corpo de prova, da frequência do transdutor e do acoplante.

Tendo em vista que houve comparação do método de determinação das constantes elásticas por ultrassom com o ensaio de compressão estática, um item adicional foi introduzido para detalhar a determinação dos parâmetros elásticos da madeira por meio de ensaio de compressão estática.

2.1 Ensaios de propagação de ondas: fundamentação teórica

2.1.1. Aspectos Gerais

Os conceitos detalhados nesse item são clássicos, de forma que não serão citadas referências específicas. No entanto, o detalhamento desses conceitos foi feito com base em Bodig e Jayne (1982), Azevedo (2002) e Bucur (2006).

A Equação de Christoffel é a base para a utilização da propagação de ondas na determinação das constantes elásticas dos materiais. O desenvolvimento utilizado é bastante complexo, exigindo conhecimentos também complexos de matemática e de física. Assim, a apresentação desses fundamentos nesse item tem como objetivo a compreensão do fenômeno de forma geral e não a compreensão de cada um dos equacionamentos envolvidos.

Em um material anisotrópico, a relação entre a direção de propagação da onda e a direção do deslocamento da partícula é complexa. Em outras palavras, as ondas não são, em

geral, puramente longitudinais ou puramente transversais, mas sim formas associadas destes dois tipos de ondas. Há, entretanto, certas direções em que ondas longitudinais ou transversais puras podem se propagar. Nesse capítulo serão deduzidas as equações de propagação de ondas em sólidos anisotrópicos e as soluções específicas serão examinadas, para que correspondam aos tipos de ondas puras.

As equações do movimento para um corpo anisotrópico podem ser encontradas através da combinação entre a segunda Lei de Newton (Força = massa x aceleração) e a Lei de Hooke generalizada, que relaciona tensão à deformação por meio da matriz das componentes elásticas do material (matriz de rigidez).

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = \rho \frac{\partial^2 v_i}{dt} \quad \text{Equação (2.1)}$$

$$\sigma_{ik} = C_{iklm} \varepsilon_{lm} \quad \text{Equação (2.2)}$$

Onde σ_{ik} = representa as tensões, v_i a velocidade, C_{iklm} as constantes de rigidez do material, e ε_{lm} as deformações. Os índices i, k, l e m podem ser 1,2,3 ou 4.

Considerando pequenas deformações de um material sujeito a tensões lineares, a matriz das deformações pode ser escrita como

$$\varepsilon_{lm} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_m} \right) \quad \text{Equação 2.3}$$

Substituindo ε_{lm} na Equação 2.2, obtém-se

$$\rho \frac{\partial^2 v_i}{dt} = C_{iklm} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_m} \right) \right] \quad \text{Equação 2.4}$$

ou

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} v_i = \frac{1}{2} C_{iklm} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_m} \right) \quad \text{Equação 2.5}$$

A simetria de tensões e deformações faz com que $C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{jilk}$ de forma que é possível substituir estes índices na equação 2.5

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} v_i = \frac{1}{2} C_{iklm} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} + \frac{\partial u_m}{\partial x_l} \right) \quad \therefore$$

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} v_i = \frac{1}{2} C_{iklm} 2 \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} \right) \quad \text{portanto,}$$

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} v_i = C_{iklm} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} \right) \quad \text{Equação 2.6}$$

Assumindo-se que ondas harmônicas planas estejam se propagando no corpo, a solução da equação diferencial (2.6) será:

$$u_i = u_{0i} \exp[i(\nu t - k_j x_j)] \quad \text{Equação 2.7}$$

Em que u_{0i} são as amplitudes dos componentes do vetor deslocamento e k_j são as componentes do vetor de onda. O valor u_{0i} pode também ser escrito como $u_0 \alpha_i$, em que u_0 representa a amplitude do deslocamento e α_i são os cossenos diretores do vetor deslocamento da partícula. Substituindo o valor expresso pela Equação 2.7 na Equação 2.6, obtém-se

$$\rho \nu^2 u_i = C_{iklm} k_k k_l u_m \quad \text{Equação 2.8}$$

Esta equação pode ser escrita de forma mais homogênea fazendo-se $u_i = u_m \delta_{im}$ em que o tensor δ_{im} é denominado tensor unitário ou delta de Kronecker, ou seja

$$(\rho v^2 \delta_{im} - C_{iklm} k_k k_l) u_m = 0 \quad \text{Equação 2.9}$$

A Equação 2.9 foi desenvolvida por Christoffel (1877) sendo por isso conhecida como equação de Christoffel. Ela representa um conjunto de três equações homogêneas de primeiro grau em u_1 , u_2 e u_3 . Estas equações terão soluções não nulas, não triviais, se, e somente se, o determinante dos coeficientes for igual a zero, ou seja

$$\left| C_{iklm} k_k k_l - \rho v^2 \delta_{im} \right| = 0 \quad \text{Equação 2.10}$$

A equação de Christoffel fornece a relação entre as constantes elásticas [C] e a velocidade de propagação de ondas em meios sólidos.

O desenvolvimento da Equação 2.10 fornece uma equação cúbica em termos de v^2 . As três raízes desta equação são diferentes, gerando três diferentes valores de velocidades de propagação.

Por simplificação é mais conveniente escrever a Equação 2.9 na forma

$$\left(\lambda_{im} - \rho v^2 \delta_{im} \right) u_m = 0 \quad \text{Equação 2.11}$$

ou ainda, matricialmente

$$\begin{bmatrix} \lambda_{11} - \rho v^2 & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} - \rho v^2 & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} - \rho v^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = 0 \quad \text{Equação 2.12}$$

em que o tensor λ_{im} , conhecido como tensor de Christoffel, é definido como

$$\lambda_{im} = C_{iklm} n_k n_l \quad \text{Equação 2.13}$$

Com a qual se podem escrever as Equações 2.14

$$\begin{aligned} \lambda_{11} = & C_{1111} n_1^2 + C_{1221} n_2^2 + C_{1331} n_3^2 + C_{1121} n_1 n_2 + C_{1131} n_1 n_3 + C_{1211} n_2 n_1 \\ & + C_{1231} n_2 n_3 + C_{1311} n_3 n_1 + C_{1321} n_3 n_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{22} = & C_{2112} n_1^2 + C_{2222} n_2^2 + C_{2332} n_3^2 + C_{2122} n_1 n_2 + C_{2132} n_1 n_3 + C_{2212} n_2 n_1 \\ & + C_{2232} n_2 n_3 + C_{2312} n_3 n_1 + C_{2322} n_3 n_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{33} = & C_{3113} n_1^2 + C_{3223} n_2^2 + C_{3333} n_3^2 + C_{3123} n_1 n_2 + C_{3133} n_1 n_3 + C_{3213} n_2 n_1 \\ & + C_{3233} n_2 n_3 + C_{3313} n_3 n_1 + C_{3323} n_3 n_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{12} = & C_{1112} n_1^2 + C_{1222} n_2^2 + C_{1332} n_3^2 + C_{1122} n_1 n_2 + C_{1132} n_1 n_3 + C_{1212} n_2 n_1 \\ & + C_{1232} n_2 n_3 + C_{1312} n_3 n_1 + C_{1322} n_3 n_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{13} = & C_{1113} n_1^2 + C_{1223} n_2^2 + C_{1333} n_3^2 + C_{1123} n_1 n_2 + C_{1133} n_1 n_3 + C_{1213} n_2 n_1 \\ & + C_{1233} n_2 n_3 + C_{1313} n_3 n_1 + C_{1323} n_3 n_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{23} = & C_{2113} n_1^2 + C_{2223} n_2^2 + C_{2333} n_3^2 + C_{2123} n_1 n_2 + C_{2133} n_1 n_3 + C_{2213} n_2 n_1 \\ & + C_{2233} n_2 n_3 + C_{2313} n_3 n_1 + C_{2323} n_3 n_2 \end{aligned}$$

Para simplificar as equações é conveniente utilizar a notação matricial, ao invés da notação tensorial. Para isso, as relações entre as notações são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Relação entre as notações tensorial e matricial

Tensorial	11	22	33	2,3 ou 3,2	1,3 ou 3,1	1,2 ou 2,1
Matricial	1	2	3	4	5	6

Dessa forma, as Equações 2.14 podem ser reescritas

$$\lambda_{11} = \lambda_1 = C_{11} n_1^2 + C_{66} n_2^2 + C_{55} n_3^2 + C_{16} n_1 n_2 + C_{15} n_1 n_3 + C_{61} n_2 n_1 + C_{65} n_2 n_3 + C_{51} n_3 n_1 + C_{56} n_3 n_2$$

$$\lambda_{22} = \lambda_2 = C_{66} n_1^2 + C_{22} n_2^2 + C_{44} n_3^2 + C_{62} n_1 n_2 + C_{64} n_1 n_3 + C_{26} n_2 n_1 + C_{24} n_2 n_3 + C_{46} n_3 n_1 + C_{42} n_3 n_2$$

$$\lambda_{33} = \lambda_3 = C_{55} n_1^2 + C_{44} n_2^2 + C_{33} n_3^2 + C_{54} n_1 n_2 + C_{53} n_1 n_3 + C_{45} n_2 n_1 + C_{43} n_2 n_3 + C_{35} n_3 n_1 + C_{34} n_3 n_2$$

$$\lambda_{12} = \lambda_6 = C_{15} n_1^2 + C_{62} n_2^2 + C_{54} n_3^2 + C_{12} n_1 n_2 + C_{14} n_1 n_3 + C_{66} n_2 n_1 + C_{64} n_2 n_3 + C_{56} n_3 n_1 + C_{52} n_3 n_2$$

$$\lambda_{13} = \lambda_5 = C_{15} n_1^2 + C_{64} n_2^2 + C_{53} n_3^2 + C_{14} n_1 n_2 + C_{15} n_1 n_3 + C_{65} n_2 n_1 + C_{63} n_2 n_3 + C_{55} n_3 n_1 + C_{54} n_3 n_2$$

$$\lambda_{23} = \lambda_4 = C_{65} n_1^2 + C_{24} n_2^2 + C_{43} n_3^2 + C_{64} n_1 n_2 + C_{63} n_1 n_3 + C_{25} n_2 n_1 + C_{23} n_2 n_3 + C_{45} n_3 n_1 + C_{44} n_3 n_2$$

Devido a simetria do tensor C_{iklm}

$C_{15} = C_{51}$, $C_{16} = C_{61}$, $C_{26} = C_{62}$, $C_{24} = C_{42}$, $C_{34} = C_{43}$, $C_{35} = C_{53}$, $C_{45} = C_{54}$, $C_{46} = C_{64}$, $C_{56} = C_{65}$, logo são obtidas as Equações 2.15

$$\lambda_1 = C_{11} n_1^2 + C_{66} n_2^2 + C_{55} n_3^2 + 2C_{16} n_1 n_2 + 2C_{15} n_1 n_3 + 2C_{56} n_2 n_3$$

$$\lambda_2 = C_{66} n_1^2 + C_{22} n_2^2 + C_{44} n_3^2 + 2C_{26} n_1 n_2 + 2C_{46} n_1 n_3 + 2C_{24} n_2 n_3$$

$$\lambda_3 = C_{55} n_1^2 + C_{44} n_2^2 + C_{33} n_3^2 + 2C_{45} n_1 n_2 + 2C_{35} n_1 n_3 + 2C_{34} n_2 n_3$$

$$\lambda_4 = C_{65} n_1^2 + C_{24} n_2^2 + C_{43} n_3^2 + C_{64} n_1 n_2 + C_{63} n_1 n_3 + C_{25} n_2 n_1 + C_{23} n_2 n_3 \\ + C_{45} n_3 n_1 + C_{44} n_3 n_2$$

$$\lambda_5 = C_{15} n_1^2 + C_{64} n_2^2 + C_{53} n_3^2 + C_{14} n_1 n_2 + C_{15} n_1 n_3 + C_{65} n_2 n_1 + C_{63} n_2 n_3 \\ + C_{55} n_3 n_1 + C_{54} n_3 n_2$$

$$\lambda_6 = C_{15} n_1^2 + C_{62} n_2^2 + C_{54} n_3^2 + C_{12} n_1 n_2 + C_{14} n_1 n_3 + C_{66} n_2 n_1 + C_{64} n_2 n_3 \\ + C_{56} n_3 n_1 + C_{52} n_3 n_2$$

Na equação (2.12) os vetores deslocamento associados a cada autovalor ρv^2 são mutuamente perpendiculares.

Para uma onda longitudinal pura, o vetor deslocamento da partícula (u) é paralelo ao vetor unitário normal às frentes de onda (n). Por conseguinte, o produto vetorial ($u \times n$) é nulo. Por outro lado, para uma onda transversal pura, os mesmos vetores são perpendiculares entre si e, conseqüentemente, o produto escalar ($u \cdot n$) é igual a zero.

Christoffel demonstrou que os cossenos diretores α_i do deslocamento das partículas das frentes de onda estão relacionados às correspondentes velocidades de onda por

$$\alpha_1 \lambda_{11} + \alpha_2 \lambda_{12} + \alpha_3 \lambda_{13} = \alpha_1 \rho v^2$$

$$\alpha_1 \lambda_{12} + \alpha_2 \lambda_{22} + \alpha_3 \lambda_{23} = \alpha_2 \rho v^2$$

$$\alpha_1 \lambda_{13} + \alpha_2 \lambda_{23} + \alpha_3 \lambda_{33} = \alpha_3 \rho v^2$$

Equação 2.16

Este conjunto de equações pode ser deduzido a partir da equação 2.11, substituindo u_m pelos cossenos diretores α_i do vetor deslocamento da partícula (u)

$$\lambda_{mi} \alpha_i - \rho v^2 \delta_{mi} \alpha_i = 0 \quad \therefore$$

$$\lambda_{mi} \alpha_i = \rho v^2 \delta_{mi} \alpha_i$$

Equação 2.17

Para um material ortotrópico a matriz de rigidez $[C]$ é dada por

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Para esse material ortotrópico, considerando uma onda se propagando na direção x_1 no sentido positivo do eixo, o vetor normal às frentes de onda possuirá componentes $n_1 = 1$, $n_2 = 0$ e $n_3 = 0$ (Figura 2.1).

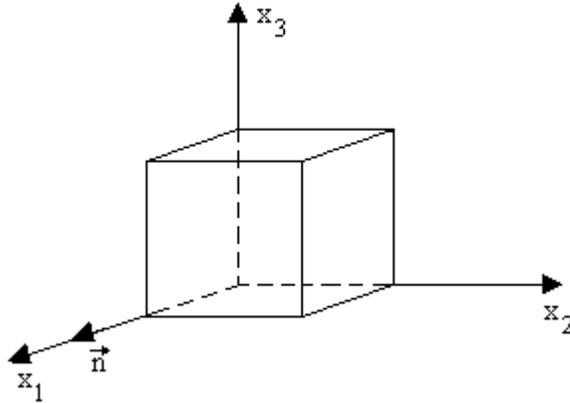


Figura 2.1 – Propagação de uma onda ao longo do eixo x_1 de simetria de um sólido ortotrópico. Fonte: Mascia(1991)

Dessa forma, os componentes λ_{12} , λ_{13} e λ_{23} são nulos já que são elementos que só existem quando a propagação se dá fora dos eixos de simetria. Assim, a Equação 2.12 pode ser simplificada e reescrita como

$$\begin{vmatrix} \lambda_{11} - \rho v^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{22} - \rho v^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0$$

Logo,

$$\left(\lambda_{11} - \rho v^2\right)\left(\lambda_{22} - \rho v^2\right)\left(\lambda_{33} - \rho v^2\right) = 0$$

Equação 2.19

Solucionando a Equação 2.19, obtêm-se três raízes distintas, ou seja, três valores quadráticos de velocidade de propagação:

$$v_1^2 = \frac{\lambda_{11}}{\rho}$$

$$v_2^2 = \frac{\lambda_{22}}{\rho}$$

$$v_3^2 = \frac{\lambda_{33}}{\rho}$$

Mas

$$\lambda_1 = C_{11} n_1^2 + C_{66} n_2^2 + C_{55} n_3^2 + 2C_{16} n_1 n_2 + 2C_{15} n_1 n_3 + 2C_{56} n_2 n_3$$

$$\lambda_2 = C_{66} n_1^2 + C_{22} n_2^2 + C_{44} n_3^2 + 2C_{26} n_1 n_2 + 2C_{46} n_1 n_3 + 2C_{24} n_2 n_3$$

$$\lambda_3 = C_{55} n_1^2 + C_{44} n_2^2 + C_{33} n_3^2 + 2C_{45} n_1 n_2 + 2C_{35} n_1 n_3 + 2C_{34} n_2 n_3$$

Assim, se $n_1 = 1,0$; $n_2 = 0,0$ e $n_3 = 0,0$

$$\lambda_1 = C_{11}$$

$$\lambda_2 = C_{66}$$

$$\lambda_3 = C_{55}$$

$$v_1^2 = \frac{\lambda_{11}}{\rho} = \frac{C_{11}}{\rho}$$

$$v_2^2 = \frac{\lambda_{22}}{\rho} = \frac{C_{66}}{\rho}$$

$$v_3^2 = \frac{\lambda_{33}}{\rho} = \frac{C_{55}}{\rho}$$

Substituindo, primeiramente, ρv_1^2 nas Equações 2.16

$$\alpha_1 \lambda_{11} + \alpha_2 \lambda_{12} + \alpha_3 \lambda_{13} = \alpha_1 \rho v_1^2$$

$$\alpha_1 \lambda_{12} + \alpha_2 \lambda_{22} + \alpha_3 \lambda_{23} = \alpha_2 \rho v_1^2$$

$$\alpha_1 \lambda_{13} + \alpha_2 \lambda_{23} + \alpha_3 \lambda_{33} = \alpha_3 \rho v_1^2$$

Como $n_1 = 1, 0$; $n_2 = 0$ e $n_3 = 0$ e λ_{12} e λ_{13} são nulos

Obtém-se

$$\alpha_1 C_{11} = \alpha_1 C_{11}$$

$$\alpha_2 C_{66} = \alpha_2 C_{11}$$

$$\alpha_3 C_{55} = \alpha_3 C_{11}$$

As duas últimas equações fornecem:

$$\alpha_2 (C_{66} - C_{11}) = 0 \quad \text{se, e somente se, } \alpha_2 = 0$$

$$\alpha_3 (C_{55} - C_{11}) = 0 \quad \text{se, e somente se, } \alpha_3 = 0$$

De acordo com a Álgebra Vetorial, a soma dos quadrados dos cossenos diretores deve ser igual a 1, ou seja:

$$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 = 1$$

Por conseguinte,

$$\alpha_1 = 1$$

O vetor deslocamento da partícula ou polarização terá, então, a direção (1,0,0). Dessa forma, o produto vetorial ($u \times n$) é nulo e v_1 representa a velocidade da onda longitudinal.

Para ρv_2^2 as Equações 2.16 fornecem

$$\alpha_1 \lambda_{11} + \alpha_2 \lambda_{12} + \alpha_3 \lambda_{13} = \alpha_1 \rho v_2^2$$

$$\alpha_1 \lambda_{12} + \alpha_2 \lambda_{22} + \alpha_3 \lambda_{23} = \alpha_2 \rho v_2^2$$

$$\alpha_1 \lambda_{13} + \alpha_2 \lambda_{23} + \alpha_3 \lambda_{33} = \alpha_3 \rho v_2^2$$

Portanto

$$\alpha_1 C_{11} = \alpha_1 C_{66}$$

$$\alpha_2 C_{66} = \alpha_2 C_{66}$$

$$\alpha_3 C_{55} = \alpha_3 C_{66}$$

logo,

$$\alpha_1 (C_{11} - C_{66}) = 0 \quad \therefore \quad \alpha_1 = 0$$

$$\alpha_3 (C_{55} - C_{66}) = 0 \quad \therefore \quad \alpha_3 = 0$$

Da condição de ortogonalidade,

$$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 = 1 \quad \therefore \quad \alpha_2 = 1$$

O vetor deslocamento da partícula possuirá, conseqüentemente, a direção (0,1,0) significando que a polarização se dá na direção 2 e portanto, a onda será de cisalhamento pois a propagação da onda está na direção 1.

Por fim, substituindo ρv_3^2 nas Equações 2.16 obtém-se

$$\alpha_1 \lambda_{11} + \alpha_2 \lambda_{12} + \alpha_3 \lambda_{13} = \alpha_1 \rho v_3^2$$

$$\alpha_1 \lambda_{12} + \alpha_2 \lambda_{22} + \alpha_3 \lambda_{23} = \alpha_2 \rho v_3^2$$

$$\alpha_1 \lambda_{13} + \alpha_2 \lambda_{23} + \alpha_3 \lambda_{33} = \alpha_3 \rho v_3^2$$

Portanto

$$\alpha_1 C_{11} = \alpha_1 C_{55}$$

$$\alpha_2 C_{66} = \alpha_2 C_{55}$$

$$\alpha_3 C_{66} = \alpha_3 C_{66}$$

As duas primeiras equações anteriores permitem escrever:

$$\alpha_1 (C_{11} - C_{55}) = 0 \quad \therefore \quad \alpha_1 = 0$$

$$\alpha_2 (C_{66} - C_{55}) = 0 \quad \therefore \quad \alpha_2 = 0$$

$$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 = 1 \quad \therefore \quad \alpha_3 = 1$$

Neste caso, o vetor deslocamento da partícula (polarização) terá direção (0,0,1) indicando que se trata de onda de cisalhamento (ou transversal), já que a propagação está se dando na direção 1 e a polarização na direção 3.

Assim, para a onda se propagando na direção 1 podem ser determinados:

C_{11} (com transdutor longitudinal, pois a onda se propaga em 1 e se polariza em 1)

C_{55} (com transdutor transversal, pois a onda se propaga em 1 e se polariza em 3)

C_{66} (com transdutor transversal, pois a onda se propaga em 1 e se polariza em 2)

Considerando o mesmo raciocínio, para a onda se propagando na direção 2, no sentido positivo do eixo podem ser determinados:

C_{22} (com transdutor longitudinal, pois a onda se propaga em 2 e se polariza em 2)

C_{44} (com transdutor transversal, pois a onda se propaga em 2 e se polariza em 3)

C_{66} (com transdutor transversal, pois a onda se propaga em 2 e se polariza em 1)

Finalmente, considerando a onda se propagando na direção 3, no sentido positivo do eixo podem ser determinados:

C_{33} (com transdutor longitudinal, pois a onda se propaga em 3 e se polariza em 3)

C_{44} (com transdutor transversal, pois a onda se propaga em 3 e se polariza em 2)

C_{55} (com transdutor transversal, pois a onda se propaga em 3 e se polariza em 1)

Como visto anteriormente, na Equação 2.12 desenvolvida por Christoffel, os elementos de fora da diagonal se tornam zero quando a propagação da onda se dá nos eixos de simetria do material. Mas, no caso da propagação se dar fora desses eixos esses valores não são zero e a equação é completa.

Assim, os três elementos de fora da diagonal podem ser calculados quando a propagação da onda se dá fora dos eixos de simetria do sólido.

No caso dessa propagação ser, por exemplo, no plano 1-2, a matriz da Equação 2.12 pode ser escrita como

$$\begin{matrix} \lambda_{11} - \rho V^2 & \lambda_{12} & 0 \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} - \rho V^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} - \rho V^2 \end{matrix}$$

A solução dessa equação e a substituição dos vetores de onda se propagando em um ângulo α dentro plano 1-2 (Figura 2.2) tem como resultado a Equação 2.17.

$$(C_{12} + C_{66})n_1n_2 = \pm \sqrt{[(C_{11}n_1^2 + C_{66}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{66}n_1^2 + C_{22}n_2^2 - \rho V_\alpha^2)]} \quad \text{Equação 2.17}$$

Onde V_α depende do ângulo de propagação α fora da direção principal e corresponde a velocidade quase-longitudinal ou quase-transversal e $n_1 = \cos \alpha$; $n_2 = \sin \alpha$ e $n_3 = 0$

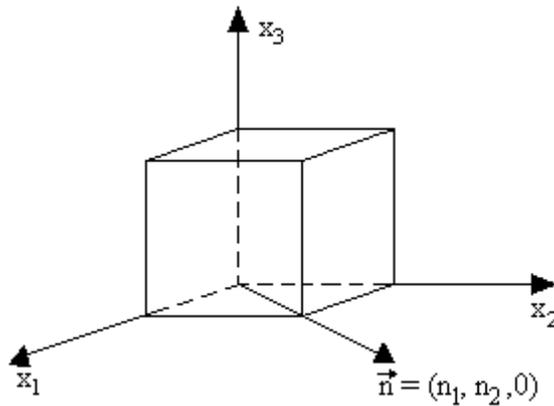


Figura 2.2. Propagação de uma onda ao longo do plano 12 de simetria do sólido.

Fonte: Mascia(1991)

Considerando a propagação em ângulo no plano 1-3, a Equação de Christoffel se torna

$$\begin{array}{ccc} \lambda_{11} - \rho V^2 & 0 & \lambda_{13} \\ 0 & \lambda_{22} - \rho V^2 & 0 \\ \lambda_{31} & 0 & \lambda_{33} - \rho V^2 \end{array}$$

Com solução dada pela Equação 2.18.

$$(C_{13} + C_{55})n_1n_3 = \pm \sqrt{[(C_{11}n_1^2 + C_{55}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{55}n_1^2 + C_{33}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]} \quad \text{Equação 2.18}$$

Onde V_α depende do ângulo de propagação α fora da direção principal e corresponde a velocidade quase-longitudinal ou quase-transversal e $n_1 = \cos \alpha$; $n_2 = 0$ e $n_3 = \sin \alpha$

Da mesma forma, para o plano 2-3 de onde se obtém a Equação 2.19.

$$\begin{array}{ccc} \lambda_{11} - \rho V^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{22} - \rho V^2 & \lambda_{23} \\ 0 & \lambda_{32} & \lambda_{33} - \rho V^2 \end{array}$$

$$(C_{23} + C_{44})n_2n_3 = \pm \sqrt{[(C_{22}n_2^2 + C_{44}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)(C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]} \quad \text{Equação 2.19}$$

Onde V_α depende do ângulo de propagação α fora da direção principal e corresponde a velocidade quase-longitudinal ou quase-transversal e $n_1 = 0$ $n_2 = \cos \alpha$ e $n_3 = \sin \alpha$

Se por hipótese a matriz $[C] > 0$, consequentemente $C_{ij} > 0$, então para propagações em α , considera-se que para $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ ou $\pi \leq \alpha \leq 3\pi/2$, a expressão sob a Raiz é positiva. Para outros intervalos de ângulos a expressão sob a Raiz é tomada com sinal negativo.

Em teoria se poderiam utilizar transdutores longitudinais ou transversais para a obtenção de V_α , no entanto, velocidades longitudinais fora dos eixos de simetria nas equações provenientes do tensor de Christoffel, quase sempre, levam a valores negativos e, portanto, com raiz imaginária, o que do ponto de vista prático não tem interesse.

2.1.2. Obtenção dos termos da matriz de rigidez em ensaios utilizando a madeira

A madeira é considerada, de forma simplificada, um sólido ortotrópico. Isso significa que constantes são influenciadas por três planos mutuamente perpendiculares de simetria elástica. A matriz de rigidez [C] contém 12 elementos mas, em virtude da simetria elástica, apenas 9 constantes são independentes: seis termos diagonais (C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} , C_{66}) e três termos não diagonais (C_{12} , C_{13} , C_{23}). Conforme visto no item anterior, os 9 termos independentes da matriz de rigidez podem ser obtidos por meio da propagação de ondas nos eixos de simetria (6 termos da diagonal) e em direções não coincidentes com esses eixos em cada um dos três planos (3 termos de fora da diagonal). De forma prática, para os três primeiros elementos da diagonal da matriz de rigidez (C_{11} , C_{22} , C_{33}) é necessária a utilização de transdutor de onda longitudinal. Nesse tipo de transdutor as ondas se propagam e se polarizam na mesma direção. A polarização corresponde à excitação do material. Para a obtenção dos outros três elementos da diagonal da matriz de rigidez (C_{44} , C_{55} , C_{66}) é necessária a utilização de transdutor de onda de cisalhamento. Nesse tipo de transdutor as ondas se propagam em uma direção e se polarizam na direção perpendicular. A Tabela 2.2 resume, de forma mais prática, os conceitos discutidos no item 2.1.1.

Tabela 2.2 Obtenção dos termos da diagonal da matriz de rigidez [C] da madeira em ensaios de ultrassom.

Termo	Tipo de onda	Direção de propagação	Direção de polarização	Expressão*
C11	Longitudinal	Longitudinal (1)	Longitudinal (1)	$C_{11} = \rho \cdot V_{LL}^2$
C22	Longitudinal	Radial (2)	Radial (2)	$C_{22} = \rho \cdot V_{RR}^2$
C33	Longitudinal	Tangencial (3)	Tangencial (3)	$C_{33} = \rho \cdot V_{TT}^2$
C44	Cisalhamento	Radial (2)	Tangencial (3)	$C_{44} = \rho \cdot V_{RT}^2$
		ou Tangencial (3)	ou Radial (2)	ou $C_{44} = \rho \cdot V_{TR}^2$
C55	Cisalhamento	Longitudinal (1)	Tangencial (3)	$C_{55} = \rho \cdot V_{LT}^2$
		ou Tangencial (3)	ou Longitudinal (1)	ou $C_{55} = \rho \cdot V_{TL}^2$
C66	Cisalhamento	Longitudinal (1)	Radial (2)	$C_{66} = \rho \cdot V_{LR}^2$
		ou Radial (2)	ou Longitudinal (1)	ou $C_{66} = \rho \cdot V_{RL}^2$

* ρ é a densidade aparente da madeira a 12% e V a velocidade de propagação da onda de ultrassom

Para a obtenção dos termos de fora da diagonal (C_{12} , C_{13} e C_{23}) são utilizadas as Equações 17, 18 e 19. Para isso é necessário que a propagação se dê fora dos eixos principais de simetria.

Portanto, a determinação dos termos fora da diagonal deve ser realizada utilizando corpo de prova cortado em um ângulo não coincidente com os eixos de simetria, de tal forma que a propagação da onda se dê de forma quase-longitudinal ou quase-transversal (Figura 2.3).

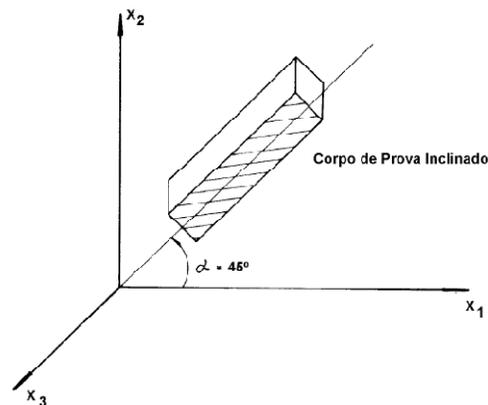


Figura 2.3 – Esquema do corpo de prova retirado em ângulo (no caso 45°). Fonte: Mascia (1991)

Os termos da matriz de flexibilidade [S] são relacionados aos termos da matriz de rigidez [C] por meio de sua inversa [C]⁻¹. Com os termos da matriz de flexibilidade podem ser obtidos os parâmetros de engenharia associados ao material.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

Para a madeira, os eixos 1, 2 e 3 podem ser substituídos pelas direções Longitudinal (L), Radial (R) e Tangencial (T), respectivamente.

As equações 2.20 a 2.28 apresentam as relações entre os termos da matriz de rigidez (obtidas por métodos de propagação de ondas) e da matriz de flexibilidade (obtida por métodos estáticos). Essas equações são obtidas por meio da inversão da matriz.

$$C_{11} = C_{LL} = (1 - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR}) \cdot [E_R \cdot E_T / S]^{-1} \quad \text{Equação 2.20}$$

$$C_{22} = C_{RR} = (1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL}) \cdot [E_L \cdot E_T / S]^{-1} \quad \text{Equação 2.21}$$

$$C_{33} = C_{TT} = (1 - \nu_{LR} \cdot \nu_{RL}) \cdot [E_L \cdot E_R / S]^{-1} \quad \text{Equação 2.22}$$

$$C_{12} = C_{LR} = (\nu_{RL} + \nu_{RT} \cdot \nu_{TL}) \cdot [E_R \cdot E_T / S]^{-1} \quad \text{Equação 2.23}$$

$$C_{13} = C_{LT} = (\nu_{TL} + \nu_{LR} \cdot \nu_{RT}) \cdot [E_R \cdot E_L / S]^{-1} \quad \text{Equação 2.24}$$

$$C_{23} = C_{RT} = (\nu_{TR} + \nu_{TL} \cdot \nu_{LR}) \cdot [E_L \cdot E_T / S]^{-1} \quad \text{Equação 2.25}$$

$$C_{44} = G_{RT} \quad \text{Equação 2.26}$$

$$C_{55} = G_{LT} \quad \text{Equação 2.27}$$

$$C_{66} = G_{LR} \quad \text{Equação 2.28}$$

Onde:

$$/S/ = [1 - \nu_{LR} \cdot \nu_{RL} - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR} - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL} - 2 \nu_{RL} \cdot \nu_{TR} \cdot \nu_{TL}] \cdot (E_1 \cdot E_2 \cdot E_3)^{-1}$$

Como exemplo, substituindo-se /S/ na Equação 2.20 obtém-se a relação entre C_{LL} e E_L (equação 2.29). Assim, conhecendo-se para uma dada espécie, o valor de C_{LL} e os coeficientes de Poisson determina-se E_L . Da mesma forma, todos os termos da diagonal da matriz de flexibilidade podem ser conhecidos, ou seja, E_{LL} , E_{RR} , E_{TT} , G_{RT} ; G_{LT} e G_{LR} .

$$C_{LL} = \frac{E_L(1 - \nu_{RT}\nu_{TR})}{(1 - \nu_{LR}\nu_{RL} - \nu_{RT}\nu_{TR} - \nu_{LT}\nu_{TL} - 2\nu_{RL}\nu_{TR}\nu_{LT})} \quad \text{Equação 2.29}$$

As equações 2.20 a 2.22 permitem visualizar, de forma clara, que os valores dos módulos de elasticidade longitudinais (E_L , E_R , E_T) obtidos dos ensaios estáticos não são numericamente iguais aos coeficientes da matriz de rigidez obtidos por ultrassom (C_{LL} , C_{RR} , C_{TT}). A diferença entre eles dependerá da magnitude do coeficiente de Poisson. Keunecke *et al.* (2007) indica que as diferenças são da ordem de 50% para coeficientes de Poisson da ordem de 0,40.

Assim, só é possível obter-se os valores dos parâmetros elásticos da madeira por ultrassom, quando a matriz de rigidez é determinada de forma completa, utilizando-se, nesse caso, a inversão da matriz. Também é possível realizar essa determinação quando se conhecem os coeficientes de Poisson da espécie.

È importante destacar que quando não se determina a matriz de rigidez completa e não se tem os coeficientes de Poisson, não se pode esperar valores numericamente iguais para os coeficientes obtidos por ultrassom e por meio de ensaio estático, mas se pode obter a correlação entre eles.

Essa correlação pode então ser utilizada para, por meio do ensaio de ultrassom, se inferir os resultados que seriam obtidos no ensaio estático.

2.2 Ensaios de propagação de ondas: aplicações

Nesse item são discutidas referências, nacionais e internacionais, de pesquisas que utilizaram o método de propagação de ondas para correlacionar ou determinar parâmetros

elásticos da madeira e de materiais compósitos, cujo comportamento se aproxima ao da madeira.

A apresentação de resultados e metodologias de pesquisa envolvendo a determinação das constantes elásticas será abordada de forma mais detalhada por ser o foco dessa pesquisa.

2.2.1. Correlações com o módulo de elasticidade longitudinal e utilização na classificação

No caso da madeira, a grande maioria dos pesquisadores, principalmente no Brasil, tem utilizado o método de ultrassom apenas para determinar a constante da matriz de rigidez (C_{11} ou C_{LL}) que se correlaciona com o módulo de elasticidade na direção longitudinal (E_L ou E_L) do ensaio de compressão ou do ensaio de flexão estática (E_M).

Waubke (1981), na Alemanha, foi o primeiro a aplicar os resultados da obtenção de C_{LL} na classificação de peças estruturais de madeira através do ultrassom, por meio da correlação com E_M e f_m (módulo de ruptura na flexão) e, conseqüentemente, com classes de rigidez e de resistência.

Valores de C_{LL} obtidos por ultrassom e de E_L obtidos em ensaios estáticos de compressão foram comparados por Chudnoff *et al.* (1984), utilizando corpos-de-prova provenientes de postes de 26 espécies de madeira de coníferas e de dicotiledôneas, com teor de umidade variando entre 35% e 95%. Na média, C_{LL} foi 39,2% superior a E_L para as coníferas, e 57% superior a E_L para as dicotiledôneas. Esse resultado é compatível com os aspectos teóricos do ensaio, uma vez que no caso desta determinação única (de um só elemento e não da matriz completa) não se consideram as influências provenientes dos coeficientes de Poisson.

Da mesma forma que Waubke (1981), Sandoz (1990) propôs, na Suíça, um método de classificação de peças estruturais, de acordo com as faixas estabelecidas pela Norma SIA 164, utilizando faixas de velocidade de ultrassom. Para isso correlacionou, diretamente, os valores de velocidade de propagação longitudinal (V_{LL}) aos valores de E_M , E_L e f_M . Essa proposta foi inserida em norma de classificação naquele país.

No Brasil, Bartholomeu (2001), a exemplo de Waubke (1981) e de Sandoz (1990) também propôs a classificação mecânica da madeira crescida no país (nativa e de floresta plantadas) por meio de correlação de C_{LL} e V_{LL} com classes de resistência e de rigidez. Como

consequência do seu trabalho de doutorado e, adicionalmente, com ensaios de outras espécies, foi aprovada, em novembro de 2007, a NBR 15521: Ensaios não destrutivos — Ultrassom — Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas. Atualmente encontra-se em andamento o estudo de norma que contemple a classificação de coníferas.

2.2.2. Determinação das constantes elásticas

A partir dos anos 80 vários autores têm realizado experimentações para a obtenção de metodologia que permita a utilização do equacionamento de Christofel para determinar todas as constantes elásticas de materiais fibrosos, dentre eles a madeira.

Zimmer e Cost (1970) realizaram o primeiro estudo de determinação de todas as constantes elásticas de materiais compósitos. Eles utilizaram um material denominado Scotchply 1002, constituído de fibra de vidro reforçado com epóxi. A matriz de rigidez que descreve esse material, considerado de isotropia transversal (duas direções de comportamento semelhantes e uma diferente), possui 5 elementos independentes. Foram retirados corpos de prova do material à partir de folhas de cerca de 10 mm de espessura e em vários ângulos (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°) em relação às fibras. Medições de ultrassom foram realizadas nesses corpos de prova utilizando transdutores de onda longitudinal e de cisalhamento de 5 MHz de frequência. Compararam os resultados dos módulos de elasticidade obtidos experimentalmente com valores teóricos. Para as ondas longitudinais os autores verificaram que, para ângulos inferiores a 20° os erros eram maiores, e explicaram essa variação de resultados em função da maior dispersão da onda. No caso das ondas transversais os erros diminuía para ângulos a partir de 45°. Zimmer e Cost (1970) indicam que, para materiais viscos-elásticos, como o caso do material por eles estudado, os coeficientes de rigidez ($C = \rho V^2$) obtidos por ultrassom são sempre superiores aos módulos de elasticidade obtidos pelo ensaio estático. Para o material analisado pelos autores essa diferença foi estimada em 40% e esse valor foi utilizado para corrigir os coeficientes de rigidez da matriz antes da inversão para determinação das constantes elásticas. Esse procedimento permitiu a obtenção de valores experimentais para o módulo de elasticidade longitudinal do material (37714 MPa) muito próximos aos teóricos (39644 MPa). Zimmer e Cost (1970) também obtiveram bom ajuste quando compararam a variação do módulo de elasticidade em função do ângulo de inclinação

em relação à fibra obtido experimentalmente com valores teóricos. Não há discussão ou apresentação de resultados relativos aos módulos transversais ou coeficiente de Poisson.

Preciosa *et al.* (1981) foi um dos pioneiros a utilizar a técnica do ultrassom para a determinação da matriz de rigidez da madeira. Os autores utilizaram 3 corpos de prova da espécie Frêne (*Fraxinus Excelsior*) prismáticos de dimensões 48 cm x 48 cm x 12 cm, retirados segundo os três eixos principais de simetria. Os corpos de prova foram impermeabilizados com uma membrana adesiva bem fina (0,02 mm de espessura) revestida de uma fina camada de epóxi. O método utilizado foi o da imersão, no qual o corpo de prova é mergulhado em um líquido para a realização das medições. O líquido adotado foi o “diethyloxyde”, com densidade 710 kg.m^{-3} e velocidade de propagação de ondas de ultrassom de 1021 m.s^{-1} . De acordo com os autores, a água não foi utilizada como acoplante porque a velocidade de propagação das ondas de ultrassom nesse material é alta (1450 m.s^{-1}) quando comparada ao material adotado tendo maior interferência nas leituras. Os transdutores utilizados possuíam frequência de 500 kHz. Os ensaios foram então realizados em um tanque com “diethyloxyde” e o corpo de prova era girado em posições especificamente determinadas para gerarem ângulos de propagação da onda nas direções principais e em direções fora dos eixos principais. Com os resultados de velocidades de propagação das ondas nos eixos de simetria e em ângulos com esses eixos os autores determinaram a matriz de rigidez e, com sua inversa, a matriz de flexibilidade, de onde foram determinados os módulos de elasticidade longitudinais, os módulos de cisalhamento e os coeficientes de Poisson. A Tabela 2.3 apresenta os resultados obtidos pelos autores para a espécie Frêne bem como resultados obtidos por Kollmann e Cotê (1975, apud PREZIOSA *et al.*, 1981) com outras espécies, em ensaios estáticos. Preziosa *et al.* (1981) comentam que a comparação com os ensaios estáticos foi feita apenas em relação à ordem de grandeza, já que se tratava de outras espécies.

Tabela 2.3. Constantes técnicas de três espécies de madeira (MPa). Umidade \cong 14%. Adaptado de Preziosa *et al.* (1981).

Espécie	E _L	E _R	E _T	v _{LT}	v _{RT}	v _{TL}	v _{RL}	v _{TR}	v _{LR}	G _{LR}	G _{TR}	G _{TL}
Frêne (800)*	16330	2230	1430	0,04	0,46	0,43	0,22	0,72	0,03	1320	520	1290
Pin												
Hemlock** (480)	10670	1750	1110	0,05	0,17	0,49	0,49	0,28	0,08	910	120	800
Monghinza** (980)	21300	4050	2220	0,04	0,33	0,35	0,37	0,60	0,07	1990	890	1430

*valor da densidade em kg.m⁻³

** resultados de ensaios estáticos obtidos por Kollmann e Cotê (1975, apud PREZIOSA *et al.*,1981).

Em tese de doutorado Preziosa (1982) deu continuidade à pesquisa, utilizando a mesma metodologia e equipamento detalhada em Preziosa *et al.* (1981), mas agora ensaiando 14 espécies de madeira (Tabela 2.4). Nessa referência, o autor detalha a escolha do transdutor de 500 kHz em função da menor atenuação do sinal que ele provocou quando comparado ao transdutor de 1000 kHz. Os ensaios foram realizados por imersão, e o líquido acoplante foi o silicone V30, que apresentou a menor velocidade de propagação de ondas (940 m.s⁻¹), tendo sido assim considerado o melhor meio acoplante para o ensaio de imersão. A Tabela 2.5 apresenta os resultados das constantes elásticas obtidas pelo autor para todas as espécies ensaiadas.

Preziosa (1982) realizou observação dos resultados ao longo do tempo. Em sua tese o autor mostra os resultados realizados nas mesmas peças após um mês e verifica que os resultados não sofreram variações significativas.

A Tabela 2.6 apresenta comparação, realizada por Preziosa (1982) dos resultados obtidos por ele utilizando ultrassom e, por outros autores por ele citados, utilizando ensaios estáticos. O autor destaca que apesar da madeira ser proveniente de amostragens diferentes, os valores em geral são adequadamente correspondentes e que a comparação entre ensaios estáticos e dinâmicos deve sempre levar em conta o comportamento não elástico linear da madeira submetida ao ensaio estático de compressão ou de flexão.

Tabela 2.4. Espécies de madeira e condição de umidade dos ensaios de Preziosa (1982).

Espécie Nome comum	Espécie Nome científico	Densidade (kg.m⁻³)	Umidade (%)
Dodomissinga	<i>Parkia nítida</i>	260	13,8
Quaruba	<i>Vochysia cayennensis</i>	350	13,3
Marupa	<i>Simarouba amara</i>	420	14,3
Limba	<i>Terminalia superba</i>	550	12,8
Pegreu	<i>Xylophia aethiopica</i>	710	10,8
Amarante	<i>Pettogyne venosa</i>	800	11,2
Coeur dehors	<i>Diploptropis purpúrea</i>	850	9,7
Monghinza	<i>Manilkara maboqueensis</i>	980	12,3
Balata rouge	<i>Manilkara bidentata</i>	1110	12,8
Endranendrana	<i>Humbertia madagascariensis</i>	1280	9,0
Peuplier Blanc	<i>Populus alba</i>	400	13,7
Western hemlock	<i>Tsuga heterophylla</i>	480	12,8
Chene pendoncule	<i>Quercus Pendunculata</i>	630	13,7
Frene commun	<i>Fraxinus Excelsior</i>	800	12,8

Tabela 2.5. Constantes técnicas obtidas por meio de ultrassom. Adaptado de Preziosa (1982).

Espécie	E_L (MPa)	E_R (MPa)	E_T (MPa)	ν_{LT}	ν_{TL}	ν_{LR}	ν_{RL}	ν_{TR}	ν_{RT}	G_{TR} (MPa)	G_{RL} (MPa)	G_{LT} (MPa)
Dodomissinga	5720	590	260	0,88	0,39	0,16	0,01	0,41	0,04	269	2283	1651
Quaruba	8120	910	380	0,62	0,26	0,48	0,02	0,31	0,03	179	1648	1270
Marupa	7070	1170	740	0,70	0,44	0,23	0,02	0,43	0,07	178	2094	1611
Limba	11050	1670	1170	0,63	0,44	0,43	0,05	0,39	0,06	1001	1916	1671
Pegreou	14850	2480	1650	0,59	0,39	0,39	0,04	0,37	0,06	649	2071	1722
Amarante	20070	2740	1930	0,57	0,40	0,39	0,04	0,56	0,08	793	2021	1626
Coeurs dehors	23250	2720	1920	0,58	0,41	0,58	0,05	0,27	0,03	1594	1952	1766
Monghinza	21350	4040	2190	0,61	0,33	0,41	0,04	0,34	0,06	921	1994	1451
Balata rouge	28460	4640	3360	0,58	0,42	0,44	0,05	0,28	0,05	993	2010	1539
Endranendrana	24010	5630	5110	0,50	0,46	0,44	0,09	0,37	0,09	1439	2322	2189
Peuplier	6820	1190	490	0,88	0,37	0,45	0,03	0,23	0,04	520	2501	2240
Western hemlock	10580	1720	1090	0,30	0,19	0,44	0,04	0,55	0,09	324	1949	1644
Chene	9400	2220	1320	0,65	0,38	0,39	0,05	0,37	0,09	968	2093	1754
Frene	16300	2240	1430	0,72	0,46	0,48	0,04	0,16	0,02	655	1660	1623

Tabela 2.6 Comparação de resultados das constantes elásticas obtidas por ultrassom (U) e por ensaios estáticos de Hearman (1966 citado por PREZIOSA, 1982) – S1; Schelder (sem referência, citado por PREZIOSA, 1982) – S2 e Gunnerson *et al.* (1973 citado por PREZIOSA, 1982) – S3. Adaptado de Preziosa (1982).

Espécie		E_L (MPa)	E_R (MPa)	E_T (MPa)	v_{LT}	v_{TL}	v_{LR}	v_{RL}	v_{TR}	v_{RT}	G_{TR} (MPa)	G_{RL} (MPa)	G_{LT} (MPa)
Peuplier	U	6820	1190	490	0,88	0,37	0,45	0,03	0,23	0,04	1000	900	210
	S1	14060	1290	590	0,70	0,33	0,39	0,019	0,32	0,03	1040	970	160
Western hemlock	U	10580	1720	1090	0,30	0,19	0,44	0,04	0,55	0,09	940	790	160
	S3	17930	1330	826	0,67	0,33	0,50	0,027	0,37	0,044	1098	1028	111
Chene	U	9400	2220	1320	0,65	0,38	0,39	0,05	0,37	0,09	1320	1110	610
	S2	5400	2180	985	0,64	0,30	0,45	0,09	0,33	0,13	1320	780	400
Frene	U	16300	2240	1430	0,72	0,46	0,48	0,04	0,16	0,02	1330	1300	520
	S1	21750	2380	1410	0,66	0,39	0,65	0,042	0,53	0,058	1250	880	360
	S2	16000	1540	820	0,71	0,36	0,49	0,03	0,46	0,05	1370	910	280

Bucur e Archer (1984) realizaram pesquisa utilizando corpos de prova cúbicos, de 16 mm de lado, de seis espécies de madeira: Pine¹, Spruce (*Picea abies L. Karst*), Douglas fir (*Pseudotsuga nenziesii*), Oak (*Quercus petraea Liebl.*), Beech (*Fagus sylvatica*) e Tulip tree (*Liriodendron tulipifera*) para a obtenção das 9 constantes elásticas da madeira.

Segundo os autores, as dimensões foram adotadas para que o sinal da onda de cisalhamento fosse adequado para as leituras e para que a peça se aproximasse o mais possível da condição teórica de ortotropia retangular da madeira. Esse último aspecto seria garantido pela possibilidade de obtenção de corpo de prova no qual a inclinação dos anéis de crescimento fosse pequena, podendo ser negligenciada.

As medições foram realizadas com equipamento de ultrassom (5052 U.A., Panametrics, EUA) e transdutores de onda longitudinal e transversal de 500 kHz e 1000 kHz. Para o acoplamento do transdutor à peça foi utilizado acoplante SWC da Panametrics.

Os autores prepararam, para cada espécie, um cubo retirado com as faces paralelas aos eixos de simetria e cubos retirados a 15°, 30° e 45° em relação aos eixos principais de simetria, totalizando 10 corpos de prova. Os mesmos cubos foram utilizados para a obtenção de velocidades a 105°, 120° e 135°.

Os termos da diagonal da matriz de rigidez foram determinados utilizando-se as velocidades longitudinais e transversais, obtidas nos eixos de simetria (equação 2.14) e, de fora da diagonal utilizando velocidades quase-transversais obtidas em cada ângulo.

Bucur e Archer (1984) determinaram as variações dos valores dos termos de fora da diagonal em função do ângulo de retirada dos corpos de prova tendo sido o menor erro obtido para o ângulo de 45° (11,90%) e o maior para o ângulo de 15° (55,77%). Esse resultado confirma os resultados de Zimmer e Cost (1970) para material compósito (fibra de vidro e epóxi).

Os autores discutem ainda a questão do comprimento de onda, indicando que a frequência de 1000 kHz (comprimento de percurso igual a 4 vezes o comprimento de onda) é mais adequada do que a de 500 kHz (comprimento de percurso igual a 2 vezes o comprimento de onda), pois se aproxima mais da condição teórica de meios infinitos. Por outro lado, frequências maiores induzem a maiores atenuações do sinal, fazendo com que em alguns casos os autores não tenham conseguido realizar a leitura de forma adequada.

¹ Não há informação mais detalhada de forma que não foi possível obter o nome científico da espécie estudada.

Os autores não realizaram ensaios estáticos comparativos, mas compararam os resultados de algumas espécies com resultados de ensaios estáticos de outros autores (lotes diferentes).

Para a espécie Oak, quando comparados aos resultados de Preziosa (1982, citado por BUCUR e ARCHER 1984) utilizando ultrassom e de Hearmon (1949, citado por BUCUR e ARCHER 1984) utilizando ensaio estático, Bucur e Archer (1984) ressaltam que os valores de módulo de elasticidade e de coeficientes de Poisson não foram muito próximos. Os autores argumentam que, a forma do corpo de prova e o tipo de ensaio (imersão) utilizado por Preziosa (1982, citado por BUCUR e ARCHER, 1984) para a obtenção da matriz foram diferentes. Embora não tenha sido destacado pelos autores, levando em conta a variabilidade da madeira, certamente o uso da mesma espécie não garantiria resultados muito próximos já que se tratou de lotes diferentes. A Tabela 2.7 apresenta os resultados obtidos por Bucur e Archer (1984) bem como os resultados comparativos apresentados pelos autores.

Tabela 2.7. Constantes técnicas obtidas por meio de ultrassom. Adaptado de Bucur e Archer (1984)

Espécie	Densidade (kg.m-3)	Frequência (kHz)	E _L (MPa)	E _R (MPa)	E _T (MPa)	v _{LT}	v _{TL}	v _{LR}	v _{RL}	v _{TR}	v _{RT}	G _{TR} (MPa)	G _{RL} (MPa)	G _{LT} (MPa)
Pine*	383	500	6634	320	113	1,46	0,025	0,337	0,016	0,535	0,016	73	925	683
		1000	6875	41	17	-	-	-	-	-	-	76	1006	676
Spruce*	409	500	5038	433	92	2,35	0,043	0,255	0,022	0,377	1,738	75	916	684
		1000	6019	356	149	-	-	-	-	-	-	77	883	812
Douglas fir	438	500	6057	399	180	1,18	0,035	0,666	0,044	0,573	1,274	114	944	830
		1000	8475	449	187	0,36	0,008	0,867	0,046	0,568	1,364	57	966	747
Tulip tree	574	500	8831	1174	808	1,00	0,092	1,48	0,197	0,248	0,359	290	1056	745
		1000	8454	977	682	0,56	0,045	1,277	0,184	0,454	0,651	281	1021	790
Oak	597	500	5267	1481	951	1,03	0,186	0,767	0,216	0,202	0,314	303	891	917
		1000	4745	1399	1122	0,75	0,177	0,823	0,242	0,239	0,298	292	845	758
Beech	674	500	9563	1486	882	0,79	0,073	1,112	0,174	0,342	0,577	353	1243	862
		1000	9160	1851	1037	0,90	0,102	1,244	0,251	0,146	0,261	356	1396	978
Resultados obtidos por outros autores e utilizados como comparação														
Oak**	660	Ensaio estático	5300	2140	970	0,50	0,086	0,33	0,13	0,30	0,64	-	-	-
Douglas fir**	450 a 510	Ensaio estático	15700	1060	780	0,45	0,022	0,29	0,020	0,37	0,39	-	-	-
Oak	630	Imersão	9400	2220	1320	0,39	0,05	0,37	0,09	0,65	0,38			

*Para essas espécies os valores foram considerados muito errados e foram rejeitados

** Hearmon (1949 citado por BUCUR e ARCHER, 1984)

Sinclair e Farshad (1987) compararam a determinação das constantes elásticas da madeira utilizando três métodos de ensaios – flexão estática, vibração e ultrassom. A espécie utilizada nos ensaios foi Douglas fir com densidade variando de 445 a 520 kg.m⁻³. Todos os corpos de prova foram retirados do mesmo bloco de madeira e de forma orientada segundo os eixos de simetria. Os ensaios de flexão foram realizados em oito corpos de prova de seção retangular, de acordo com a ASTM D198 (1985). Os resultados permitiram a obtenção do módulo de elasticidade longitudinal (E_L) e também do módulo de cisalhamento (G_{LT}). Os ensaios de vibração foram realizados nos mesmos oito corpos de prova de flexão e os resultados também permitiram a obtenção de E_L e de G_{LT} . Os ensaios de ultrassom foram realizados com cinco corpos de prova prismáticos de dimensões variadas. A dimensão longitudinal variou de 62,8 mm a 203,3 mm, a dimensão radial de 20,1 mm a 87,6 mm e a dimensão tangencial de 23,6 mm a 71,7 mm. Os ensaios foram realizados com equipamento de ultrassom (USL 33, Krautkramer) e transdutores de onda longitudinal de 250 kHz de frequência e 25,4 mm de diâmetro e de onda transversal de 1000 kHz de frequência e 19 mm de diâmetro. Como acoplante os autores utilizaram mel.

Sinclair e Farshad (1987) não determinaram as velocidades fora dos eixos de simetria, de forma que não foi obtida a matriz completa por ultrassom. Os resultados de ultrassom permitiram calcular os coeficientes da diagonal da matriz de rigidez (C_{LL} , C_{RR} , C_{TT}) e os módulos de cisalhamento em relação aos três planos principais (G_{RL} , G_{TL} e G_{TR}). Tendo em vista que os autores não determinaram os termos de fora da diagonal da matriz, os módulos de elasticidade longitudinais (E_L , E_R e E_T) foram igualados aos coeficientes de rigidez nas mesmas direções, sem a correção do coeficiente de Poisson. A Tabela 2.8 apresenta os resultados médios obtidos nos ensaios e, adicionalmente, resultados obtidos na literatura para a mesma espécie.

Tabela 2.8 Resultados médios apresentados por Sinclair e Farshad. (1987)

Tipo de ensaio	E_L (MPa)	G_{LT} (MPa)
Flexão estática	12740	290
Ressonância	8720	110
Ultrassom	14970	1130
Referência*	13500	810

*Mullins e Mckaiserlik (1984 citado por Sinclair e Farshad, 1987) onde G_{LT} foi obtido por meio da relação empírica $G_{LT}/E_L = 0,06$

Sinclair e Farshad (1987) concluíram que para a determinação do E_L o melhor método foi o ultrassom e que o ensaio de flexão estática utiliza deformações muito grandes do corpo de prova induzindo efeitos elásticos não lineares, reduzindo o valor do módulo de elasticidade. No caso de G_{LT} os autores também destacam que o ensaio de flexão é pouco preciso e que o ensaio de ultrassom foi o que apresentou resultados mais adequados.

Bucur e Perrin (1988) utilizaram, para a determinação da matriz de rigidez, três discos multifacetados de diâmetro 35 mm e espessura 20 mm, com faces cortadas em 0° , 15° , 30° , 45° , e 75° e 90° . Cada disco foi retirado de um plano de simetria elástica.

Os autores utilizaram dois tipos de onda – de volume e de superfície. Os ensaios com ondas de compressão foram realizados com equipamento de ultrassom (5052UA, Panametrics) e transdutores de ondas longitudinais e transversais de 1000 kHz. Os ensaios com ondas de superfície foram realizados utilizando equipamento de ultrassom (Steinkamp) acoplado a um analisador de sinal (5052 UA, Panametrics) e a um osciloscópio (5220, Schlumberger). Tendo em vista que as ondas de superfície não foram utilizadas nessa pesquisa, o detalhamento referente a esse ensaio não será o foco dessa revisão.

Os autores realizaram ensaios com ondas de volume em cinco espécies de dicotiledôneas: Curly maple (*Acer pseudoplatanus L.*), Horse Chestnut (*Aesculus hippocastanum M.*), Beech (*Fagus sylvatica*), Tulip tree (*Liriodendron tulipifera*) e Oak (*Quercus petraea Liebl.*) e 3 coníferas: Spruce (*Picea abies L. Karst*), Sitka spruce (*Picea sitkensis*) e Douglas fir (*Pseudotsuga nenziesii*).

Na determinação das velocidades de cisalhamento V_{44} ($[V_{RT} + V_{TR}]/2$) e V_{55} ($[V_{LT} + V_{TL}]/2$) os autores comentam que as discrepâncias de valores entre a direção de propagação e de polarização (Ex: V_{RT} e V_{TR}) foram dependentes do posicionamento dos anéis de crescimento presentes na seção. Os autores destacam também que nas espécies nas quais não havia muita diferenciação, dentro do anel de crescimento, entre a madeira de primavera e de inverno essas discrepâncias eram menores.

Em relação ao ângulo de inclinação ideal para a obtenção dos parâmetros de fora da diagonal, Bucur e Perrin (1988) indicam haver dependência da espécie e do plano de simetria.

A Tabela 2.9 apresenta os resultados da matriz de rigidez obtida pelos autores.

Tabela 2.9. Elementos da matriz de rigidez obtidos por ultrassom (MPa). Adaptado de Bucur e Perrin (1988)

Espécie	Densidade Kg.m⁻³	C₁₁	C₂₂	C₃₃	C₄₄	C₅₅	C₆₆	C₁₂	C₁₃	C₂₃
Horse chestnut	510	11662	2723	974	147	693	1224	2581	1045	1290
Tulip tree	574	18162	2405	1311	184	929	1146	2461	2835	820
Beech	674	17325	3262	1640	621	1087	1518	3036	1689	742
Curly maple	700	13246	4695	2564	461	1509	2129	3384	1858	2231
Oak	600	15429	2558	1419	279	941	1434	231	116	603
Spruce	485	13923	1210	637	110	733	848	284	231	760
Stika spruce	450	12880	2100	1080	91	1110	1225	1029	396	1029
Douglas	440	13310	2389	1742	1380	1212	1215	1500	1006	1246

François (1995) propôs corpo de prova em forma de poliedro com 26 faces para a determinação das constantes elásticas da madeira (Figura 2.4). Esse corpo de prova permite a obtenção de todos os elementos da matriz de rigidez com apenas 1 corpo de prova.

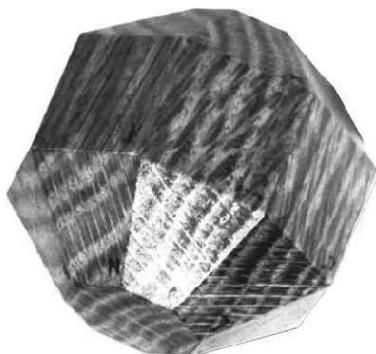


Figura 2.4. Corpo de prova em poliedro de 26 faces. Fonte: François (1995)

A usinagem desse corpo de prova se inicia em um cubo, se garantido a ortogonalidade. O primeiro corte a 45° é então realizado para obter a primeira face secundária. Da mesma forma, outro corte a 45° é realizado para obter a primeira face terciária e assim, sucessivamente.

Os ensaios foram realizados em três espécies de madeira: Chêne (*Quercus pedunculata*), Hêtre (*Fagus sylvatica*) e Sippo² utilizando equipamento de ultrassom (Panametrics) e transdutores de onda longitudinal e de cisalhamento de 1000 kHz e 15 mm de diâmetro.

A madeira de Chêne possuía densidade de 953 kg.m^{-3} , o Hêtre 898 kg.m^{-3} e o Sippo 585 kg.m^{-3} . Os corpos de prova tinham largura de 55 mm para as espécies Chêne e Hêtre e 45 mm para o Sippo.

François (1995) calculou a matriz de rigidez primeiramente desconsiderando a ortotropia da madeira, ou seja, calculou os 36 elementos da matriz, mostrando ser possível essa determinação por ultrassom. Esse detalhamento não é foco dessa pesquisa, mas os resultados são interessantes, pois demonstram a potencialidade do método para ser aplicado em materiais nos quais não se conhece o tipo de comportamento.

Posteriormente o autor determinou a matriz de rigidez das três espécies de madeira considerando a ortotropia e, por meio da inversão da matriz, calculou as constantes elásticas.

² Não há detalhamento dessa espécie de forma que não foi possível obter o nome científico.

Para a espécie Chêne, François (1995) conclui que os valores obtidos por ultrassom foram um pouco inferiores à valores obtidos anteriormente por outros autores para essa espécie e cita a condição de umidade diferente entre os ensaios como uma das razões para esse resultado. Adicionalmente, o autor determina a relação entre a consideração da matriz de 36 elementos e da matriz ortotrópica (12 elementos) $\left\| \frac{C - C_{ortotrópico}}{C} \right\| = 13,2\%$.

Da mesma forma, os autores determinam também a matriz de rigidez considerando o material com isotropia transversal (direção R aproximadamente igual à direção T) e calcula a relação $\left\| \frac{C - C_{isotransversal}}{C} \right\| = 16,6\%$.

Para a espécie Hêtre, François (1995) obtém relação com a ortotropia de 19,2% e com a isotropia transversal de 26,3%. Em relação à obtenção dos parâmetros elásticos pela inversão da matriz ortotrópica o autor obteve valores considerados errôneos, tanto para os módulos quanto para os coeficientes de Poisson. François (1995) atribui os resultados aberrantes à curvatura dos anéis de crescimento, fazendo com que a propagação da onda não se efetuasse de forma correta.

Para a espécie Sippo, François (1995) apresenta relações de 19,1% com a ortotropia e de 23,4% com a isotropia transversal. Os valores dos parâmetros elásticos obtidos pela inversão da matriz de rigidez (ortotrópica) foram considerados aceitáveis pelo autor quando comparado a valores obtidos em outras pesquisas, exceto o valor de G_{LT} que foi negativo. O autor atribuiu esse resultado a problema de leitura das velocidades das ondas de cisalhamento que ocorreram nesse plano (V_{55}). A Tabela 2.10 resume os resultados obtidos por François (1995). Esse autor conclui que o método do ultrassom responde ao problema colocado por sua pesquisa, que era a verificação da possibilidade de utilizar esse método em materiais cujo comportamento em termos de anisotropia é desconhecido. Indica também que o método pode ter avanços considerando sob o ponto de vista experimental (equipamentos e tecnologia de medição). Em relação ao tipo de medição (por contato), o autor indica que a precisão é menor do que em ensaios utilizando o método da imersão, mas que em contrapartida é um método de mais simples aplicação prática.

Tabela 2.10. Resumo dos resultados dos parâmetros elásticos obtidos por François (1995).

Espécie	E_L (MPa)	E_R (MPa)	E_T (MPa)	v_{LT}	v_{TL}	v_{LR}	v_{RL}	v_{TR}	v_{RT}	G_{TR} (MPa)	G_{RL} (MPa)	G_{LT} (MPa)
Chene	12900	4060	2360	0,31	0,07	0,07	0,02	0,22	0,37	1610	1310	1030
Hetre	11200	4100	1260	1,97	0,22	-0,28	-0,10	0,18	0,59	2490	5970	4720
Sippo	12320	1520	1480	0,30	0,04	0,40	0,04	0,25	0,16	1720	1700	-300

Bucur e Rasolofosaon (1998) realizaram pesquisa para estudar e compara a anisotropia da madeira e da rocha. Tendo em vista o objetivo dessa pesquisa os ensaios e resultados relativos à rocha não serão discutidos. Os autores utilizaram como corpo de prova de madeira uma esfera os ensaios foram realizados pelo método da imersão em um tanque com água filtrada. A espécie utilizada foi o Oak (*Quercus petraea*), com 690 kg.m^{-3} . A esfera possuía 50 mm de diâmetro e foi encapada com uma fina camada de resina para proteger a madeira da penetração da água. Os corpos de prova foram retirados de forma a apresentarem raio de curvatura dos anéis de crescimento muito maiores que o comprimento de onda.

Para os ensaios Bucur e Rasolofosaon (1998) utilizaram equipamento de ultrassom (5055 PR, Panametrics, EUA) e transdutores de 500 kHz de frequência e 25,4 mm de diâmetro. Foram realizadas medições em aproximadamente 100 direções de propagação para a determinação das velocidades. O objetivo principal dos autores foi discutir a anisotropia da madeira e quantificar os desvios que esse material tem em relação à consideração de simetria. De posse dessas medições os autores determinaram os 21 componentes da matriz de rigidez e concluíram que a madeira apresenta desvio em relação a condição de isotropia de 79,9% , em relação à condição de isotropia transversal de 10,9% e em relação à condição de ortotropia de 5,2%.

Rose *et al.* (1991) elaboraram pesquisa para a determinação das constantes elásticas de laminado composto de fibras de grafite. Os corpos de prova cúbicos de aresta variando de 10 mm a 25 mm foram retirados de uma peça de dimensões 320 mm por 63 mm por 210 mm. Segundo os autores as dimensões pequenas foram estabelecidas em função das grandes atenuações que ocorrem em materiais fibrosos, principalmente para as ondas quase-transversais. Os autores ensaiaram, com ultrassom, esses corpos de prova considerando três direções. A direção denominada X1 coincidia com ângulo de 0° em relação à fibra, a direção X2 com 90° em relação à fibra e a direção X3 com a espessura do corpo de prova. Além dessas 3 direções os autores realizaram os ensaios também a 45° considerando em relação às direções X1 e X2. Os autores consideraram esse material ortotrópico definindo, portanto, a necessidade de obtenção de 9 constantes independentes. Os ensaios foram realizados utilizando frequências de 100 kHz, 1000 kHz e 2000 kHz. Os resultados mostraram que para as frequências de 100 kHz e 1000 kHz as variações de velocidade foram mínimas, mas foram

encontradas grandes diferenças (em torno de 35%) para a frequência de 2000 kHz. Por meio de diferenças entre valores de velocidade em uma mesma direção, obtida com diferentes posicionamentos dos transdutores, os autores concluíram que, em média, houve um desvio de 9,6% da condição ortotrópica considerada inicialmente. Para a madeira Bucur e Rasolofosaon (1998) indicaram que esse desvio é de 5,2%. Ensaios de compressão estática foram realizados nos mesmos cubos utilizados no ensaio de ultrassom. Os autores realizaram o ensaio apenas até uma deformação máxima de 0,4% para garantir o comportamento elástico linear. ROSE et al. (1991) concluíram que com as menores frequências os ensaios de ultrassom tiveram resultados médios das constantes elástica apenas 8,3% maiores do que os obtidos nos ensaios estáticos de compressão. No entanto, aumentando-se as frequências as diferenças também aumentaram. Para 2000 kHz houve grandes atenuações do sinal, o que impediu leituras adequadas.

Keunecke *et al.* (2007) utilizaram o ensaio de ultrassom em corpos de prova cúbicos para a determinação dos módulos de elasticidade longitudinais (E_L , E_R e E_T) e dos módulos de cisalhamento (G_{LR} , G_{LT} e G_{RT}) da espécie Yew (*Taxus baccata*). Segundo os autores, apesar de muito importante por suas excelentes propriedades mecânicas e elásticas, não há dados disponíveis a respeito dessa espécie, exceto dados relativos à direção paralela às fibras. Assim como Sinclair e Farshad (1987) os autores comentam que ensaios estáticos são falhos, principalmente na determinação dos módulos de cisalhamento. Também como no caso de Sinclair e Farshad (1987) Keunecke *et al.* (2007) não realizaram ensaios para a obtenção do coeficiente de Poisson, de forma que a matriz de rigidez não foi determinada de forma completa e, portanto, os módulos de elasticidade longitudinais foram adotados de forma simplificada como sendo iguais as constantes de rigidez em cada uma das direções.

Os corpos de prova cúbicos foram retirados de peças de 2,5 m de comprimento de duas árvores de Yew obtidas em Zurique, Suíça. Para comparar as propriedades dessa madeira os autores realizaram ensaios com peças retiradas de duas árvores de Spruce (*Picea abies*). Todas as árvores tinham mais de 100 anos. Os autores utilizaram dois grupos de corpos de prova. O primeiro grupo com 120 corpos de prova, que foram climatizados a 20°C e 65% de umidade relativa (UR), os quais foram utilizados para as medições de ultrassom na condição seca ao ar. O segundo grupo com 14 corpos de prova que foram utilizados para medições em 4 diferentes condições de umidades. Primeiramente os autores climatizaram os corpos de prova

a 20°C/35% UR e realizaram os ensaios de ultrassom e depois, sucessivamente os ensaios foram repetidos para as condições 20°C/65% UR, 20°C/85% UR e 20°C/95% UR. Todos os corpos de prova tinham forma cúbica com 10 mm de aresta.

Os ensaios foram realizados com equipamento de ultrassom (USK 7D, Krautkramer, Alemanha) e transdutores de onda longitudinal de 10MHz e de onda transversal de 1 MHz e diâmetro, ambos com 12,7 mm. Os autores utilizaram dois tipos de acoplantes para os ensaios. Para o grupo 1 foi utilizado mel e para o grupo 2 um adesivo de placas de carbono com 0,3 mm de espessura, denominado PROVAC e utilizado usualmente em corpos de prova para microscopia eletrônica.

Os resultados dos módulos de elasticidade longitudinais (E_L , E_R , E_T) e de módulos de cisalhamento (G_{LT} , G_{LR} , G_{TR}) obtidos por ultrassom foram utilizados para comparar as duas espécies (yew e spruce). Os valores de E_L , E_R , E_T (Tabela 2.11) foram muito superiores aos valores obtidos com ensaios estáticos tabelados pela literatura e utilizados como comparação pelos autores, principalmente nas direções R e T, mas o foco da pesquisa não era essa comparação, mas sim a comparação das espécies, que foi viabilizada pelos resultados.

Em relação aos ensaios do grupo 2 os autores puderam determinar, pela curva de variação da velocidade, o ponto de saturação das fibras (PSF) das espécies, que resultaram em 24% para a Yew e 30% para a Spruce. Além disso, realizaram avaliação da influência da umidade nos parâmetros elásticos das duas espécies, mas o detalhamento dessa discussão não será realizado nesse trabalho por não ser o foco da pesquisa.

Tabela 2.11. Parâmetros elásticos obtidos por Keunecke *et al.* (2007) utilizando ensaio de ultrassom

Espécie		Densidade	E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
		kg.m^{-3}	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Yew	média	650	16700	4180	2300	1740	1650	368
	desvio	11,3	14,4	16,9	23,4	13,0	13,7	12,0
Spruce	média	400	13800	1800	1170	617	587	53
	desvio	9,7	20,0	10,6	21,1	12,1	10,2	10,9

Gonzalez *et al.* (2001) foi única referência brasileira encontrada cujo foco foi a obtenção das constantes elásticas da madeira por ultrassom. Os autores realizaram os ensaios

utilizando corpos de prova prismáticos de 20 mm x 20 mm x 300 mm das espécies Fava Amargosa (*Vataireopsis speciosa*), Jequitibá Rosa (*Cariniana micrantha*), Peroba d'Água (*Rauwolfia paraensis*) e Peroba Mico (*Aspidosperma macrocarpum*). Nos mesmos corpos de prova os autores realizaram ensaios de propagação de ondas (ultrassom) e ensaios estáticos de flexão. Os ensaios foram realizados com equipamento de ultrassom (AU80, Satec) para os transdutores de ondas longitudinais de frequência 80 kHz e equipamento de ultrassom (UA5052, Panametrics) para os transdutores de ondas transversais de frequência 1000 kHz. Na interface entre o transdutor e a madeira os autores utilizaram gel medicinal. Os ensaios foram realizados com a madeira entre 10% e 12,5% de umidade. Os autores determinaram somente os termos da diagonal da matriz e consideraram os 3 primeiros coeficientes da matriz como sendo os módulos de elasticidade E_L , E_R e E_T , sem a correção dos coeficientes de Poisson (Tabela 2.12). Na comparação dos módulos de elasticidade (longitudinais) obtidos em flexão estática com os obtidos por ultrassom, os autores concluíram que os obtidos por ultrassom eram de 40% a 60% superiores (Tabela 2.13). Apesar dos autores terem obtido os módulos de elasticidade longitudinal nas três direções e os módulos de cisalhamento nos três planos, por ultrassom, os resultados de ultrassom e de flexão estática foram comparados somente para o módulo de elasticidade longitudinal na direção longitudinal (E_L). Os autores comentam que, apesar das diferenças numéricas, o ensaio de ultrassom apresentou resultados coerentes aos de flexão, distinguindo as espécies com maior ou menor módulos. As regressões entre os módulos de elasticidade obtidos na direção longitudinal, de forma estática e dinâmica, apresentaram coeficientes de correlações (R) de 0,82 a 0,92.

Tabela 2.12. Coeficientes de rigidez determinados por Gonzalez *et al.* (2001) utilizando ultrassom.

Espécie	Densidade kg.m⁻³	C₁₁ MPa	C₂₂ MPa	C₃₃ MPa	C₄₄ MPa	C₅₅ MPa	C₆₆ MPa
Fava amargosa	740	19770	3621	2303	111	1456	1479
Jequitibá Rosa	670	18940	2582	1647	97	1378	1524
Peroba d'água	710	20090	3769	1933	114	1364	1436
Peroba mico	780	20650	4422	2658	135	1392	1424

Tabela 2.13 Resultados dos coeficientes de rigidez (CLL) obtidos por ultrassom e dos módulos de elasticidade obtidos em flexão estática (E_{L1} e E_{L2}) utilizando, respectivamente, as normas AFNOR (1942 citada por GONÇALEZ *et al.* 2001) e pela COPANT (1972, citada por GONÇALEZ *et al.* 2001)

Característica	Fava amargosa	Jequitibá Rosa	Peroba d'água	Peroba Mico
C_{LL} (MPa)	19770	18940	20090	20650
E_{L1}	11630	13210	13420	14280
E_{L2}	11510	13200	12810	14110

Mesmo que se determine, por ultrassom, a matriz de rigidez de forma completa, e a partir dela sejam calculadas todas as constantes elásticas da madeira, espera-se que os valores obtidos sejam numericamente um pouco superiores aos obtidos de forma estática. Essa questão é discutida por Preziosa (1982), Bucur (2006) e Gonzalez *et al.* (2001). O ensaio estático é conduzido por um fenômeno isotérmico, enquanto o ensaio dinâmico por um fenômeno adiabático. No processo isotérmico a energia interna do material nem aumenta nem diminui, enquanto no processo adiabático há um acréscimo na energia interna do material. No entanto é importante ressaltar que, nos casos em que não se corrija os valores das constantes obtidas por ultrassom pelo coeficiente de Poisson (Equações 2.20 a 2.22) os valores numéricos de C_{LL} , C_{RR} e C_{TT} embora possam ser correlacionados, serão muito superiores aos valores numéricos de E_L , E_R e E_T obtidos pelo ensaio estático.

Gonzalez *et al.* (2001) destaca, ainda, que no ensaio estático as solicitações levam a mudanças nas propriedades reológica dos materiais, enquanto os dinâmicos não provocam modificações na estrutura do material.

2.3 Coeficiente de Poisson e relações entre parâmetros elásticos da madeira

Tendo em vista que nesse trabalho o coeficiente de Poisson e as relações entre os parâmetros elásticos são discutidos na avaliação da metodologia proposta, esse item tem como objetivo apresentar alguns estudos que embasarão as discussões dos resultados.

Bucur (2006) comenta que medições precisas do coeficiente de Poisson não são obtidas facilmente por nenhum método e para nenhum tipo de sólido.

Para um sólido isotrópico, as condições de contorno para o coeficiente de Poisson (ν) e as relações Green e Zerna, (1968, apud BUCUR 2006) entre o módulo de elasticidade

longitudinal (E) e transversal (G) para um corpo de prova sob tensão podem ser descritas como:

$$-1 < \nu < \frac{1}{2} \text{ e } G = E/2 (1 + \nu) \text{ com } G > 0; E > 0 \text{ e } (1-2\nu) > 0 \text{ ou } (1 - \nu) > 0$$

Para um sólido ortotrópico a questão é mais complexa devido a seis coeficientes de Poisson correspondentes aos três planos de simetria. Levando em conta que a energia de deformação (W) precisa ser positiva:

$$W = \frac{1}{2} C_{ijkl} \epsilon_{ij} \epsilon_{kl} > 0 \text{ onde } C \text{ é a matriz de rigidez e } \epsilon \text{ as deformações.}$$

De forma similar se pode descrever a energia de deformação em função da matriz de flexibilidade [S].

$$W = \frac{1}{2} S_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl} > 0$$

Consequentemente $C_{ijkl} > 0$ e $S_{ijkl} > 0$, significando que todos os termos da matriz de rigidez e da matriz de flexibilidade são também positivos.

Considerando agora as relações entre os termos das matrizes [C] e [S] (Equações 2.20 a 2.28) é possível deduzir as condições de contorno para todos os coeficientes de Poisson de um sólido ortotrópico. O termo (S) das Equações 2.20 a 2.28 permite que sejam estabelecidas as relações entre os seis coeficientes de Poisson e, tendo em vista que todos os termos da matriz [C] são positivos e que os módulos de elasticidade (E) são positivos:

$$[1 - \nu_{12} \nu_{21} - \nu_{23} \nu_{32} - \nu_{13} \nu_{31} - 2\nu_{21} \nu_{32} \nu_{31}] > 0$$

Além disso

$$(1 - \nu_{23} \nu_{32}) > 0$$

$$(1 - \nu_{13} \nu_{31}) > 0$$

$$(1 - \nu_{21} \nu_{12}) > 0$$

Os coeficientes de Poisson correspondentes ν_{rq} e ν_{qr} terão o mesmo sinal (+) ou (-).

Com base na matriz de rigidez [S], a relação entre o coeficiente de Poisson e o módulo de Young é

$$-\nu_{rq}/E_q = -\nu_{qr}/E_r \text{ e, portanto, } \nu_{rq} = (\nu_{qr} E_q)/E_r$$

Todavia, para sólidos anisotrópicos é possível haver $E_r > E_q$ e, portanto, pode ocorrer $\nu_{rq} > 1,0$. A madeira é considerada ortotrópica, mas o material real, por si só pode estar distante dessa idealização, conforme já demonstrado por alguns dos autores citados no item anterior, Essa diferença pode ainda ser maior quando houver outros parâmetros de variação, tais como espessura e inclinação dos anéis de crescimento e presença de fibras.

Assim, valores de coeficiente de Poisson negativos ou maiores que 1 podem contradizer a intuição ou o que se espera, mas vários autores citados nessa revisão obtiveram, para a madeira e para materiais a base de madeira, valores de coeficiente de Poisson maiores que 1.

No caso do ensaio estático os termos da matriz de rigidez são calculados e não determinados pela consideração da matriz ortotrópica. Portanto, caso o comportamento da madeira fosse efetivamente ortotrópico $-\nu_{rq}/E_q = -\nu_{qr}/E_r$.

A Tabela 2.14 apresenta as relações apresentadas por Bodig e Jayne (1982). Por meio dessa tabela se verifica que há muitos desvios e que as diferenças variam entre as espécies e até mesmo entre diferentes amostragens de uma mesma espécie.

No caso do ensaio de ultrassom a premissa é a ortotropia, pois se consideram os termos $C_{12} = C_{21}$; $C_{13} = C_{31}$ e $C_{23} = C_{32}$ de forma que ao fazer a inversão se tem a condição teórica da matriz [S].

Tabela 2.14. Relações dos termos da matriz de flexibilidade (10^{-5}) obtidas em ensaio de compressão. Fonte Bodig e Jayne (1982).

Espécie	$\frac{\nu_{RL}}{E_R}$	$\frac{\nu_{LR}}{E_L}$	$\frac{\nu_{TL}}{E_T}$	$\frac{\nu_{LT}}{E_L}$	$\frac{\nu_{TR}}{E_T}$	$\frac{\nu_{RT}}{E_R}$
Ash	2,34	2,00	2,55	2,28	32,41	31,03
Aspen	5,13	3,86	5,81	2,88	128,00	104,33
Beech	2,28	2,28	2,69	2,55	22,75	22,06
Birch	2,14	2,07	2,00	1,79	48,26	42,06
Douglas* fir	1,52	1,79	1,86	1,59	33,78	30,34
	2,35	1,34	2,22	2,26	45,30	39,73
Maple	4,21	3,17	3,03	3,45	37,23	31,07
Oak	4,21	4,27	6,14	6,48	20,68	21,37
Oak red	1,78	1,40	3,02	2,31	25,97	30,63
Pine scotch	2,41	1,79	1,79	2,14	42,75	37,23
Spruce	2,83	1,93	2,28	1,65	46,88	44,13

*resultados de duas diferentes amostragens para a mesma espécie

A Tabela 2.15 mostra alguns valores de coeficiente de Poisson obtidos por ultrassom em corpos de prova cúbicos Bucur (2006). A frequência utilizada para os ensaios foi de 1 MHz como no caso dessa pesquisa. Como comparação a autora apresenta, também, valores obtidos em ensaio estático para uma das espécies.

Tabela 2.15. Valores de coeficientes de Poisson obtidos por ultrassom. Fonte: Bucur (2006).

Espécie	Coeficientes de Poisson					
	ν_{LT}	ν_{TL}	ν_{LR}	ν_{RL}	ν_{TR}	ν_{RT}
Tulip tree	1,080	0,142	1,261	0,236	0,067	0,096
Oak	0,735 (47%)	0,181 (118%)	0,871 (164%)	0,259 (99%)	0,228 (181%)	0,274 (-9%)
Beech	0,863 (67%)	0,100 (132%)	1,281 (185%)	0,257 (267%)	0,147 (41%)	0,555 (-27%)
Douglas fir	0,646	0,041	1,095	0,147	0,147	1,026
Valores obtidos em ensaio estático (comparativo)						
Beech	0,518	0,043	0,449	0,070	0,359	0,707
Oak	0,500	0,083	0,330	0,130	0,640	0,300

*valores entre parêntesis indicam as diferenças entre os ensaios de ultrassom e estáticos

Verifica-se, pela Tabela 2.15 que os valores mais altos (algumas vezes acima de 1,0) foram obtidos para v_{LR} e v_{LT} . Os valores de v_{TL} e v_{RL} que no ensaio estático são os menores, no ensaio de ultrassom nem sempre se comportam da mesma maneira.

Bodig e Jayne (1982) comentam que a obtenção de coeficientes de Poisson muito pequenos é complicada, porque exigiria grande precisão dos equipamentos de medição das deformações. Alternativa que os autores colocam seria a utilização de corpos de prova grandes, mas nesse caso a impossibilidade de serem obtidos anéis de crescimento bem direcionados e retilíneos seria ainda mais prejudicial para a precisão dos valores do coeficiente de Poisson.

Bodig e Jayne (1982) apresentam, também, algumas relações entre os módulos de elasticidade longitudinais e tangenciais. Segundo os autores essas relações apresentam grandes variações entre as espécies, mas que, de forma geral, a ordem de grandeza dessas relações é

$$\begin{aligned} E_L : E_R : E_T &\sim 20 : 1,6 : 1,0 \\ G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} &\sim 10 : 9,4 : 1,0 \\ E_L : G_{LR} &\sim 14 : 1,0 \end{aligned}$$

Mascia (1991) obteve, no ensaio de compressão estático, relações de G_{LR}/G_{LT} e G_{LT}/G_{LR} próximas de 8,0. Por outro lado, Bucur (2006) obteve, para ensaios de ultrassom em quatro espécies (Tulip tree, Oak, Beech e Douglas fir) relações G_{LR}/G_{LT} entre 2,5 e 3,0, entre G_{LT}/G_{LR} entre 2,0 e 2,5 e E_L/G_{LR} entre 5 e 8.

No caso do coeficiente de Poisson, Bodig e Jayne (1982) também sugerem alguns valores fixos, embora argumentem que as variações podem ser bem grandes em torno desses valores. A Tabela 2.16 apresenta os valores sugeridos pelos autores.

Tabela 2.16. Valores dos coeficientes de Poisson sugeridos por Bodig e Jayne (1982) para dicotiledôneas

ν_{RL}	ν_{TL}	ν_{LR}	ν_{TR}	ν_{LT}	ν_{RT}
0,044	0,027	0,37	0,33	0,50	0,67

2.4. Aspectos gerais relativos à dimensão do corpo de prova e à frequência dos transdutores para a determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom

Bucur e Archer (1984) e Keuneche *et al.* (2007) enfatizam que a melhor forma para se obter resultados que se aproximem das condições ortotrópicas da madeira é utilizando corpos de prova pequenos, nos quais a curvatura dos anéis de crescimento possa ser negligenciada.

Detalhamento e discussão aprofundada a respeito das interferências que podem haver na propagação de ondas quando o corpo de prova apresenta anéis de crescimento inclinados foi realizada por Bucur (2006). Nesse detalhamento a autora calcula as dispersões na determinação das constantes elásticas e conclui que os maiores erros ocorrem na determinação das constantes que utilizam as ondas de cisalhamento (C_{44} , C_{55} e C_{66}) e das constantes de fora da diagonal (C_{12} , C_{13} e C_{23}), justamente porque nesses casos a interferência da inclinação dos anéis de crescimento são maiores.

O aspecto relacionado à dimensão do corpo de prova é complexo, uma vez que não é um fator que pode ser visto de forma isolada. Quando a dimensão do corpo de prova é pequena é necessário o uso de transdutores de frequências mais altas, as quais estão relacionadas com maiores atenuações do sinal, principalmente na madeira que é um material heterogêneo e visco-elástico.

As equações gerais apresentadas nos estudo sobre propagação de ondas em meios sólidos partem do princípio ideal de que o meio de propagação é infinito, ou seja, o comprimento de onda (λ) é muito superior às dimensões da seção transversal do corpo pelo qual essa onda atravessa. Um meio infinito é um meio no qual a velocidade de propagação da onda independe do comprimento de onda e da frequência (meio não dispersivo).

Quando a dimensão da peça a ser ensaiada, segundo a direção de propagação da onda, se aproxima do comprimento de onda (λ) o meio passa a se denominar finito e, nesse caso, os fenômenos de reflexão e de refração das ondas começam a afetar a propagação e, portanto, a teoria elementar não é mais aplicada diretamente, pois o meio passa a ser dispersivo. Além do comprimento da peça, a dimensão da seção transversal (ou do diâmetro) da peça em relação ao diâmetro do transdutor também afeta a condição de meio infinito e, para evitar a perda do sinal, é necessário que o transdutor fique circunscrito à peça.

Tendo em vista que não é possível, nas condições reais de ensaios, atender rigidamente as hipóteses teóricas, alguns autores (Bucur 1984, Bartholomeu *et al.*, 2003, Goia *et al.*, 2006 e Trinca, 2008) buscaram determinar os valores mínimos da relação entre o comprimento de percurso da onda (L) e o comprimento de onda (λ), acima dos quais essa influência pudesse ser desprezada. De forma geral esses autores concluíram que relações L/λ superiores a 3 permitiriam a obtenção de velocidades menos afetadas por essa questão.

Assim, o uso de corpos de prova de pequenas dimensões exigiria o uso de frequências mais elevadas para garantir que o comprimento de percurso seja suficiente para obedecer as relações indicadas.

No entanto, é necessário garantir-se, ainda, que o sinal seja recebido com boa amplitude. A amplitude do pulso recebido é função da atenuação do sinal durante a propagação da onda. Essa atenuação é influenciada pelo material avaliado e é atribuída a dois fatores principais. Um desses fatores é a dispersão da onda, resultado da não homogeneidade do material. Se a microestrutura do material interfere em suas propriedades, é natural se esperar que os mecanismos de propagação de onda estejam relacionados, no caso da madeira, com sua estrutura celular. Bucur (2006) indica que, para frequências entre 1 e 1,5 MHz o comprimento de onda é aproximadamente igual à dimensão do maior elemento anatômico. Segundo a autora quando a dimensão do elemento anatômico é comparável ao comprimento de onda, pode haver grandes atenuações do sinal.

O segundo fator que contribui para a atenuação do sinal é a absorção, a qual consiste na conversão da energia sonora em calor. Esse fator aumenta com a frequência do transdutor.

Dessa forma, a escolha da frequência adequada ao tamanho da peça a ser avaliada (tanto no caso da seção transversal, para evitar-se a reflexão da onda nas bordas, quanto em

termos de comprimento, garantindo-se que a leitura seja feita no campo adequado) é de fundamental importância para que os resultados do ensaio sejam representativos.

Segundo Kolsky (1963, apud HERZIG,1992) no caso de sólidos visco-elásticos como é o caso da madeira, as ondas se propagam mais rapidamente em frequências elevadas do que em baixas. Bucur (1984), ensaiando “*carottes de sondage*” de 5 mm de diâmetro utilizando transdutores de 80 kHz e de 2 MHz, também verificou que a velocidade aumenta com o aumento da frequência.

Bucur e Feeney (1992) avaliaram a influência da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultrassom tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal. Para o estudo utilizaram frequências de 100, 250, 500, 1000 e 1500 kHz. Os autores concluíram que a velocidade na direção longitudinal (V_{LL}) é a mais afetada pela frequência do transdutor, havendo um aumento significativo da velocidade de 100 kHz a 500 kHz. Acima dessa frequência a velocidade continua aumentando, mas esse aumento é bem menor. Segundo os autores, os valores baixos de velocidade (por volta de 3000 m/s) obtidos a 100 kHz foi consequência da dispersão geométrica ocorrida devido à relação entre o diâmetro do transdutor e a seção da peça. Esse resultado corrobora os obtidos por Davis (1948). A velocidade nas demais direções longitudinais (V_{RR} e V_{TT}) e também as obtidas com ondas de cisalhamento (V_{TR} , V_{LT} e V_{LR}) não foram afetadas pela frequência.

Uma terceira questão que se coloca em relação à escolha da dimensão do corpo de prova é relacionada à características intrínsecas dos transdutores.

O campo acústico de um transdutor é subdividido em duas regiões – campo próximo e campo distante. A região de campo próximo à face do transdutor caracteriza-se pela ocorrência de superposição entre as ondas de ultrassom. As ondas interferem-se construtivamente e destrutivamente provocando máximos e mínimos na intensidade do campo acústico. Na região de campo distante, as ondas de ultrassom sofrem interferência construtiva de maneira a formar uma frente de onda quase plana que se atenua à medida que se propaga no meio e distanciando-se da fonte. Por ser uma região de interferência, o campo próximo deve ser evitando e, para isso, deve-se tomar o cuidado de se utilizar uma peça com comprimento superior ao comprimento do campo próximo.

O comprimento do campo próximo (N) é função do diâmetro do elemento cristalino (D), da frequência do transdutor (f) e da velocidade de propagação da onda no material (V) e pode ser calculado pela equação 2.29.

$$N = \frac{D^2 f}{4V} \quad \text{Equação 2.29}$$

O comprimento de onda (λ) é função da relação entre a velocidade de propagação da onda no material e a frequência do transdutor (Equação 2.30).

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad \text{Equação 2.30}$$

Além disso, a relação D/λ indica o padrão de radiação da onda no campo distante. Em princípio, quanto maior a relação D/λ melhor é a resolução e a penetração do sinal. No caso inverso se observa a emissão de componentes indesejáveis de ondas transversais. Por outro lado, o comprimento do campo próximo aumenta à medida que a relação D/λ aumenta, de forma que é necessário adotar o transdutor que permita melhor adequação do comprimento de campo próximo e do comprimento da peça a ser avaliada.

2.5. Acoplamentos do transdutor e peça a ser ensaiada

O acoplante é uma substância líquida ou pastosa, que tem por finalidade favorecer a transmissão das ondas de ultrassom do transdutor para a peça em ensaio, reduzindo a reflexão da onda devido à diferença de impedância entre os meios. Essa redução da reflexão da onda é obtida pela redução ou eliminação da camada de ar entre o transdutor e o material a ser avaliado. A escolha do acoplante depende das condições superficiais da peça, do tipo de material que está sendo ensaiado e do tipo de onda Bucur (2006).

Numa superfície com bom acabamento e propagação de onda longitudinal, basta uma camada de um óleo fino ou um gel. Em superfícies com rugosidade excessiva e para a propagação de ondas de cisalhamento é necessário acoplante mais viscoso, podendo até ser necessária a utilização de graxa, glucose ou mesmo glicose.

Por causa da diferença entre impedâncias acústicas do material a ser ensaiado e do meio de acoplamento (água, gel etc.) a propagação da onda é fortemente afetada por processos físicos como a reflexão, a atenuação e a difração das ondas Lasaygues (2007).

Trinca *et al.* (2009) realizaram trabalho utilizando 6 tipos de acoplantes (gel medicinal, gel PANAMETRICS SWC, glucose de amido, glucose de milho e Carboxy methyl celulose a 6% e a 10%) em 9 espécies de madeira. O autor concluiu que nenhum dos acoplantes teve desempenho superior quando se considera a velocidade de propagação das ondas longitudinais e transversais, porque o desempenho é muito dependente da espécie. No entanto, no caso da atenuação, independente da espécie, o melhor acoplante foi o gel PANAMETRICS SWC. Mesmo que o objetivo não seja a medição da atenuação do sinal, essa questão é importante porque grandes atenuações podem afetar ou inviabilizar a leitura do tempo de propagação das ondas de cisalhamento.

2.6. Obtenção dos termos da matriz de flexibilidade

Embora os objetivos dessa pesquisa não tenha sido a determinação direta da matriz de flexibilidade, essa determinação será realizada para ser utilizada como comparação da determinação indireta (pela inversa da matriz de rigidez) utilizando ultrassom. Dessa forma, são apresentados nesse item alguns aspectos teóricos relativos a matriz de flexibilidade. Esses aspectos teóricos foram baseados em Bodig e Jayne (1982).

2.6.1. Aspectos teóricos da matriz de flexibilidade

2.6.1.1. Componentes de tensão

Considerando um elemento tridimensional (eixos x, y, z ou 1, 2, 3) sujeito a um estado de tensões, em cada face esse 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_{21} = tensão atuando no plano 2 e na direção 1.

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

Assim, considerando o elemento tridimensional seria possível a existência de 18 componentes (6 faces x 3 componentes cada). No entanto, apenas 9 componentes são independentes uma vez as tensões normais que atuam em planos paralelos têm que ser iguais (- 3) e as tensões de cisalhamento que atuam em planos perpendiculares (Exemplo σ_{12} e σ_{21}) têm que ser iguais (-6) para que o elemento esteja em equilíbrio.

Dessa forma a matriz de tensões de um elemento pode ser escrita como sendo

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

Note que os elementos da diagonal dessa matriz representam as tensões normais e os elementos fora da diagonal as tensões de cisalhamento.

2.6.1.2. Componentes de Deformação

A deformação específica é definida como sendo a relação entre a variação do comprimento pelo comprimento original.

De forma simplificada, se um elemento de dimensões pequenas (Δx_i) sofre uma deformação também pequena na direção i (Δu_i) essa deformação é dada por

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\Delta u_i}{\Delta x_i}$$

Para $i = 1, 2$ e 3 que representam as três deformações normais.

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 $\tan \alpha_1 = \frac{\Delta u_1}{\Delta x_2}$ e $\tan \alpha_2 = \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1}$ e, para deformações pequenas os ângulos em radianos são

$$\alpha_1 = \frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} \text{ e } \alpha_2 = \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1}$$

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

$$\gamma_{12} = \frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} + \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1}$$

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_{22} , γ_{33} , γ_{23} , γ_{13} , γ_{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.

Para pequenos deslocamentos a matriz das componentes de deformação pode ser escrita de forma simplificada como

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta u_1}{\Delta x_1} & \frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} & \frac{\Delta u_1}{\Delta x_3} \\ \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1} & \frac{\Delta u_2}{\Delta x_2} & \frac{\Delta u_2}{\Delta x_3} \\ \frac{\Delta u_3}{\Delta x_1} & \frac{\Delta u_3}{\Delta x_2} & \frac{\Delta u_3}{\Delta x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix}$$

Tendo em vista que $\delta_{ij} \neq \delta_{ji}$ a matriz de deformações não é simétrica como a de tensões. Todavia essa matriz pode ser decomposta em duas outras – a matriz simétrica e a anti-simétrica tomando-se metade da soma e metade da diferença dos elementos de posições idênticas em lados opostos em relação à diagonal.

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

A parte esquerda da equação é a matriz de deformação (ϵ) que é simétrica e a parte direita é a matriz de rotação (ω) que é anti-simétrica.

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 x deformação. A matriz de deformações pode ser escrita como

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

Ou

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

Tendo em vista 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

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} + \frac{\Delta u_2}{\Delta x_1} \right) = \varepsilon_{12}$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_2}{\Delta x_1} + \frac{\Delta u_1}{\Delta x_2} \right) = \varepsilon_{21}$$

Como essa matriz é simétrica $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} = \frac{1}{2} \gamma_{ij} = \frac{1}{2} \gamma_{ji}$

2.6.1.3. 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.

No item 2.1 foi visto que, para materiais ortotrópicos, como a madeira, a lei de Hooke generalizada pode ser escrita como

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

Na qual σ_{ij} = 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 C_{ijkl} é a matriz de rigidez, que é obtida por métodos de propagação de ondas.

No entanto, a lei de Hooke também pode ser escrita como

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl}$$

Na qual S_{ijkl} é a matriz de flexibilidade que pode ser obtida por métodos estáticos.

Já utilizando a simplificação dos índices a lei de Hooke pode ser escrita como

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

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 aqui resumida.

Imagine-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 matriz 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:

$$\epsilon_1 = S_{11} \sigma_1, \epsilon_2 = S_{21} \sigma_1, \epsilon_3 = S_{31} \sigma_1$$

Se a tensão σ_1 for removida e se aplicar σ_2 de forma isolada as deformações serão dadas por

$$\epsilon_1 = S_{12} \sigma_2, \epsilon_2 = S_{22} \sigma_2, \epsilon_3 = S_{32} \sigma_2$$

Da mesma forma aplicando-se agora somente σ_3

$$\epsilon_1 = S_{13} \sigma_3, \epsilon_2 = S_{23} \sigma_3, \epsilon_3 = S_{33} \sigma_3$$

Assim, pelo princípio da superposição, a deformação total produzida pela aplicação de todas as tensões normais será a soma das contribuições individuais:

$$\varepsilon_1 = S_{11} \sigma_1 + S_{12} \sigma_2 + S_{13} \sigma_3$$

$$\varepsilon_2 = S_{21} \sigma_1 + S_{22} \sigma_2 + S_{23} \sigma_3$$

$$\varepsilon_3 = S_{31} \sigma_1 + S_{32} \sigma_2 + S_{33} \sigma_3$$

Tendo em vista que a aplicação de tensões normais produz deformações em direção ortogonal de sinal contrário, alguns dos coeficientes deverão ser negativos.

No caso das tensões de cisalhamento apenas ocorrerão deformações de cisalhamento, de forma que para uma tensão de cisalhamento aplicada no plano 2-3:

$$\varepsilon_{23} = S_{44} \sigma_{23}, \text{ pois, como já visto no item 2.1, o plano 2-3 é representado pelo índice 4}$$

Da mesma forma se podem escrever para os demais planos:

$$\varepsilon_{13} = S_{55} \sigma_{13}, \text{ pois o plano 1-3 é representado pelo índice 5}$$

$$\varepsilon_{12} = S_{66} \sigma_{12}, \text{ pois o plano 1-2 é representado pelo índice 6}$$

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. Conseqüentemente se pode 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 se resume a 12 elementos, pois os demais serão zero. Essa simplificação da matriz só ocorre se a simetria e os eixos geométricos forem coincidentes.

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

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 seqüência de aplicação de tensões no corpo.

Se uma tensão σ_1 é aplicada em um corpo a deformação será dada por $\epsilon_1 = S_{11} \sigma_1$ e a energia de deformação armazenada é a área sob o gráfico tensão deformação.

O trabalho por unidade de volume, ou energia de deformação é dado por:

$$\omega_1 = \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon_1$$

Substituindo na expressão da deformação

$$\omega_1 = \frac{1}{2} S_{11} \sigma_1^2$$

Se agora σ_2 for aplicado no mesmo elemento enquanto σ_1 continua também sendo aplicado, a energia de deformação será

$$\omega_2 = \frac{1}{2} \sigma_2 \epsilon_2 + \sigma_1 \epsilon_1$$

O primeiro termo é a área abaixo do diagrama tensão deformação como no caso anterior. Como a tensão σ_1 continua sendo aplicada, uma quantidade adicional de energia é estocada pelo elemento.

Substituindo as deformações $\epsilon_1 = S_{12} \sigma_2$ e $\epsilon_2 = S_{22} \sigma_2$ na equação da energia:

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

A soma de ω_1 com ω_2 resulta na energia total armazenada pelo elemento:

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

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 equação $\gamma_2 = S_{22} \sigma_2$.

Portanto, a energia armazenada é:

$$\omega_3 = \frac{1}{2} S_{22} \sigma_2^2$$

Se σ_1 é agora aplicada a energia adicional armazenada no material será:

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

A energia total armazenada nessa sequencia de aplicação de tensão será:

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

Tendo em vista que a energia armazenada em um material precisa ser uma quantidade única, independente da sequencia de aplicação da tensão:

$$\omega_{12} = \omega_{34}$$

Substituindo as expressões nessa igualdade

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

Verifica-se que $S_{12} = S_{21}$

Realizando-se o mesmo experimento com as tensões σ_1 e σ_3 e σ_2 e σ_3 verifica-se, de igual modo, que $S_{13} = S_{31}$ e que $S_{23} = S_{32}$. Portanto,

$$S_{ij} = S_{ji}$$

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 como

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

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 deformação

$$\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = E_1$$

$$\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = E_2$$

$$\frac{\sigma_3}{\varepsilon_3} = E_3$$

$$\frac{\sigma_{12}}{\varepsilon_{12}} = G_{12}$$

$$\frac{\sigma_{13}}{\varepsilon_{13}} = G_{13}$$

$$\frac{\sigma_{23}}{\varepsilon_{23}} = G_{23}$$

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.

Comparando as equações acima com as equações

$$\varepsilon_1 = S_{11} \sigma_1$$

$$\varepsilon_2 = S_{21} \sigma_1$$

$$\varepsilon_3 = S_{31} \sigma_1$$

$$\varepsilon_{23} = S_{44} \sigma_{23}$$

$$\varepsilon_{13} = S_{55} \sigma_{13}$$

$$\varepsilon_{12} = S_{66} \sigma_{12}$$

São obtidas as relações:

$$E_1 = 1/S_{11}$$

$$E_2 = 1/S_{22}$$

$$E_3 = 1/S_{33}$$

$$G_{23} = 1/S_{44}$$

$$G_{13} = 1/S_{55}$$

$$G_{12} = 1/S_{66}$$

Resumindo, os módulos elásticos são a recíproca dos coeficientes da diagonal da matriz de flexibilidade.

Por definição o coeficiente de Poisson é a relação entre a deformação passiva e a deformação ativa:

$$-\nu_{ij} = \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}$$

Materiais isotrópicos são caracterizados por um único coeficiente de Poisson. Materiais ortotrópicos, por outro lado, possuem 6 coeficientes de Poisson.

Com aplicação de uma tensão σ_1 são produzidas três deformações, de acordo com a expressão:

$$\varepsilon_1 = S_{11} \sigma_1, \varepsilon_2 = S_{21} \sigma_1, \varepsilon_3 = S_{31} \sigma_1$$

Substituindo a expressão do coeficiente de Poisson tem-se:

$$-\nu_{12} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{S_{21}\sigma_1}{S_{11}\sigma_1} = \frac{S_{21}}{S_{11}}$$

$$-\nu_{13} = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} = \frac{S_{31}\sigma_1}{S_{11}\sigma_1} = \frac{S_{31}}{S_{11}}$$

De forma similar, aplicando-se σ_2 se poderá encontrar:

$$-\nu_{21} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{S_{12}}{S_{22}}$$

$$-\nu_{23} = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2} = \frac{S_{32}}{S_{22}}$$

E, finalmente, aplicando-se σ_3 se poderá encontrar

$$-\nu_{31} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} = \frac{S_{13}}{S_{33}}$$

$$-\nu_{32} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} = \frac{S_{23}}{S_{33}}$$

Assim, os coeficientes de Poisson podem ser escritos em função dos termos da matriz de flexibilidade:

$$S_{12} = \frac{-\nu_{21}}{E_2}, S_{13} = \frac{-\nu_{31}}{E_3}, S_{23} = \frac{-\nu_{32}}{E_3}, S_{21} = \frac{-\nu_{12}}{E_1}, S_{31} = \frac{-\nu_{13}}{E_1}, S_{32} = \frac{-\nu_{23}}{E_2}$$

Utilizando todas as equações a matriz de flexibilidade pode ser escrita como

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{-\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

2.6.1.4. Matriz de flexibilidade – aspectos práticos para a determinação utilizando ensaio de compressão estática

Mascia (1991) e Furlani (1995) apresentam metodologia para a determinação da matriz de flexibilidade utilizando ensaio de compressão. Essas duas referências foram a base para os detalhes desse item e para a metodologia adotada nos ensaios de compressão.

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 e outros três corpos de prova prismáticos retirados em ângulo nos três planos de simetria elástica.

Os três corpos de prova retirados nos eixos de simetria permitem a obtenção dos três módulos de elasticidade longitudinais e dos seis coeficientes de Poisson, enquanto os três corpos de prova retirados em ângulo permitem a obtenção dos módulos de cisalhamento. A seguir são detalhados os procedimentos e cálculos para a determinação desses parâmetros utilizando cada corpo de prova.

Corpo de prova longitudinal

Aplicando-se o carregamento na direção longitudinal (L) obtêm-se a tensão na direção longitudinal (σ_L) e é possível medir-se as deformações específicas, longitudinal (ε_L), radial (ε_R) e tangencial (ε_T). Assim, desse corpo de prova obtém o módulo de elasticidade na direção longitudinal (E_L) e os coeficientes de Poisson ν_{LT} e ν_{LR} utilizando as expressões:

$$E_L = \sigma_L / \epsilon_L$$

$$\nu_{LT} = \epsilon_T / \epsilon_L$$

$$\nu_{LR} = \epsilon_R / \epsilon_L$$

Corpo de prova radial

Aplicando-se o carregamento na direção radial (R) obtêm-se a tensão na direção radial (σ_R) e é possível medir-se as deformações específicas, longitudinal (ϵ_L), radial (ϵ_R) e tangencial (ϵ_T). Assim, desse corpo de prova se obtém o módulo de elasticidade na direção radial (E_R) e os coeficientes de Poisson ν_{RT} e ν_{RL} utilizando as seguintes expressões:

$$E_R = \sigma_R / \epsilon_R$$

$$\nu_{RT} = \epsilon_T / \epsilon_R$$

$$\nu_{RL} = \epsilon_L / \epsilon_R$$

Corpo de prova tangencial

Aplicando-se o carregamento na direção tangencial (T) obtêm-se a tensão na direção tangencial (σ_T) e é possível medir-se as deformações específicas, longitudinal (ϵ_L), radial (ϵ_R) e tangencial (ϵ_T). Assim, desse corpo de prova obtém o módulo de elasticidade na direção tangencial (E_T) e os coeficientes de Poisson ν_{TR} e ν_{TL} utilizando as seguintes expressões:

$$E_T = \sigma_T / \epsilon_T$$

$$\nu_{TR} = \epsilon_R / \epsilon_T$$

$$\nu_{TL} = \epsilon_L / \epsilon_T$$

Corpo de prova inclinado no plano LT

Para determinar o módulo de cisalhamento 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 módulo de elasticidade transversal.

Assim, considerando um plano LT inclinado de α em relação à longitudinal, a deformação no plano inclinado é dada pela expressão

$$\varepsilon'_{11} = \varepsilon_{11} \cos^2 \alpha + \varepsilon_{33} \sin^2 \alpha + \gamma_{13} \sin \alpha \cos \alpha$$

Onde ε'_{11} é a deformação na direção do plano inclinado; ε_{11} e ε_{33} são as deformações nas direções L e T e γ_{13} é deformação tangencial.

Conhecendo-se ε'_{11} , ε_{11} e ε_{33} e o ângulo α se determina a única variável não conhecida da expressão γ_{13} .

Com γ_{13} se determina a deformação tangencial no plano inclinado (γ'_{13}) pela expressão

$$\gamma'_{13} = 2(\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11}) \sin \alpha \cos \alpha + \gamma_{13} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)$$

A tensão tangencial no plano inclinado é dada por:

$$\tau'_{13} = 2(\sigma_{33} - \sigma_{11}) \sin \alpha \cos \alpha + \tau_{13} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)$$

O módulo de cisalhamento é dado por

$$G'_{31} = \frac{\tau'_{13}}{\gamma'_{13}}$$

Para ângulo $\alpha = 45^\circ$ adotado por Mascia (1991) e Furlani (1995) e tendo em vista que na compressão simples $\gamma_{13} = 0$

$$\varepsilon'_{11} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}}{2}$$

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

Além disso, utilizando-se as transformações de coordenadas, a tensão na direção inclinada.

$$\sigma'_{11} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha + \tau_{13} \sin 2\alpha$$

Para ângulo $\alpha = 45^\circ$ e tendo em vista que na compressão simples $\tau_{13} = 0$ e $\sigma_3 = 0$

$$\sigma'_{11'} = \frac{\sigma_1}{2}$$

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

Outra forma para a determinação de G é utilizando as expressões:

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{1}{E_\alpha (\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\cos^4 \alpha}{E_T (\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\sin^4 \alpha}{E_L (\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha)} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L}$$

$$E_\alpha = \sigma_\alpha / \varepsilon_\alpha$$

Conforme já demonstrado anteriormente, para $\alpha = 45^\circ$ e ensaio de compressão simples $\sigma_\alpha = \sigma/2$.

Se os demais módulos forem obtidos utilizando ensaios em corpos de prova retirado nos eixos de simetria o único valor desconhecido da equação é o G_{LT} .

Corpo de prova inclinado no plano LR

Da mesma forma como já detalhado para o plano LT, utilizando-se os equacionamentos já demonstrados o valor de G_{LR} é dado por:

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

Ou

$$\frac{1}{G_{LR}} = \frac{1}{E_{\alpha}(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\cos^4 \alpha}{E_R(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\text{sen}^4 \alpha}{E_L(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} + \frac{2\nu_{LR}}{E_L}$$

Corpo de prova inclinado no plano TR

De igual forma, utilizando-se os equacionamentos já demonstrados anteriormente determina-se o valor de G_{TR} por

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

Ou

$$\frac{1}{G_{TR}} = \frac{1}{E_{\alpha}(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\cos^4 \alpha}{E_R(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\text{sen}^4 \alpha}{E_T(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} + \frac{2\nu_{TR}}{E_T}$$

Mascia (1991) apresenta, na Figura 2.5 e na Tabela 2.17, resumo para esclarecer a forma de obtenção de todos os parâmetros da matriz de flexibilidade [S].

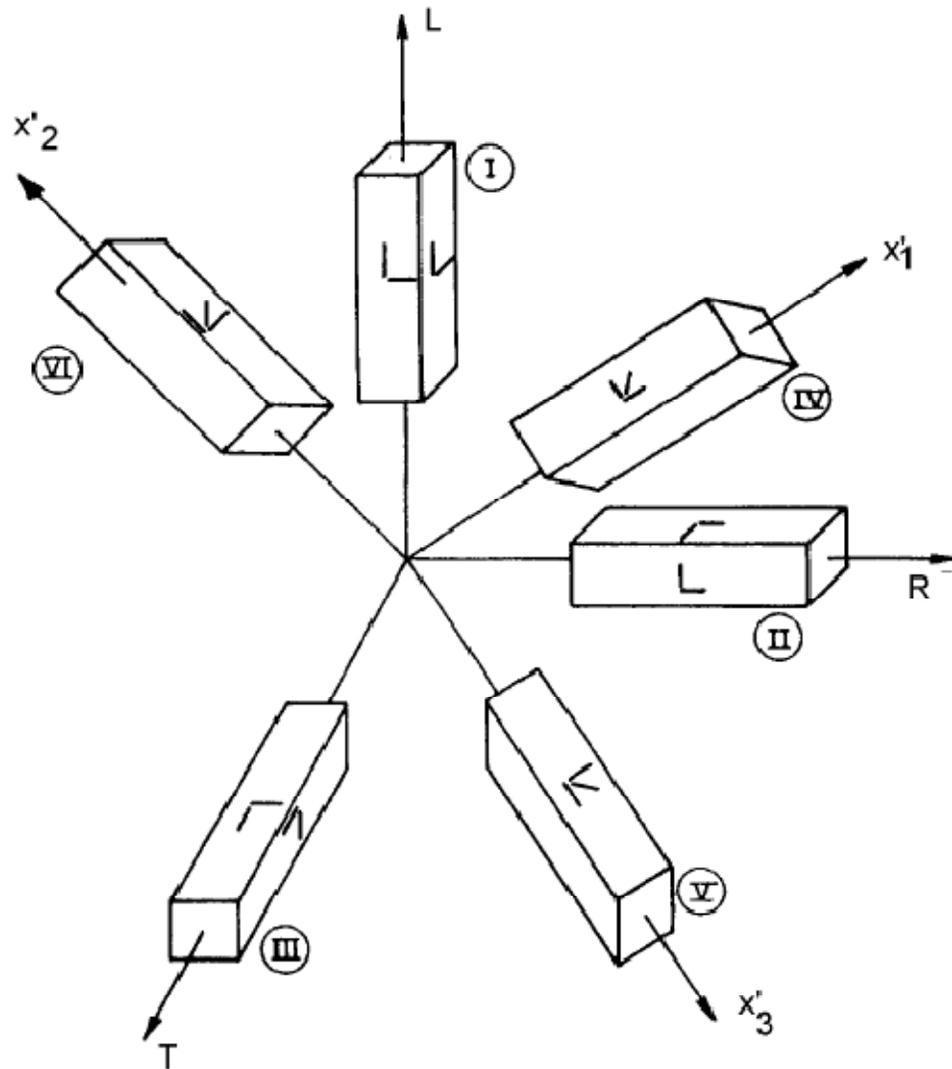


Figura 2.5. Posição dos corpos-de-prova e dos extensômetros. Fonte: Mascia (1991)

Tabela 2.17. Resumo da posição dos corpos de prova e dos extensômetros associados à determinação das constantes de flexibilidade da madeira. Adaptado de Mascia (1991)

Corpo de prova	Constante de Elasticidade
I	E_L, ν_{LR}, ν_{LT}
II	E_R, ν_{RT}, ν_{RL}
III	E_T, ν_{TR}, ν_{TL}
IV	E_{45}, G_{LR}
V	E_{45}, G_{RT}
VI	E_{45}, G_{TL}

Comentários a respeito da torção na madeira

Tendo em vista as dificuldades de serem obtidos os valores de módulo de elasticidade transversal da madeira por meio de ensaios estáticos, pouco se conhece sobre o comportamento da madeira à torção. A ABNT NBR 7190 (1997) recomenda evitar a torção e indica que, quando houver esforços de torção a tensão tangencial de cálculo, calculada pelas expressões da Teoria da elasticidade, deve ser menor ou igual à resistência de cálculo ao cisalhamento. No entanto, o cálculo da tensão de torção exige o conhecimento dos módulos de elasticidade transversais.

Bodig e Jayne (1982) indicam que para materiais ortotrópicos dois módulos transversais devem ser conhecidos para que seja possível o cálculo das tensões de torção. Se o eixo da barra coincide com o eixo L o módulo de elasticidade transversal é dado por:

$$G = \frac{2G_{LR}G_{LT}}{G_{LR} + G_{LT}}$$

De posse desse valor se poderia calcular, para uma peça circular, o momento de torção (M_t), o ângulo de ruptura à torção (θ) e também a tensão de torção (τ) por meio das equações:

$$M_t = \frac{2G_{LR}G_{LT}}{G_{LR} + G_{LT}} \frac{\theta J}{L}$$

$$\theta = \frac{G_{LR} + G_{LT}}{2G_{LR}G_{LT}} \frac{M_t L}{J}$$

$$\tau = \frac{2G_{LR}G_{LT}}{G_{LR} + G_{LT}} \frac{r\theta}{L}$$

Onde J é o momento polar de inércia e L é o comprimento da barra.

Dessa forma, um método que permita a obtenção dos módulos de elasticidades transversais de forma mais simples poderia ser útil nas avaliações de problemas que envolvam a torção na madeira.

2.7. Conclusões a respeito da revisão bibliográfica

A base teórica que explica a possibilidade de utilização de ensaios de propagação de ondas em meios materiais para acessar suas propriedades elásticas é fundamentada em conhecimentos que datam dos séculos XVII e XVIII. No entanto, aplicações práticas só puderam avançar com a evolução tecnológica dos equipamentos de emissão de pulsos e dos transdutores e os primeiros artigos que apresentam aplicações do método na determinação dos parâmetros elásticos da madeira datam dos anos 80.

À medida que esses equipamentos foram tendo avanços tecnológicos, houve a necessidade de que os pesquisadores estudassem a interferência das hipóteses simplificadoras das condições reais de propagação das ondas nos ensaios. Por meio desses estudos tem sido possível determinar o nível de precisão, as vantagens e as limitações do método para cada aplicação.

Há, portanto, espaço para se discutir as dificuldades de elaboração dos corpos de prova, o tipo mais adequado de corpo de prova, as formas para tornar as condições reais do ensaio o mais próximo possível das condições teóricas (frequência dos transdutores, dimensão do corpo de prova, acoplamento etc.).

Adicionalmente, grande parte dos autores citados não contemplou, em seus estudos, a determinação da matriz de rigidez de forma completa, sendo alguns direcionados à determinação do primeiro termo da diagonal da matriz, outros dos três primeiros termos da diagonal ou ainda dos 6 termos da matriz, mas poucos determinaram os termos de fora da diagonal, única forma de se obter os 12 parâmetros elásticos da madeira.

A comparação com resultados de ensaios estáticos em alguns casos é inexistente, em outros casos é feita utilizando-se dados de propriedades de madeira da mesma espécie disponíveis em livros, tabelas ou outros artigos e, no caso de utilização de ensaios dinâmicos e estáticos na mesma amostragem, as comparações foram feitas somente para os módulos na direção longitudinal.

Destaca-se, também, que não há nenhuma conclusão relativa a escolha de uma outra geometria de corpos de prova em função dos resultados, mas apenas discussão relativa à facilidade de obtenção de tais geometrias. Assim, esse ponto evidenciou espaço de pesquisa para a complementação do conhecimento.

Mais recentemente (anos 2006 e 2007) há artigos que retomam a discussão da determinação da matriz de rigidez da madeira por ultrassom, mostrando principalmente a importância de que essa técnica venha a ser utilizada para o levantamento de propriedades de espécies ainda não estudadas. Destacam que esse método é mais simples e, em alguns casos, mais exato para a obtenção dessas propriedades do que os ensaios estáticos.

O caminho que se escolheu para a realização da pesquisa envolveu a obtenção, em um mesmo lote de madeira, de resultados de ensaios de ultrassom utilizando três tipos de geometria de corpo de prova e de ensaios estáticos de compressão. Esse caminho foi escolhido porque, além da lacuna evidenciada pela revisão bibliográfica nessa questão, em nosso país os ensaios estáticos têm sido considerados os mais adequados e, em alguns casos, os únicos aceitos, para a determinação de propriedades da madeira. Assim, uma pesquisa que tinha como objetivo avaliar uma alternativa para o ensaio convencional aceito no país teria que realizar essa comparação, de forma a ser possível vencer a primeira barreira, que é a do novo e desconhecido.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

As espécies utilizadas na pesquisa são todas dicotiledôneas, sendo uma de floresta plantada, o Eucalipto saligna (*Eucalyptus saligna*) e duas nativas a Garapeira (*Apuleia leiocarpa*) e a Cupiúba (*Goupia glabra*). O eucalipto foi utilizado devido a tendência atual de uso desta madeiras, tanto em estruturas quanto em mobiliário, enquanto as nativas escolhidas apresentam grande usos em estruturas.

Para cada espécie foram obtidas toras, que foram desdobradas em prismas de 200 mm x 200 mm x 2000 mm de comprimento. As pranchas foram então conduzidas para secagem em câmara, com controle de umidade relativa e de temperatura, no SENAI de Itatiba. A secagem foi realizada para que as peças tivessem umidade final próxima de 12%, separadamente para cada espécie. Esse procedimento foi bastante demorado, tendo sido necessários 70 dias para a espécie Eucalipto saligna, 40 dias para a espécie Garapeira e 20 dias para a espécie Cupiuba. O processo de secagem do Eucalipto saligna foi o mais demorado para evitar que a madeira pode sofresse rachaduras e deformações. Assim, o processo foi lento, mas garantiu a obtenção de secagem homogênea das pranchas e reduziu os defeitos, aumentando a precisão dos resultados e minimizando as perdas de material.

Após a secagem dos prismas estes foram desdobradas nos planos LT e LR e RT para a obtenção dos corpos de prova. A Figura 3.1 ilustra esse processo.



Figura 3.1. Prismas de garapeira (a) e de Eucalipto saligna (b) durante a confecção dos corpos de prova

3.2. Principais equipamentos

Para a realização dos ensaios foram utilizados os equipamentos:

- Máquina Universal de Ensaio (DL 30000, EMIC, Brasil)
- Extensômetros elétricos de resistência (KFG-5-120-C1-11, KYOWA, Japão) de dimensão de 5 mm com fator de gauge 2.10 \pm 1.0% e resistência de gauge de 119.8 \pm 0.2 Ω .
- Balança (AS 2000C, Marte, Brasil) com menor divisão de 0,01g, carga mínima de 0,5g e máxima de 2000 g, sensibilidade de 0,01 g, reprodutibilidade de 0,01 g e campo de tara de 2000 g.
- Câmara Climática (MA-835, Marconi, Brasil) com controle de temperatura \pm 2 Celsius e controle de Umidade Relativa de \pm 5% controlada por Programa de Rampas e Patamares.
- Paquímetro digital e analógico com escala de 0 mm a 154 mm com subdivisão em décimo de mm.
- Transdutores de ondas longitudinais de 1000 kHz, faces planas (A 1036, Olympus, EUA)
- Transdutores de ondas transversais de 1000 kHz, faces planas (V 153, Olympus, EUA)
- Equipamento de ultrassom (EPOCH4, Panametrics, EUA)
- Medidor de umidade (PM1-E, Merlin, Brasil) sem pinos ou eletrodos com regulagem da densidade de 0,3 g/cm³ a 1,1 g/cm³ de 0,01 em 0,01 g/cm³ e faixa de medição de 1 a 100%.
- Sistema de aquisição de dados (Quantun, HBM, Alemanha) com 8 canais
- Célula de carga de 500 kN (U10M, HBM, Alemanha)

3.3. Justificativa para a adoção dos principais parâmetros do ensaio

3.3.1. Geometria do corpo de prova

No tópico de revisão bibliográfica foi visto que os pesquisadores que trabalharam na questão da determinação da matriz de rigidez por ultrassom utilizaram cinco tipos de geometrias de corpos de prova – esfera, cubo, prisma retangular, disco multifacetado e poliedro de 26 faces, tendo sido o cubo e o prisma retangular os mais comumente utilizados. Não foi encontrado nenhum artigo que tenha realizado comparações entre os resultados obtidos com as diferentes geometrias de corpos de prova.

Tendo em vista que nesse trabalho de pesquisa um dos objetivos era a avaliação e a discussão da metodologia de determinação da matriz de rigidez por ultrassom, decidiu-se que os ensaios seriam realizados utilizando corpos de prova de diferentes geometrias, dentre as já testadas pelos autores citados na revisão bibliográfica.

No caso da esfera, utilizada por Bucur e Rasolofosaon (1998), é necessário utilizar-se a técnica da imersão. Esta técnica exige a confecção de um tanque especial para condicionamento dos transdutores. Além disso, há vários cuidados recomendados para que não haja penetração de água no corpo de prova. Por esses motivos essa geometria de corpo de prova foi descartada.

A pesquisa tinha como um dos objetivos a realização dos ensaios estáticos para efeito de comparação e o corpo de prova usual para este caso é o prismático de seção quadrada. Dessa forma, adotou-se esta geometria para os corpos de prova em lugar do cubo utilizado por vários pesquisadores (Zimmer e Cost (1970), Bucur e Archer (1984), Rose *et al.* (1991) e Keunecke *et al.* (2007)). Preziosa (1982) utilizou formato semelhante ao adotado nessa pesquisa, só que os ensaios foram realizados pelo processo de imersão. Sinclair e Farshad (1987) e Gonzalez (2001) também utilizaram prismas retangulares, no entanto os ensaios estáticos comparativos foram de flexão.

Além do corpo de prova prismático foram adotados os corpos de prova em disco multifacetado como Bucur e Perrin (1988) e em poliedro com 26 faces como utilizado por François (1995). O detalhamento desses corpos de prova será apresentado no item 3.4.

3.3.2. Dimensão do corpo de prova, frequência do transdutor e ângulo de retirada

Conforme já discutido no item 2.3 a escolha da dimensão do corpo de prova deve ser função da dimensão e da frequência dos transdutores. Para a determinação da matriz de rigidez completa é necessário, conforme destacado no item 2.1, a utilização de transdutores de onda longitudinal e de cisalhamento. Para não incluir parâmetros adicionais de variabilidade, preferencialmente, o ensaio deve ser realizado utilizando transdutores de onda longitudinal e de cisalhamento de mesma frequência. Os transdutores, disponíveis no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos da FEAGRI (LabEND), para os dois tipos de onda (longitudinal e transversal) têm as características dimensionais listadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Características dimensionais dos transdutores

Frequência (f) (kHz)	Diâmetros (mm)		Campo próximo (N) (mm)
	Elemento (D)	Transdutor (T)	
	100	32	
500	25	32	
1000	13	18	

Para verificar a questão da necessidade do comprimento de percurso da onda (L) ser de pelo menos 3 vezes o comprimento de onda (λ) para que se minimize os efeitos da impossibilidade de se ter meios infinitos (item 2.3), elaborou-se a Tabela 3.2. Na Tabela 3.2 foram determinados os valores aproximados dos comprimentos de onda para cada frequência. Tendo em vista que as velocidades variam de espécie para espécie, esse cálculo foi realizado de forma aproximada considerando-se velocidades médias usuais para as direções principais da madeira.

Tabela 3.2. Valores aproximados dos comprimentos de onda em mm esperados para cada frequência de transdutor

Direção e velocidades adotadas	100 (kHz)	500 (kHz)	1000 (kHz)
Longitudinal (5000 m.s ⁻¹)	50	10	5
Radial (2500 m.s ⁻¹)	25	5	2,5
Tangencial (1800 m.s ⁻¹)	18	3,6	1,8

Antes de se definir a frequência do transdutor e a dimensão final dos corpos de prova, foi realizado um ensaio preliminar. Esse ensaio foi realizado tomando-se como base as dimensões dos corpos de prova para o teste de compressão, proposto pela ABNT NBR 7190 (1997). Para isto foram confeccionados cubos de 50 mm de aresta para os ensaios de ultrassom e prismas de seção quadrada de 50 mm e comprimento de 150 mm para o ensaio de compressão estática. Para minimizar a influência da heterogeneidade da madeira nas comparações dos resultados dos ensaios de ultrassom e de compressão, os corpos de prova foram retirados de forma pareada.

Para a dimensão de seção (50 mm x 50 mm) adotada nesses testes preliminares, todos os transdutores da Tabela 3.1 permitiram atender a questão do transdutor estar circunscrito à seção da peça, já que todos têm diâmetro menor do que a seção do corpo de prova.

Considerando os valores da Tabela 3.2 e as dimensões do corpo de prova cúbico de aresta 50 mm, verifica-se que a frequência de 100 kHz não permitiria que o comprimento de percurso fosse maior ou igual a 3 vezes o comprimento de onda, para nenhuma das direções de propagação da onda.

Durante os ensaios preliminares só havia disponibilidade de uso dos transdutores de 100 kHz de frequência, uma vez que os demais estavam em fase de importação. No entanto, esses ensaios preliminares não tinham o objetivo de determinar o valor exato dos termos da matriz de rigidez, mas sim detectar problemas metodológicos que poderiam ser encontrados na preparação dos corpos de prova e nos ensaios. Dessa forma, apesar de serem conhecidas as limitações do uso das dimensões desse corpo de prova com essa frequência de transdutor, os ensaios preliminares foram positivos para ajudar a orientar a pesquisa.

Conforme os aspectos teóricos apresentados no item 2.1, para a obtenção dos termos de fora da diagonal é necessária a retirada de corpos de prova fora dos eixos de simetria. Visando verificar a existência de um ângulo de retirada dos corpos de prova que fornecesse resultados mais adequados, nessa etapa, os ensaios de ultrassom foram realizados com os corpos de prova retirado nos eixos de simetria e, nos ângulos 15°, 30°, 45°, 60° e 75° em relação aos três planos.

Conforme mencionado na revisão bibliográfica, os ensaios preliminares permitiram constatar a grande dificuldade encontrada nos ensaios de ultrassom, a, foi a questão da influência da inclinação dos anéis de crescimento. Essa influência só poderia ser minimizada utilizando-se corpos de prova de menores dimensões ou toras de grandes dimensões.

O problema da inclinação dos anéis afetou mais drasticamente os corpos de prova retirados com inclinações em relação aos eixos, uma vez que as ondas quase-transversais necessárias para esse caso eram fortemente afetadas pela inclinação dos anéis, fazendo com que a propagação das ondas não se desse exatamente nos ângulos inicialmente determinados e afetando nos resultados das equações 2.17, 2.18 e 2.19.

Essa mesma questão (inclinação dos anéis de crescimento na seção) interferiu também nos ensaios de compressão, já que as deformações lidas nos extensômetros não era a deformação pura de uma dada direção.

Assim, ficou evidente que era necessário reduzir a dimensão do corpo de prova, uma vez que exigir-se, para a retirada dos corpos de prova, diâmetros de toras muito elevados, já seria uma dificuldade inerente da metodologia de ensaio a ser proposta.

Em relação ao ângulo de retirada dos corpos de prova, os de 60° e de 45° foram os que apresentaram resultados mais compatíveis com os ensaios estáticos de compressão, No entanto ficou evidente que o resultado geral sofreu maior influência da inclinação dos anéis de crescimento do que do ângulo de retirada do corpo de prova propriamente dito.

Outra questão que ficou evidente foi a dificuldade de se utilizar o corpo de prova cúbico para estudar o ângulo ideal de sua retirada dos corpos de prova fora dos eixos de simetria. Essa dificuldade ocorre em função do grande número de amostras necessárias – 3 em cada ângulo, sendo um para cada plano de simetria. Considerando-se os 5 ângulos analisados, para cada repetição seriam necessários 16 corpos de prova (1 nos eixos de simetria e 3 para cada ângulo).

3.4. Definição final da frequência do transdutor e detalhamento das dimensões e forma de obtenção dos corpos de prova

3.4.1. Corpo de prova prismático

Levando em conta a necessidade de redução das dimensões do corpo de prova prismático, em função dos ensaios preliminares (item 3.3), adotou-se seção transversal quadrada de 30 mm de lado e comprimento de 90 mm. Esse corpo de prova foi adotado tanto para o ensaio de ultrassom, quanto para o ensaio de compressão. A adoção dessa dimensão foi baseada na NBR 7190 (1997), que permite a redução do corpo de prova de 50 mm x 50 mm x 150 mm para dimensão inferior, desde que as proporções sejam mantidas (uma face igual a três vezes a face perpendicular) e a seção não seja inferior a 18 mm. Adicionalmente, Trinca (2006) comprovou que os resultados de tensão de ruptura e de módulo de elasticidade na compressão são estatisticamente equivalente para as seções 30 mm x 30 mm x 90 mm e 50 mm x 50 mm x 150 mm.

Os resultados das avaliações preliminares não permitiram concluir a respeito do ângulo a ser adotado para a retirada dos corpos de prova fora dos eixos de simetria, uma vez que houve muita influência da inclinação dos anéis de crescimento. Dessa forma, o ângulo de 45° foi adotado, levando-se em consideração a proposta para o ensaio de compressão, obtida de Mascia (1991) e de Furlani (1995), bem como os resultados de ultrassom apresentados por Bucur (2006). Também com base nos ensaios preliminares, se definiu que o estudo do ângulo adequado para a retirada do corpo de prova, fora dos eixos de simetria, seria realizado utilizando-se o corpo de prova em disco multifacetado.

Considerando essas dimensões (30 mm x 30 mm x 90 mm), o único transdutor cujo diâmetro permite que o mesmo esteja circunscrito à seção do corpo de prova é o de frequência 1000 kHz (Tabela 3.1).

Tendo em vista que para o ensaio de compressão estática proposto por Mascia (1991) e de Furlani(1995) devem ser confeccionados 1 corpo de prova com o maior comprimento para cada eixo (Longitudinal (L), Radial (R) e Tangencial (T)), o comprimento de percurso (L) da onda será, para todas as direções, de 90 mm fazendo com que a relação L/λ (Tabela 3.2) seja

de, no mínimo, 18 para o transdutor de 1000 kHz de frequência, garantindo a condição teórica de meios infinitos.

Para os ensaios de ultrassom nos eixos de simetria não seria necessária a confecção de um corpo de prova para cada eixo, o mesmo corpo de prova retirada nos eixos poderia ser utilizado para todas as leituras. Nesse caso, a leitura na direção longitudinal teria $L = 90$ mm e na direção radial e tangencial $L = 30$ mm. Assim, considerando os dados da Tabela 3.2, as relações L/λ são ainda adequadas para a obtenção de meios com características próximas aos meios infinitos teóricos (item 2.1).

Tendo em vista o uso dos mesmos corpos de prova prismáticos para o ensaio de ultrassom e de compressão, para uma dada direção, foi possível a obtenção de três leituras de tempo de propagação das ondas de ultrassom. Assim, o ensaio de ultrassom na direção L foi realizado nos três corpos de prova, um deles com comprimento de 90 mm e nos dois outros de 30 mm. O mesmo procedimento ocorreu para as direções R e T. Tendo em vista serem 6 repetições, para uma dada direção foi possível obter 18 resultados de velocidade de propagação das ondas. Isso permitiu a obtenção de um valor médio bem como dos desvios de valores em torno da média para cada espécie.

Desta forma, os corpos de prova para o ensaio estático de compressão foram retirados nos eixos (3 corpos de prova) com a maior dimensão respectivamente nas direções Longitudinal, Radial e Tangencial, e fora dos eixos, à 45° , em relação aos planos LR, RT e TR (Figura 3.2), totalizando 6 corpos de prova por repetição e por espécie. Tendo em vista que foram realizadas 6 repetições, o total de corpos de prova foi de 108 (6 corpos de prova x 6 repetições x 3 espécies). Estes corpos de prova foram utilizados para o ensaio de ultrassom.

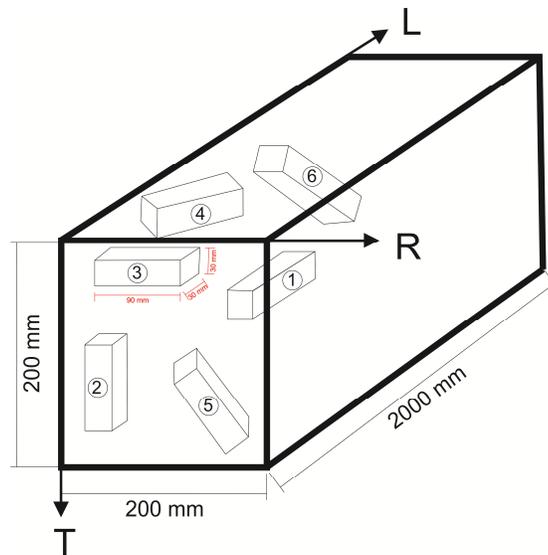


Figura 3.2 Esquema de retirada dos corpos de prova nos eixos de simetria e em ângulo com os planos principais. Adaptado de Mascia (1991)

3.4.2. Corpo de prova em disco multifacetado

Para esse corpo de prova adotou-se diâmetro de 135 mm com 24 faces cortadas a cada 15°. Esse diâmetro foi adotado para que cada face tivesse 18 mm, permitindo que o transdutor de frequência 1000 kHz (Tabela 3.1) ficasse circunscrito à face. Essa dimensão de corpo de prova não é favorável, porque ser muito grande para permitir pequenas inclinações dos anéis de crescimento, mas foi adotada para ser possível a obtenção de ângulos variando a cada 15°. Nesse caso a relação L/λ é 27, muito superior aos mínimos indicados no item 2.3 para que o meio tenha características mais próximas ao meio infinito teórico.

Com o resultado da avaliação dos erros de medição em cada ângulo, essa dimensão poderá ser reduzida, com a redução do número de ângulos confeccionados nos discos. Bucur e Perrin (1988) utilizaram discos de 35 mm de diâmetro e espessura de 20 mm, não detalhando a largura das faces e nem o diâmetro do transdutor utilizado. A vantagem desse formato é que são necessários apenas 3 discos para a obtenção da matriz de rigidez considerando vários ângulos para a determinação dos parâmetros de fora da diagonal. Isso permite avaliar, com mais facilidade, o melhor ângulo para a obtenção dos termos de fora da diagonal da matriz. A desvantagem é que a produção desse corpo de prova com precisão exige o uso de CNC (Figura 3.3). A dimensão do corpo de prova nesse caso não foi vantajosa, pois foi maior do que o

corpo de prova cúbico, dificultando a obtenção de anéis de crescimento com inclinações que possam ser negligenciadas.



Figura 3.3. Disco multifacetado sendo confeccionado em máquina CNC (SENAI de Itatiba).

Os discos para os ensaios de ultrassom foram preparados a partir de peças de seção retangular, as quais foram posicionadas em bancada para usinagem final no CNC (Figura 3.4a). As peças foram usinadas no CNC com faces a cada 15° e, após saírem da usinagem cada peça passou por avaliação para verificação dos ângulos usinados nas faces (Figura 3b). Todo o procedimento de usinagem no CNC foi realizado no SENAI de Itatiba. A Figura 3.5, mostra um exemplo de corpo de prova usinado.



Figura 3.4. Montagem dos corpos de prova para entrada no CNC (a) e verificação dos

ângulos das faces após usinagem (b)



Figura 3.5 – Corpo de prova em disco multifacetado

Tendo em vista que as faces foram executadas a cada 15° foi possível a realização dos ensaios nos ângulos 0° , 15° , 30° , 45° , 60° e 90° em uma mesma peça. Considerando-se as 6 repetições e as 3 espécies o número total de discos ensaiados foi de 54 (3 corpos de prova x 6 repetições x 3 espécies).

3.4.3. Corpo de prova em Poliedro

O poliedro de 26 faces, proposto por François (1995 e 2000), permite a obtenção de todos os termos da matriz de rigidez com um único corpo de prova.

Com o objetivo de avaliar essa proposta, corpos de prova foram confeccionados no LabEND utilizando-se serra de esquadria (DW718, Dewalt).

François (1995) determinou que a dimensão mínima para o cubo de onde se vai retirar o poliedro de 26 faces é de 53,3 mm para que cada face tenha dimensão no mínimo igual à dimensão do transdutor que, no caso desse autor, era de 15 mm. Para esse projeto, o transdutor de 1000 kHz adotado tem diâmetro de 18 mm o que, utilizando a expressão indicada por François (1995), permite concluir que a dimensão mínima do cubo é 64 mm.

Assim, para a confecção dos corpos de prova foram primeiramente obtidos cubos de 64 mm de aresta, cujas faces estavam orientadas nos planos RT, TL, LR. Apoiando-se uma das faces RT na bancada (plano horizontal) foram executados quatro cortes com ângulo de 45° , retirando-se as arestas das faces TL e LR, obtendo-se um prisma com seção octogonal. O corpo de prova foi então girado de modo a manter-se o eixo L paralelo à guia da máquina e mantendo-se a inclinação de corte da base da máquina (45°). Nessa condição foram efetuados

8 cortes em uma extremidade do prisma, um para cada face de apoio, formando-se assim a primeira calota do corpo de prova. Girando-se o corpo no plano horizontal fez-se mais 8 cortes na outra extremidade, repetindo-se o procedimento gerando um Poliedro de 26 faces (Figura 3.6), com simetria hemisférica.

Tendo em vista que em um mesmo corpo de prova são obtidos todos os parâmetros para a determinação da matriz de rigidez, para essa geometria foram confeccionados 18 corpos de prova (6 repetições x 3 espécies).



Figura 3.6. Corpos de prova em forma de poliedro

3.5 Ensaio de ultrassom

3.5.1. Prismas

Os ensaios nos corpos de prova retirados nos eixos de simetria foram realizados de acordo com as seguintes etapas:

-Primeiramente, com o transdutor longitudinal posicionado em faces opostas do corpo de prova foram realizadas as leituras de tempo de propagação da onda nas direções L, R e T (Figura 3.7).

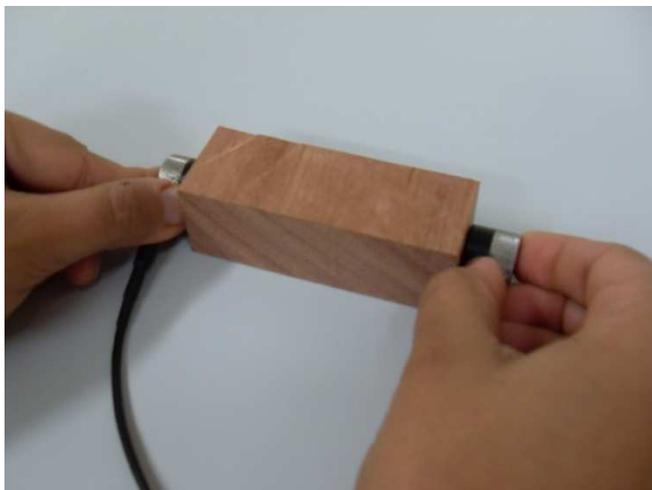


Figura 3.7. Exemplo de ensaio no corpo de prova prismático.

Obtido o tempo de propagação da onda nas três direções e o comprimento do corpo de prova nessas mesmas direções (90 mm ou 30 mm) foram determinadas as velocidades V_{LL} , V_{RR} e V_{TT} . Então, com o transdutor de cisalhamento posicionado em faces opostas do corpo de prova (Figura 3.7) foram realizadas as leituras de tempo propagação da onda em LR e RL; LT e TL; RT e TR, e com o tempo de propagação da onda nas três direções e o comprimento do corpo de prova nessas mesmas direções (90 mm ou 30 mm) foram determinadas as velocidades V_{LR} e V_{RL} , V_{LT} e V_{TL} , V_{RT} e V_{TR} .

Para o corpo de prova retirado em ângulo α nos planos LR, LT e RT são obtidas as velocidades V_{α} em cada plano. O procedimento de obtenção dessa velocidade é igual aos casos anteriores, ou seja, os transdutores de cisalhamento são posicionados nas faces opostas do corpo de prova (Figura 3.7). Nesse caso, as leituras foram realizadas considerando-se somente a maior dimensão do corpo de prova (90 mm), pois na obtenção do corpo de prova, o ângulo de 45° foi correspondente apenas a essa maior aresta.

3.5.2 Discos multifacetados

Os discos multifacetados foram retirados nos planos LR, LT e RT com faces em 15° , 30° , 45° , 60° e 75° . Para a obtenção das velocidades nos eixos de simetria, seguiu-se o seguinte procedimento:

- Para o disco retirado do plano LR, considerando L na vertical (0°) e R na horizontal (90°), o posicionamento do transdutor longitudinal na face correspondente à 0° faz com que a onda longitudinal se propague na direção L e se polarize também na direção L, sendo possível a obtenção de V_{LL} . Posicionando-se o transdutor na face correspondente a 90° a onda longitudinal se propaga na direção R e se polariza na direção R obtendo-se, portanto, V_{RR} . Utilizando-se o transdutor de cisalhamento na face correspondente a 0° , a onda se propaga na direção L e se polariza na direção R obtendo-se, portanto, V_{LR} . De igual forma, posicionando-se o transdutor na face correspondente a 90° , a onda de cisalhamento se propaga em R e se polariza em L obtendo-se a velocidade V_{RL} .

- Para o disco retirado do plano LT, considerando L na vertical (0°) e T na horizontal (90°), o posicionamento do transdutor longitudinal na face correspondente à 0° , faz com que a onda longitudinal se propague na direção L e se polarize também na direção L, sendo possível a obtenção de V_{LL} . Posicionando-se o transdutor na face correspondente a 90° , a onda longitudinal se propaga na direção T e se polariza na direção T obtendo-se, portanto, V_{TT} . Utilizando-se o transdutor de cisalhamento na face correspondente a 0° , a onda se propaga na direção L e se polariza na direção T obtendo-se, portanto, V_{LT} . De igual forma, posicionando-se o transdutor na face correspondente a 90° , a onda de cisalhamento se propaga em T e se polariza em L, obtendo-se a velocidade V_{TL} .

- Para o disco retirado do plano RT, considerando R na vertical (0°) e T na horizontal (90°), o posicionamento do transdutor longitudinal na face correspondente à 0° , faz com que a onda longitudinal se propague na direção R e se polarize também na direção R, sendo possível a obtenção de V_{RR} . Posicionando-se o transdutor na face correspondente a 90° , a onda longitudinal se propaga na direção T e se polariza na direção T obtendo-se, portanto, V_{TT} . Utilizando-se o transdutor de cisalhamento na face correspondente a 0° , a onda se propaga na direção R e se polariza na direção T obtendo-se, portanto, V_{RT} . De igual forma, posicionando-se o transdutor na face correspondente a 90° , a onda de cisalhamento se propaga em T e se polariza em R, obtendo-se a velocidade V_{TR} .

-Nos demais ângulos as medições são realizadas com o transdutor de cisalhamento sendo obtidos os V_{α} . Dessa forma, no disco retirado do plano LR são obtidos os valores de velocidades quase transversais. Exemplo, posicionando-se o transdutor de cisalhamento na face de 15° se obtém V_{15} no plano LR, da mesma forma ocorrendo com os demais ângulos. O mesmo procedimento é válido para os planos LT e RT. A Figura 3.8 mostra o ensaio sendo realizado no disco.

No mesmo corpo de prova foi possível obter-se repetições para um mesmo termo da matriz de rigidez, já que nos ângulos complementares, os valores dos coeficientes da matriz (Equações 2.17, 2.18 e 2.19) são os mesmos. Exemplo: 15° e 165° , 30° e 150° , 60° e 120° , 75° e 105° e 45° e 135° .



Figura 3.8. Ensaio de ultrassom, no disco multifacetado na direção radial (a) e a 45° no plano RL(b)

3.5.3. Poliedros

Posicionando-se os transdutores longitudinais nas faces que são paralelas aos eixos do corpo de prova, a propagação e a polarização se dão nos eixos principais L, R ou T, sendo possível obter-se V_{LL} , V_{RR} e V_{TT} . Da mesma forma, posicionando-se os transdutores de cisalhamento nas faces retas do corpo de prova, a propagação se dará em um dos eixos principais L, R ou T e a polarização no eixo perpendicular, T, R ou L, sendo possível a obtenção das velocidades V_{LR} , V_{LT} , V_{RL} , V_{RT} , V_{TR} e V_{TL} .

Para a obtenção das velocidades fora dos eixos de simetria, os transdutores são posicionados nas faces inclinadas em relação a cada um dos planos. A Figura 3.9 mostra o ensaio sendo realizado.



Figura 3.9. Ensaio de ultrassom no poliedro na direção radial (a) e a 45° no plano RL (b)

3.6 Ensaios de compressão nos corpos de prova prismáticos

3.6.1. Aspectos Gerais

Para o ensaio de compressão axial, para cada espécie e para cada repetição, foram confeccionados três corpos de prova retirados das pranchas de forma coincidentes com as direções principais, sendo cada um deles orientados segundo os eixos (L, R e T). A carga foi sempre aplicada paralela à maior dimensão.

Para a medição das deformações, em cada direção foram colados 2 gages em faces paralelas, totalizando 6 gages por corpo de prova.

O gage posicionado na direção da carga permitiu a leitura da deformação na direção de aplicação, enquanto que os demais nas direções perpendiculares à aplicação da carga. A colocação de 2 gages nas mesmas direções e em faces paralelas foi realizada para que fosse possível minimizar erros provenientes de imperfeições de paralelismo nos corpos de prova e, também, contabilizar diferenças de medições provenientes da própria madeira.

Para o ensaio de compressão foram utilizadas 3 repetições, ao invés das 6 utilizadas no ensaio de ultrassom. A redução para 3 repetições foi realizada em função do custo elevado do ensaio, devido ao número de strain gages necessários por corpo de prova.

Nos ensaios preliminares observou-se que é melhor realizar menos repetições, com um número maior de extensômetros. Essa conclusão foi obtida em função da melhoria de precisão que se obtém com mais pontos de medição das deformações, já que esse ensaio é muito trabalhoso e muito a erros em função da colagem e do funcionamento dos strain gages. Um deslocamento mínimo do gage de sua posição ou um descolamento pode inutilizar o ensaio, pois teria somente um medidor de deformação na direção.

Para a obtenção dos módulos de cisalhamento foram utilizados os corpos de prova retirados em ângulo de 45° em relação a cada plano. Nesse caso foram utilizados também 6 strain gages, sendo um deles no ângulo de inclinação do corpo de prova (45°) e os outros dois na direção dos planos, todos em faces paralelas. Exemplo: no corpo de prova retirado no plano LR, dois gages foi posicionado a 45°, dois na direção de L e dois na direção de R, sempre em faces paralelas.

A Figura 3.10 apresenta o esquema de montagem do ensaio para obtenção de G_{LT} enquanto a Figura 3.11 mostra o exemplo de corpos de prova instrumentados para o ensaio

estático de compressão. Nas da Figura 3.11 (a) e (b) verifica-se, claramente, o problema da inclinação dos anéis de crescimento, pois esses corpos de prova foram os utilizados nos ensaios preliminares, cujas dimensões eram de 50 mm x 50 mm x 150 mm. No caso da da Figura 3.11 (c) o corpo de prova tinha a dimensão adotada nos ensaios principais (30 mm x 30 mm x 90 mm), melhorando a condição de inclinação dos anéis de crescimento.

Para os ensaios foram utilizados 7 canais do sistema de aquisição de dados, seis para os strain gages e um para a célula de carga (Figura 3.12).

Tendo em vista as 3 repetições e os 6 corpos de prova necessários para esse ensaio, foram ensaiados um total de 18 corpos de prova por espécie, usando um total de 324 strain gages.

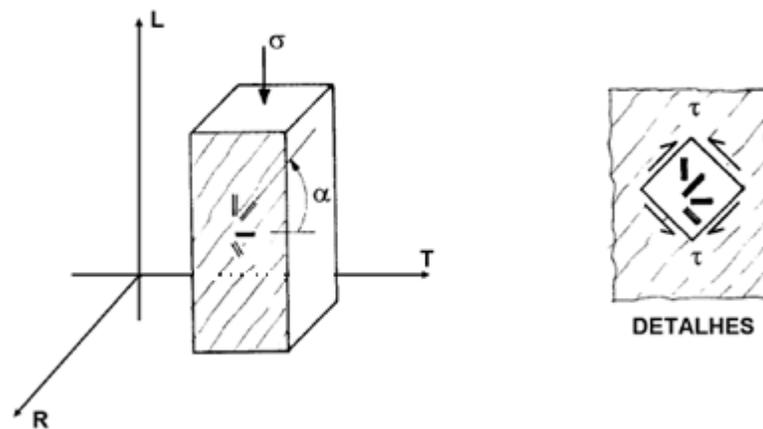
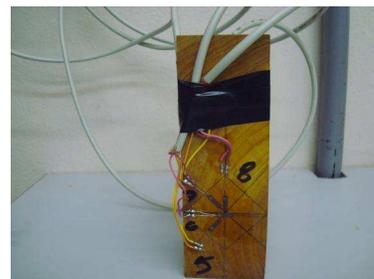


Figura 3.10. Esquema de montagem do ensaio para obtenção de G_{LT} . Fonte: Mascia (1991).



(a)

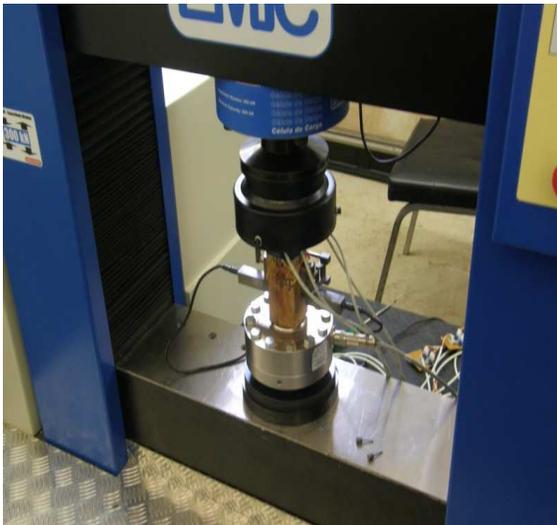


(b)



(c)

Figura 3.11. Corpo de prova instrumentado para o ensaio estático de compressão. No caso (a) trata-se de um corpo de prova tangencial de 50 mm x 50 mm x 150 mm, no caso (b) corpo de prova de 50 mm x 50 mm x 150 mm retirado com ângulo de 45° e no caso (c) corpo de prova de 30 mm x 30 mm x 90mm retirado também em ângulo de 45°



(a)



(b)

Figura 3.12. Montagem dos corpos de prova na máquina de ensaio (a) e canais do sistema de aquisição de dados durante execução do ensaio(b)

3.6.2 Detalhamento da metodologia de aquisição de dados durante o ensaio de compressão estática

3.6.2.1. Corpo de prova longitudinal

Foram instalados dois strains gages em faces longitudinais paralelas, dois strain gages em faces radiais paralelas e dois strain gages em faces tangenciais paralelas. O sétimo canal do sistema de aquisição de dados foi utilizado para a célula de carga. Utilizando o programa Matlab 6.5 (MathWorks, Inc., Massachusetts, USA) para manipular os dados dos 7 canais foi possível a obtenção das tensões na direção longitudinal (σ_L) e das deformação específicas, longitudinal (ϵ_L), radial (ϵ_R) e tangencial (ϵ_T). Assim, desse corpo de prova obteve-se o módulo de elasticidade na direção longitudinal (E_L) e os coeficientes de Poisson ν_{LT} e ν_{LR} utilizando as expressões:

$$E_L = \sigma_L / \epsilon_L$$

$$\nu_{LT} = \epsilon_T / \epsilon_L$$

$$\nu_{LR} = \epsilon_R / \epsilon_L$$

3.6.2.2. Corpo de prova radial

Foram instalados dois strains gages em faces radiais paralelas, dois strain gages em faces longitudinais paralelas e dois strain gages em faces tangenciais paralelas. Utilizando o programa Matlab 6.5 (MathWorks, Inc., Massachusetts, USA) para manipular os dados dos 7 canais foi possível a obtenção das tensões na direção radial (σ_R) e das deformação específicas longitudinal (ϵ_L), radial (ϵ_R) e tangencial (ϵ_T). Deste corpo de prova foi possível a obtenção do módulo de elasticidade na direção radial (E_R) e dos coeficientes de Poisson ν_{RT} e ν_{RL} utilizando as seguintes expressões:

$$E_R = \sigma_R / \epsilon_R$$

$$\nu_{RT} = \epsilon_T / \epsilon_R$$

$$\nu_{RL} = \epsilon_L / \epsilon_R$$

3.6.2.3. *Corpo de prova tangencial*

Foram instalados dois strains gages em faces tangenciais paralelas, dois strain gages em faces longitudinais paralelas e dois strain gages em faces radiais paralelas. Utilizando o programa Matlab 6.5 (MathWorks, Inc., Massachusetts, USA) para manipular os dados dos 7 canais foi possível a obtenção das tensões na direção tangencial (σ_T) e das deformação específicas longitudinal (ϵ_L), radial (ϵ_R) e tangencial (ϵ_T). Deste corpo de prova foi possível a obtenção do módulo de elasticidade na direção tangencial (E_T) e dos coeficientes de Poisson ν_{RT} e ν_{RL} utilizando as seguintes expressões:

$$E_T = \sigma_T / \epsilon_T$$

$$\nu_{TR} = \epsilon_R / \epsilon_T$$

$$\nu_{TL} = \epsilon_L / \epsilon_T$$

3.6.2.4. *Corpo de prova inclinado no plano LT - 45° em relação ao eixo*

No caso dos corpos de prova inclinados, os strain gages foram posicionados nas faces relativas ao plano onde se desejava determinar o módulo de elasticidade transversal. Nessas faces paralelas foram colocados 2 strain gages na direção da fibra (45°), dois strain gages na direção horizontal em faces paralelas e dois strain gages na direção vertical em faces paralelas (Figura 3.14).

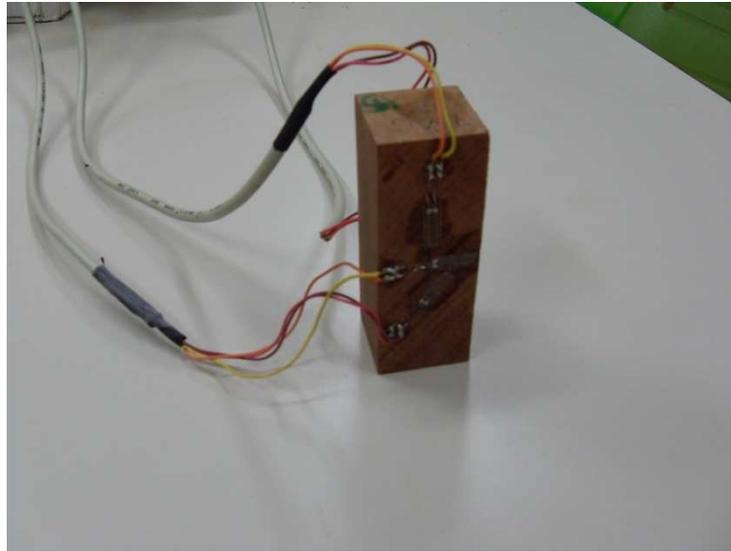


Figura 3.14 Exemplo de colocação dos gages em corpos de prova retirados com inclinação de 45°

A determinação do módulo de cisalhamento foi realizada utilizando-se os equacionamentos, cuja demonstração foi detalhada no item 2.6.1.4.

$$G'_{RL} = \frac{\sigma_L}{2(\epsilon_{RR} - \epsilon_{LL})}; G'_{RT} = \frac{\sigma_T}{2(\epsilon_{RR} - \epsilon_{TT})}; G'_{TL} = \frac{\sigma_L}{2(\epsilon_{TT} - \epsilon_{LL})}$$

Conforme foi visto no item 2.5.1.4 esses módulos podem também ser calculados utilizando-se as equações

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{1}{E_\alpha(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\cos^4 \alpha}{E_T(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\text{sen}^4 \alpha}{E_L(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L}$$

$$\frac{1}{G_{LR}} = \frac{1}{E_\alpha(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\cos^4 \alpha}{E_R(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\text{sen}^4 \alpha}{E_L(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} + \frac{2\nu_{LR}}{E_L}$$

$$\frac{1}{G_{TR}} = \frac{1}{E_\alpha(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\cos^4 \alpha}{E_R(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} - \frac{\text{sen}^4 \alpha}{E_T(\text{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha)} + \frac{2\nu_{TR}}{E_T}$$

No entanto, os ensaios preliminares demonstraram que o uso dessas 3 equações na determinação dos módulos de cisalhamento induz a maiores erros, pois há necessidade de

serem utilizados, em uma mesma equação, valores obtidos em diferentes corpos de prova havendo, portanto, acúmulo de erros.

3.6.3 Determinação dos parâmetros elásticos

A determinação dos três módulos de elasticidade longitudinais (E_L , E_R , E_T), três módulos de elasticidade transversais (G_{LR} , G_{LT} , G_{RT}) e seis coeficientes de Poisson (μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TR} , μ_{LT} , μ_{TL}) à partir dos ensaios de compressão estática foram realizadas utilizando o programa Matlab 6.5 (MathWorks, Inc., Massachusetts, USA) para manipular os dados dos canais. Esse programa permitiu obter, para cada ensaio, um gráfico tensão x deformação de cada canal e, também do extensômetro da máquina de ensaio, utilizando somente para confirmação do funcionamento do gage na mesma direção. Um exemplo de gráfico é apresentado na Figura 3.15, no qual se pode visualizar as deformações de cada canal, bem como do extensômetro da máquina de ensaios.

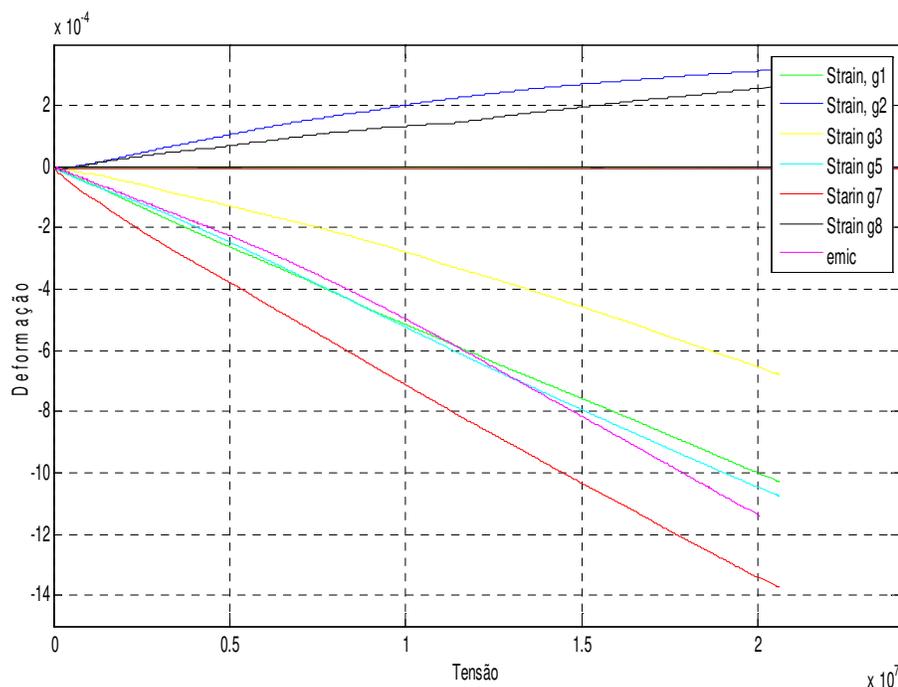


Figura 3.15. Exemplo de gráfico de Tensão (Pa) x Deformação (mm) obtido com a manipulação dos dados no Software MatLab 6.5 (MathWorks, Inc., Massachusetts, USA).

3.7. Simulações

Para avaliar as diferenças entre deformações previstas com o uso de softwares de cálculo estrutural e as deformações reais obtidas em ensaios, foram realizadas duas simulações em diferentes situações de carregamento utilizando o software ANSYS 9.0 ED (SAS IP, Ind 2004, University of California, Berkeley, USA).

Essas simulações foram realizadas com diferentes entradas de propriedades da madeira, de forma que se pudesse avaliar o quanto o uso de constantes mais específicas e reais do material utilizado reflete na precisão dos resultados quando se utiliza um software de cálculo estrutural.

A situação de carregamento avaliada foi a de uma peça sujeita a compressão simples, com carga uniaxial colocadas separadamente nas direções L, R e T. A entrada dos valores das propriedades da madeira foi feita de três formas e a espécie adotada para as simulações foi a Garapeira.

As condições adotadas para a inserção das propriedades elásticas foram:

3.7.1. Condição A: Utilização da NBR 7190 (1997)

O módulo de elasticidade à compressão na direção paralela às fibras (E_{c0}) tabelado na NBR 7190 (1997) para essa espécie é $E_{c0} = 18359$ MPa. Tendo em vista que a tabela não fornece os valores dos módulos de elasticidade nas demais direções, muitos projetistas adotam as relações também apresentadas na NBR 7190 (1997), $E_{c90} = E_R = E_T = E_L/20 = 918$ MPa.

Para o caso dos módulos de cisalhamento a NBR 7190 (1997) também sugere a adoção da relação $E_L/20 = 918$ MPa, portanto, esse foi o valor adotado para G_{LR} , G_{LT} e G_{RT} .

O coeficiente de Poisson não é citado na NBR 7190 (1997). Nesse caso o projetista, por falta de conhecimento de outras fontes, muitas vezes adota o valor $\nu = 0,20$ para todos os coeficientes de Poisson, valor esse baseado em materiais isotrópicos.

3.7.2. Condição B: Utilização da NBR 7190 (1997) e de relações apresentadas por Bodig e Jayne (1984)

Nessa condição também foi adotado o módulo de elasticidade à compressão na direção paralela às fibras (E_{c0}) tabelado na NBR 7190 (1997), $E_{c0} = 18359$ MPa. Tendo em vista que a tabela não fornece os valores do módulo nas demais direções, uma opção que poderia ser utilizada pelos projetistas seria adotar as relações propostas por Bodig e Jayne (1982), uma vez que se trata de importante referencia da área. Além das relações entre os módulos essa referencia traz uma tabela com valores gerais de Poisson (Tabela 2.13).

Utilizando as relações entre os módulos de elasticidade longitudinais propostos por Bodig e Jayne (1982) se pode obter $E_R = 1468$ MPa e $E_T = 918$ MPa, $G_{LR} = 1311$ MPa, $G_{RT} = 131$ MPa e $G_{LT} = 1231$ MPa.

3.7.3. Condição C: Valores das propriedades obtidas por ultrassom no prisma (Tabela 4.15)

Nesse caso as propriedades utilizadas foram obtidas com a utilização do ensaio de ultrassom no corpo de prova prismático de onde se obteve a matriz de rigidez e pela sua inversa a matriz de flexibilidade por meio da qual foram calculados os parâmetros elásticos necessários para caracterizar a madeira.

O ensaio de compressão foi realizado em corpo de prova, uma vez que não havia como ensaiar uma peça estrutural em compressão no laboratório. Os ensaios foram realizados em três corpos de prova de seção 50 mm x 50 mm e comprimento 150 mm da espécie Garapeira. Esses corpos de prova foram instrumentados com strain gages nas três direções principais (L, R e T) da mesma forma que os corpos de prova que compuseram a amostragem para os ensaios de determinação das constantes elásticas. Cada corpo de prova tinha a maior dimensão coincidente com um eixo de simetria (L, R e T) e a aplicação da carga ocorreu sempre na direção da maior dimensão enquanto as deformações foram medidas em todas as direções. Os valores das deformações foram posteriormente comparadas às obtidas nas três simulações (Condições A, B e C).

4. RESULTADOS e DISCUSSÕES

4.1 Determinações de erros de medição e de variabilidade

Seguindo o procedimento sugerido por Bucur (2006), os valores de velocidade obtidos nos diferentes corpos de prova para uma mesma direção de propagação foram avaliados para determinar os erros absolutos (em velocidade) e relativos (em porcentagem). Embora sejam sempre 6 repetições, dependendo do tipo de corpo de prova é possível a obtenção do mesmo tipo de velocidade (Ex: V_{44}) em um mesmo corpo de prova, aumentando o número de repetições. As variações das velocidades de mesmo tipo dentro do corpo de prova são consequência da influência da inclinação dos anéis de crescimento ou inclinação de fibras que geram dispersões da onda. Bucur (2006) propõe que o erro absoluto (e) seja determinado pela Equação 4.1, enquanto que o erro relativo pela razão entre o erro absoluto e a média. A variabilidade dos resultados foi calculada pelo coeficiente de variação.

$$e = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde s = desvio padrão e n = número de medições

As Tabelas 4.1 a 4.9 apresentam os valores médios, os erros e a variabilidade dos valores de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom para os corpos de prova de garapeira, cupiúba e eucalipto saligna, utilizando os corpos de prova cúbicos, discos multifacetados e poliedros de 26 faces.

Em relação aos valores de velocidade quase transversais obtidas nas direções não coincidentes com os eixos de simetria, essas tabelas só apresentam, para os discos multifacetados, os valores relativos ao ângulo de 45° , já que para as demais geometrias de corpos de prova esse foi o único ângulo adotado. A discussão dos valores obtidos nos diferentes ângulos para o disco multifacetado é realizada no item 4.3.

Tabela 4.1 Valores médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom utilizando corpos de prova prismáticos de 30 mm x 30 mm x 90 mm. Espécie Garapeira.

Parâmetro	Símbolo	Valor médio	CV (%)	Erro	
				m.s ⁻¹	%
Velocidade longitudinal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₁₁	5408	2,12	48,7	0,90
	V ₂₂	2203	0,37	2,2	1,00
	V ₃₃	1765	1,32	13,9	0,78
Velocidade transversal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₄	818	2,47	9,82	1,20
	V ₅₅	1305	16,1	15,2	1,16
	V ₆₆	1480	19,0	14,9	1,00
Velocidade transversal fora dos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₅ (LT)	1127	6,00	19,1	1,69
	V ₄₅ (LR)	1167	4,1	15,0	1,29
	V ₄₅ (LR)	865	21,2	9,6	1,11

Tabela 4.2 Valores médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom, utilizando os discos multifacetados. Espécie Garapeira.

Parâmetro	Símbolo	Valor médio	CV (%)	Erro	
				m.s ⁻¹	%
Velocidade longitudinal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₁₁	5200	1,51	49,5	0,95
	V ₂₂	2420	4,35	25,9	1,07
	V ₃₃	2096	3,38	23,1	1,10
Velocidade transversal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₄	964	1,32	9,8	1,02
	V ₅₅	1294	9,98	13,2	1,02
	V ₆₆	1386	1,30	14,5	1,05
Velocidade transversal fora dos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₅ (LT)	1400	1,27	16,3	1,16
	V ₄₅ (LR)	1304	1,04	10,2	0,78
	V ₄₅ (RT)	935	1,72	11,0	1,18

Tabela 4.3 Valores médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom, utilizando os poliedros. Espécie Garapeira.

Parâmetro	Símbolo	Valor médio	CV (%)	Erro	
				m.s ⁻¹	%
Velocidade longitudinal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₁₁	5300	2,3	34,4	0,65
	V ₂₂	2354	2,5	18,8	0,80
	V ₃₃	2168	2,2	23,9	1,10
Velocidade transversal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₄	987	4,5	6,2	0,63
	V ₅₅	1403	5,2	12,6	0,90
	V ₆₆	1679	5,5	17,6	1,05
Velocidade transversal fora dos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₅ (LT)	1517	6,8	28,8	1,90
	V ₄₅ (LR)	1308	1,9	13,0	0,99
	V ₄₅ (RT)	1143	2,8	12,0	1,05

Tabela 4.4 Valores médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom, utilizando corpos de prova prismáticos de 30 mm x 30 mm x 90 mm. Espécie Cupiúba.

Parâmetro	Símbolo	Valor médio	CV (%)	Erro	
				m.s ⁻¹	%
Velocidade longitudinal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₁₁	5152	1,23	45,0	0,87
	V ₂₂	2223	1,79	23,3	1,05
	V ₃₃	1638	0,93	11,0	0,67
Velocidade transversal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₄	887	2,53	9,84	1,11
	V ₅₅	1094	11,7	12,4	1,13
	V ₆₆	1551	0,89	10,0	0,64
Velocidade transversal fora dos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₅ (LT)	1220	0,51	9,3	0,76
	V ₄₅ (LR)	1034	2,34	12,0	1,16
	V ₄₅ (RT)	919	6,5	10,3	1,12

Tabela 4.5 Valores médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom, utilizando os discos multifacetados. Espécie Cupiúba.

Parâmetro	Símbolo	Valor médio	CV (%)	Erro	
				m.s ⁻¹	%
Velocidade longitudinal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₁₁	5074	4,52	46,7	0,92
	V ₂₂	2198	1,90	21,1	0,96
	V ₃₃	1597	4,34	17,0	1,06
Velocidade transversal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₄	873	7,51	9,43	1,08
	V ₅₅	1192	7,70	12,9	1,08
	V ₆₆	1602	6,21	17,3	1,08
Velocidade transversal fora dos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₅ (LT)	1170	3,13	13,6	1,16
	V ₄₅ (LR)	1165	6,43	11,0	0,94
	V ₄₅ (TR)	873	10,28	10,0	1,15

Tabela 4.6 Valores médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom, utilizando os poliedros. Espécie Cupiúba.

Parâmetro	Símbolo	Valor médio	CV (%)	Erro	
				m.s ⁻¹	%
Velocidade longitudinal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₁₁	4797	4,0	52,8	1,10
	V ₂₂	2109	5,0	19,0	0,90
	V ₃₃	1562	4,2	15,5	0,99
Velocidade transversal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₄	970	2,7	10,7	1,10
	V ₅₅	1331	3,5	13,6	1,02
	V ₆₆	1445	1,9	15,2	1,05
Velocidade transversal fora dos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₅ (LT)	1195	3,3	17,7	1,48
	V ₄₅ (LR)	1136	1,0	19,3	1,70
	V ₄₅ (TR)	856	2,1	11,6	1,36

Tabela 4.7 Valores médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom, utilizando corpos de prova prismáticos de 30 mm x 30 mm x 90 mm. Espécie Eucalipto saligna.

Parâmetro	Símbolo	Valor médio	CV (%)	Erro	
				m.s ⁻¹	%
Velocidade longitudinal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₁₁	5752	1,34	27,0	0,47
	V ₂₂	3187	1,59	22,0	0,69
	V ₃₃	1891	1,46	16,1	0,85
Velocidade transversal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₄	1000	3,05	10,0	1,00
	V ₅₅	1203	7,16	7,2	0,60
	V ₆₆	1706	7,76	13,1	0,77
Velocidade transversal fora dos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₅ (LT)	1342	8,26	19,5	1,45
	V ₄₅ (LR)	1140	2,96	14,0	1,23
	V ₄₅ (TR)	1045	15,7	14,5	1,39

Tabela 4.8 Valores médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom, utilizando os discos multifacetados. Espécie Eucalipto saligna.

Parâmetro	Símbolo	Valor médio	CV (%)	Erro	
				m.s ⁻¹	%
Velocidade longitudinal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₁₁	5635	3,4	42,0	0,75
	V ₂₂	3024	2,6	25,1	0,83
	V ₃₃	1872	3,9	15,9	0,85
Velocidade transversal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₄	960	2,9	8,8	0,92
	V ₅₅	1178	8,4	13,2	1,12
	V ₆₆	1655	4,1	12,0	0,73
Velocidade transversal fora dos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₅ (LT)	1307	6,3	20,0	1,53
	V ₄₅ (LR)	1128	3,8	17,3	1,53
	V ₄₅ (RT)	959	6,8	13,4	1,40

Tabela 4.9 Valores médios de velocidades obtidos nos ensaios de ultrassom, utilizando os poliedros. Espécie Eucalipto saligna.

Parâmetro	Símbolo	Valor médio	CV (%)	Erro	
				m.s ⁻¹	%
Velocidade longitudinal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₁₁	5648	3,5	41,7	0,74
	V ₂₂	2532	3,9	22,3	0,88
	V ₃₃	1800	3,3	21,2	1,18
Velocidade transversal nos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₄	901	2,2	10,5	1,17
	V ₅₅	1131	3,2	13,0	1,15
	V ₆₆	1588	3,4	16,2	1,02
Velocidade transversal fora dos eixos (m.s ⁻¹)	V ₄₅ (LT)	1235	4,0	20,0	1,62
	V ₄₅ (LR)	1060	1,5	16,0	1,51
	V ₄₅ (TR)	909	2,0	10,2	1,12

Para corpos de prova retirados nos eixos de simetria, sem inclinação significativa dos anéis de crescimento e fibras retas, o erro experimental da determinação da velocidade longitudinal e de cisalhamento utilizando ultrassom é próximo de 1%. Esses erros experimentais são muito pequenos quando comparados à variabilidade inerente do material. Bucur (2006) apresenta resultados de erros de medição por ultrassom comparados com a variabilidade de propriedades, medida pelo coeficiente de variação (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 – Velocidade, coeficientes de rigidez e erros obtidos para a madeira Beech e Douglas fir. Adaptado de Bucur, (2006).

Parâmetro	Direção	Erro de medição (%)	CV (%)
Beech			
Velocidade longitudinal (m/s)	V ₁₁	0,9	3,69
Velocidade longitudinal (m/s)	V ₃₃	0,7	5,39
Velocidade tangencial (m/s)	V ₅₅	0,7	2,81
Douglas fir			
Velocidade longitudinal (m/s)	V ₁₁	0,9	6,72
Velocidade longitudinal (m/s)	V ₃₃	0,8	7,51
Velocidade tangencial (m/s)	V ₅₅	0,7	3,00

Verifica-se que os valores de erro obtidos nessa pesquisa foram, de forma geral, levemente superiores aos obtidos por Bucur (2006), embora também sempre menores que a variabilidade do material. Esses valores maiores de erro podem estar associados à maior dimensão dos corpos de prova utilizados nessa pesquisa, dificultando a obtenção de peças sem inclinação de fibras ou de anéis de crescimento. No caso de Bucur (2006) os ensaios, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.10, foram realizados em cubos de 16 mm de lado.

A Tabela 4.11 resume os resultados médios de erros de medição obtidos para cada espécie nas diferentes geometrias de corpos de prova.

Tabela 4.11. Erros de medição das velocidades (%).

Geometria	Eixos de simetria Transdutor longitudinal	Eixos de Simetria Transdutor de cisalhamento	Fora dos eixos de simetria Transdutor de cisalhamento	Média Geral
Garapeira				
Prisma	0,89	1,12	1,36	1,12
Disco	1,04	1,03	1,04	1,04
Poliedro	0,85	0,86	1,31	1,00
Cupiúba				
Prisma	0,86	0,96	1,01	0,94
Disco	0,98	1,08	1,08	1,05
Poliedro	1,00	1,06	1,51	1,19
Eucalipto saligna				
Prisma	0,67	0,79	1,36	0,94
Disco	0,81	0,92	1,49	1,07
Poliedro	0,93	1,11	1,41	1,15

No caso das medições nos eixos de simetria com os transdutores longitudinais, em geral os erros são menores para todas as geometrias de corpos de prova. O mesmo ocorre quando se comparam as medições realizadas com transdutores de cisalhamento nos eixos e fora dos eixos de simetria. No entanto, é necessário que essa comparação seja realizada de forma cuidadosa, já que esses erros estarão diretamente relacionados à condição dos anéis de crescimento e também na presença de fibras reversas no corpo de prova.

Considerando os resultados da Tabela 4.11, pode-se concluir que nenhuma geometria de corpo de prova se destacou por apresentar erros muito grandes ou muito pequenos em relação às demais. Além disso, os erros podem ser considerados adequados (< 1,5%) quando comparados à variabilidade do material, de forma que todas as geometrias poderiam ser utilizadas para as medições.

As Figuras 4.1 a 4.3 mostram, de forma qualitativa, as diferenças de velocidade obtidas nas diferentes geometrias de corpos de prova para as espécies Garapeira, Cupiúba e Eucalipto saligna. Quantitativamente as diferenças foram maiores para a espécie garapeira (6% entre prisma e disco, 10% entre prisma e poliedro e 6% entre disco e poliedro). Para a espécie Cupiúba as diferenças foram de 4% entre prisma e disco, 8% entre prisma e poliedro e 5% entre disco e poliedro. Enquanto para o Eucalipto saligna de 3% entre prisma e disco, 10% entre prisma e poliedro e 6% entre disco e poliedro. Todas essas diferenças podem ser consideradas dentro da variabilidade do próprio material.

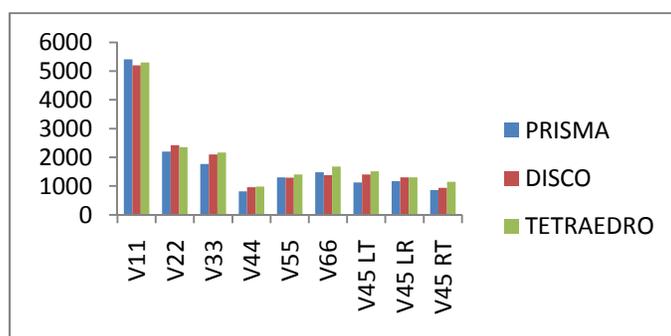


Figura 4.1. Valores comparativos de velocidades nas diferentes geometrias de corpos de prova. Espécie: Garapeira

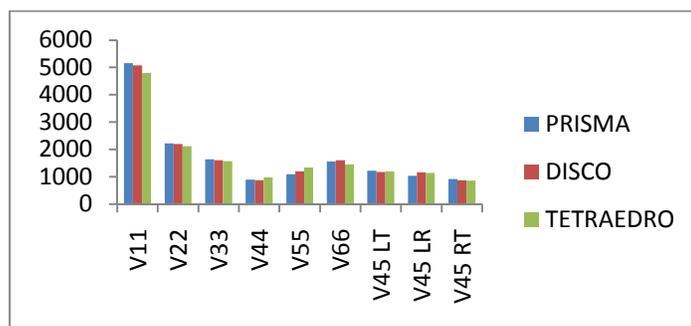


Figura 4.2. Valores comparativos de velocidades nas diferentes geometrias de corpos de prova. Espécie: Cupiúba

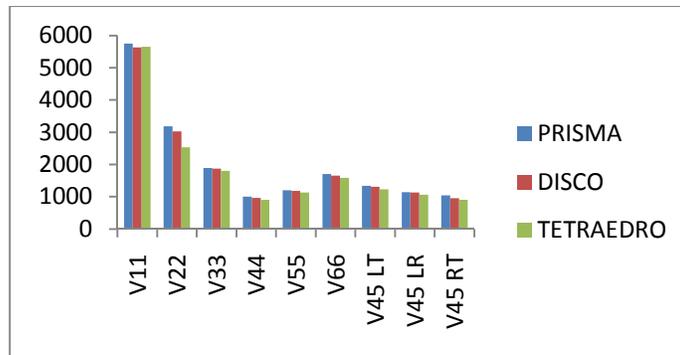


Figura 4.3. Valores comparativos de velocidades nas diferentes geometrias de corpos de prova. Espécie: Eucalipto saligna

4.2 Matrizes de rigidez e de flexibilidade

As Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam os coeficientes médios da matriz de rigidez obtida por ultrassom. Os valores de C_{12} , C_{13} e C_{23} , correspondentes aos termos fora da diagonal, foram calculados com as propagações à 45° em relação a cada plano de simetria. No caso do disco multifacetado esses termos foram calculados também para outros ângulos, mas os resultados discutidos nesse item só foram referenciados ao ângulo de 45° para ser possível realizar as comparações entre as diferentes geometrias de corpos de prova.

É difícil comparar, numericamente, os valores das constantes de rigidez obtidas nessa pesquisa com os autores citados no capítulo de revisão bibliográfica, porque se tratam de espécies e de amostragens diferentes. No, entanto verifica-se a coerência dos resultados uma vez que, como no caso dos autores referenciados, $C_{11} > C_{22} > C_{33}$; $C_{44} < C_{55} < C_{66}$ e $C_{12} > C_{13} > C_{23}$. Essa ordem de valores é consequência das características mecânicas e acústicas ligadas à ortotropia da madeira.

Do ponto de vista mecânico, as velocidades se relacionam fortemente com a elasticidade do material, pois a propagação das ondas gera oscilações mecânicas (Keunecke et al, 2007).

Do ponto de vista acústico, na direção longitudinal, as fibras (nas dicotiledôneas) formam um sistema composto contínuo de tubos fechados contínuos, cuja relação comprimento x diâmetro de aproximadamente 30:1 a 100:1, proporcionam excelentes e constantes propriedades acústicas, refletidas em maiores velocidades. Na direção radial, os raios são mais curtos que as fibras, mas ainda assim são capazes de transmitir as ondas

acústicas com qualidade. Na direção tangencial não há uma estrutura contínua que permita essa condução da onda e, portanto, nessa direção as velocidades são sempre menores (Bucur, 2006).

Tabela 4.12. Valores médios da matriz de rigidez (MPa) para cada tipo de corpo de prova. Espécie: Garapeira.

C₁₁	C₂₂	C₃₃	C₄₄	C₅₅	C₆₆	C₁₂	C₁₃	C₂₃
Prismas								
23988 (3,54)	3978 (0,64)	2555 (2,39)	549 (4,46)	1427 (22,94)	1850 (27,93)	5499 (5,80)	3773 (9,16)	1340 (34,26)
Discos multifacetados								
22177 (2,44)	4810 (7,68)	3606 (5,98)	763 (2,03)	1384 (16,35)	1576 (2,54)	5524 (8,51)	3221 (9,25)	1959 (11,31)
Poliedros								
23044 (3,80)	4546 (4,18)	3855 (3,72)	799 (7,00)	1617 (9,04)	2317 (9,13)	4931 (3,97)	2684 (20,47)	1237 (3,12)

*Valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%)

Tabela 4.13. Valores médios da matriz de rigidez (MPa) para cada tipo de corpo de prova. Espécie: Cupiúba.

C₁₁	C₂₂	C₃₃	C₄₄	C₅₅	C₆₆	C₁₂	C₁₃	C₂₃
Prismas								
22551 (2,19)	4200 (3,06)	2279 (1,61)	668 (4,39)	1028 (22,02)	2044 (1,51)	5955 (2,24)	1954 (12,39)	936 (14,42)
Discos multifacetados								
21919 (7,47)	4108 (3,37)	2171 (7,69)	651 (13,59)	1213 (13,71)	2189 (10,87)	4932 (1,86)	2248 (14,72)	986 (15,04)
Poliedros								
19589 (6,81)	3787 (9,23)	2077 (7,07)	801 (4,94)	1507 (6,16)	1775 (3,11)	4482 (13,61)	1623 (13,95)	734 (19,36)

*Valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%)

Tabela 4.14. Coeficientes médios da matriz de rigidez (MPa) para cada tipo de corpo de prova. Espécie: Eucalipto saligna.

C_{11}	C_{22}	C_{33}	C_{44}	C_{55}	C_{66}	C_{12}	C_{13}	C_{23}
Prismas								
28122 (2,05)	8633 (2,94)	3041 (2,64)	851 (5,18)	1235 (12,86)	2486 (13,16)	10931 (0,41)	3111 (26,08)	2171 (32,71)
Discos multifacetados								
27020 (5,78)	7778 (4,35)	2982 (7,03)	784 (5,3)	1186 (13,8)	2332 (6,93)	10031 (4,46)	3258 (5,61)	2351 (1,98)
Poliedros								
27142 (5,89)	5454 (6,57)	2757 (5,9)	690 (3,81)	1087 (5,71)	2144 (5,83)	8191 (7,50)	3480 (4,14)	1730 (9,36)

*Valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%)

De maneira geral, observa-se que os coeficientes de variação de C_{44} , C_{55} e C_{66} , correspondentes aos módulos de cisalhamento são maiores do que os C_{11} , C_{22} e C_{33} correspondentes aos módulos de elasticidade longitudinais. Nessa variabilidade está embutida tanto a questão dos erros de medição, que para o transdutor de cisalhamento em geral são superiores, quanto o comportamento mecânico do material.

As Tabelas 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam os Valores elásticos médios com os respectivos intervalos de confiança, para cada espécie e geometria de corpo de prova, obtidos pela inversão da matriz de rigidez. Para facilitar a comparação dos resultados, nas mesmas tabelas são apresentados os parâmetros elásticos obtidos no ensaio de compressão estática.

Tabela 4.15. Valores elásticos (médias e intervalo de confiança) obtidos pela inversão da matriz de rigidez e no ensaio estático de compressão. Espécie: Garapeira.

E_L	E_R	E_T	G_{TR}	G_{TL}	G_{LR}	ν_{RL}	ν_{TL}	ν_{LR}	ν_{TR}	ν_{LT}	ν_{RT}
Prismas											
14529 ± 1429	2515 ± 481	1816 ± 308	549 ± 28	1427 ± 471	1850 ± 721	0,189 $\pm 0,011$	0,062 $\pm 0,036$	1,065 $\pm 0,027$	0,270 $\pm 0,124$	0,885 $\pm 0,246$	0,365 $\pm 0,149$
Disco multifacetado											
15574 ± 234	3018 ± 124	2746 ± 114	763 ± 21	1384 ± 289	1576 ± 43	0,193 $\pm 0,015$	0,062 $\pm 0,007$	0,996 $\pm 0,019$	0,443 $\pm 0,040$	0,336 $\pm 0,017$	0,369 $\pm 0,017$
Poliedro											
17077 ± 1395	3362 ± 169	3398 ± 281	791 ± 28	1617 ± 176	2317 ± 267	0,193 $\pm 0,004$	0,077 $\pm 0,037$	0,979 $\pm 0,047$	0,188 $\pm 0,028$	0,388 $\pm 0,186$	0,186 $\pm 0,021$
Ensaio estático de compressão											
14333 ± 4410	2323 ± 1041	1452 ± 690	536 ± 73	1489 ± 1172	1865 ± 2062	0,040 $\pm 0,011$	0,078 $\pm 0,040$	0,180 $\pm 0,099$	0,330 $\pm 0,066$	0,250 $\pm 0,124$	0,790 $\pm 0,424$

Tabela 4.16. Valores elásticos médios, obtidos pela inversão da matriz de rigidez, em cada tipo de corpo de prova. Espécie: Cupiúba.

E_L	E_R	E_T	G_{TR}	G_{TL}	G_{LR}	ν_{RL}	ν_{TL}	ν_{LR}	ν_{TR}	ν_{LT}	ν_{RT}
Prisma											
13859	2528	2024	668	1028	2044	0,247	0,062	1,358	0,238	0,480	0,288
± 185	± 187	± 75	± 35	± 249	± 38	$\pm 0,009$	$\pm 0,034$	$\pm 0,046$	$\pm 0,033$	$\pm 0,082$	$\pm 0,045$
Disco multifacetado											
15356	2850	1841	651	1213	2189	0,200	0,063	1,082	0,214	0,673	0,329
± 1610	± 373	± 226	± 102	± 196	± 284	$\pm 0,010$	$\pm 0,034$	$\pm 0,076$	$\pm 0,069$	$\pm 0,127$	$\pm 0,104$
Poliedro											
14032	2698	1893	801	1507	1775	0,211	0,053	1,096	0,130	0,392	0,185
± 552	± 120	± 136	± 45	± 112	± 71	$\pm 0,016$	$\pm 0,004$	$\pm 0,071$	$\pm 0,025$	$\pm 0,041$	$\pm 0,030$
Ensaio estático de compressão											
13583	2113	1813	642	892	1950	0,045	0,075	0,222	0,320	0,280	0,830
± 658	± 468	± 406	± 81	± 449	± 124	$\pm 0,021$	$\pm 0,019$	$\pm 0,093$	$\pm 0,066$	$\pm 0,066$	$\pm 0,269$

Tabela 4.17. Valores elásticos médios, obtidos pela inversão da matriz de rigidez, em cada tipo de corpo de prova. Espécie: Eucalipto saligna.

E_L	E_R	E_T	G_{TR}	G_{TL}	G_{LR}	ν_{RL}	ν_{TL}	ν_{LR}	ν_{TR}	ν_{LT}	ν_{RT}
Prisma											
14199	3987	2426	851	1235	2486	0,344	0,024	1,231	0,222	0,271	0,459
± 1289	± 578	± 404	± 54	± 185	± 403	$\pm 0,018$	$\pm 0,027$	$\pm 0,032$	$\pm 0,099$	$\pm 0,015$	$\pm 0,028$
Disco multifacetado											
14111	3565	2264	784	1186	2332	0,317	0,017	1,253	0,281	0,109	0,444
± 1202	± 250	± 264	± 49	± 207	± 202	$\pm 0,004$	$\pm 0,013$	$\pm 0,028$	$\pm 0,015$	$\pm 0,089$	$\pm 0,029$
Poliedro											
14646	2813	2151	690	1087	2144	0,261	0,060	1,358	0,227	0,412	0,297
± 815	± 101	± 135	± 32	± 74	± 154	$\pm 0,009$	$\pm 0,015$	$\pm 0,065$	$\pm 0,030$	$\pm 0,108$	$\pm 0,030$
Ensaio estático de compressão											
13617	3680	2180	829	1172	2360	0,038	0,060	0,333	0,300	0,780	0,420
± 1573	± 465	± 269	± 76	± 312	± 646	$\pm 0,009$	$\pm 0,011$	$\pm 0,087$	$\pm 0,066$	$\pm 0,090$	$\pm 0,108$

Conforme foi visto no capítulo de revisão bibliográfica, muitos autores consideram, por simplificação, a constante de rigidez aproximadamente igual ao módulo de elasticidade ($C_{ii} \cong E_{ii}$). Nesse caso, as diferenças numéricas são elevadas, já que, além da diferença entre as bases teóricas do ensaio há, também, a diferença proveniente da não correção do valor pelos coeficientes de Poisson.

Keuncke *et al.* (2007) comentam que, mesmo que o material fosse perfeitamente isotrópico, essa relação só seria válida se os coeficientes de Poisson fossem muito pequenos.

Esses autores mostram que para um material isotrópico tais diferenças podem chegar a 50% para um coeficiente de Poisson igual a 0,40.

Zimmer e Cost (1970) obtiveram diferenças médias de 40% para o material com isotropia transversal ensaiado.

No caso dessa pesquisa as diferenças numéricas médias entre os valores das constantes de rigidez (C) obtidas por ultrassom e as propriedades elásticas obtidas pelo ensaio estático são apresentadas na Tabela 4.18. Para os módulos de elasticidade longitudinais as diferenças são bastante altas enquanto, como já era de se esperar, os valores dos módulos de cisalhamento são bem mais próximos, já que não há interferência dos coeficientes de Poisson.

Tabela 4.18. Diferenças médias (%) entre os valores das constantes de rigidez obtidas por ultrassom e as propriedades elásticas obtidas pelo ensaio estático.

Geometria	E_L	E_R	E_T	G_{TR}	G_{TL}	G_{LR}
Garapeira						
Prisma	67	71	76	2	4	0
disco	55	107	148	42	7	18
poliedro	61	96	166	49	9	24
Média	61	91	130	31	7	14
Cupiúba						
Prisma	66	99	26	4	15	5
disco	61	94	20	1	36	12
poliedro	44	79	15	25	69	10
Média	73	91	20	10	40	9
Eucalipto saligna						
Prisma	106	134	33	3	5	5
disco	98	111	37	6	1	1
poliedro	99	48	26	20	8	10
Média	101	98	32	10	5	5

Comparando-se os resultados dessa pesquisa com os de Gonzalez et al. (2001) considerando apenas o módulo de elasticidade na direção longitudinal, verifica-se que a Garapeira foi a que mais se aproximou das diferenças médias obtidas pelo autor (54%).

Tendo em vista que na inversão da matriz de rigidez, os módulos de cisalhamento não são afetados pelos coeficientes de Poisson, para os prismas os valores dos módulos de cisalhamento deveriam ser iguais aos obtidos pelo ensaio estático, já que os ensaios de ultrassom e estático foram realizados nos mesmos corpos de prova. Para as demais geometrias, diferenças pequenas podem existir em função da variabilidade natural da madeira.

Pela Tabela 4.18 verifica-se que as diferenças são realmente pequenas, exceto para o G_{TL} . Essas diferenças podem ser em parte explicadas pela inclinação dos anéis de crescimento no corpo de prova, as quais afetam tanto o ensaio estático quanto dinâmico. Adicionalmente é importante destacar as dificuldades dos ensaios estáticos para a determinação do módulo de cisalhamento. As diferenças nas leituras das deformações em faces paralelas demonstraram que o ensaio estático é muito sujeito a erros. Essa mesma constatação foi indicada por Sinclair e Farshad (1987) e Keunecke *et al* (2007) que consideraram o ensaio de ultrassom mais confiável para a determinação do módulo de cisalhamento que o ensaio estático.

As diferenças entre os coeficientes de rigidez e os módulos de elasticidade longitudinais são esperadas e não invalidam o uso direto desses coeficientes na caracterização parcial (apenas com a determinação dos módulos longitudinais em dadas direções) ou na classificação da madeira. Nesses casos, conhecendo-se os aspectos teóricos, não se deve esperar valores numericamente iguais, mas sim correlações entre os parâmetros estáticos e dinâmicos. Essas correlações são, normalmente, estatisticamente significativas e podem ser utilizadas para conhecer as propriedades do material fazendo um ensaio simples, como é o caso do ultrassom.

A análise das correlações entre os coeficientes de rigidez e os módulos obtidos por ultrassom não é o foco dessa pesquisa. A amostragem não foi adequada para analisar correlações, já que para cada série de 6 corpos de prova ensaiados por ultrassom, apenas 3 foram também ensaiados em compressão estática. No entanto, apenas para exemplificar a potencialidade do uso da metodologia de ultrassom para a determinação das constantes elásticas da madeira por meio de correlações com ensaios estáticos, a Tabela 4.19 apresenta os valores dos coeficientes de correlação (R), considerando-se o corpo de prova prismático. Essa apresentação foi feita somente com o corpo de prova prismático, uma vez que para esse tipo de avaliação (correlações) não teria sentido utilizar corpos de prova de outras geometrias. Além disso, para o prisma os ensaios de ultrassom e de compressão foram realizados nos mesmos corpos de prova.

Tabela 4.19. Coeficientes de correlação (R) entre os parâmetros da matriz de rigidez na direção longitudinal (C_{LL}), radial (C_{RR}) e tangencial (C_{TT}) e os módulos de elasticidade nas mesmas direções (E_L , E_R e E_T).

	Garapeira	Cupiúba	Eucalipto
$C_{11} \times E_L$	0,98	0,91	0,92
$C_{22} \times E_R$	0,99	0,96	0,91
$C_{33} \times E_T$	0,99	0,99	0,87

Conforme já era esperado, mesmo utilizando-se o procedimento completo de inversão da matriz de rigidez, os valores das constantes elásticas obtidas por ultrassom são superiores aos valores das mesmas constantes obtidas pelo ensaio estático. A explicação para esse resultado está ligada aos mecanismos dos ensaios estáticos e dinâmicos.

A primeira questão que se deve colocar é que o ensaio estático é isotérmico, enquanto o dinâmico é adiabático, conforme já apresentado na Revisão Bibliográfica nas citações de Preziosa (1984), Bucur (2006) e Gonzalez *et al.* (2001). No processo adiabático há um acréscimo na energia interna do material durante o ensaio e o valor desse acréscimo está ligado à capacidade calorífica e aos coeficientes de expansão térmica do material.

Além da questão acima mencionada, Preziosa (1984) destaca que a constante de rigidez obtida por ultrassom é proveniente de deformações bem pequenas, enquanto no ensaio estático essas deformações são grandes, mesmo considerando o ensaio apenas no trecho elástico.

As diferenças entre os ensaios estáticos e dinâmicos, considerando o valor dos parâmetros elásticos obtidos por ultrassom a partir da matriz de rigidez completa, são apresentadas na Tabela 4.20.

Tabela 4.20. Diferenças médias (%) entre os valores das constantes elásticas obtidas por ultrassom e obtidas pelo ensaio estático

Geometria	E_L	E_R	E_T	G_{TR}	G_{TL}	G_{LR}
Garapeira						
Prisma	1	8	25	2	4	0
disco	9	30	89	42	7	18
poliedro	19	45	34	49	9	24
Média	10	28	49	31	7	14
Cupiúba						
Prisma	2	20	12	4	15	5
disco	13	35	2	1	36	12
poliedro	3	28	4	25	69	10
Média	11	28	6	10	40	9
Eucalipto saligna						
Prisma	4	8	11	3	5	5
disco	4	3	4	6	1	1
poliedro	8	31	1	20	8	10
Média	5	14	5	10	5	5

Verifica-se que as diferenças entre os resultados de ultrassom e de compressão estática são muito inferiores quando comparada à utilização direta da constante de rigidez (Tabela 4.18). As diferenças superiores a 15% foram sempre associadas às direções radiais ou tangenciais, explicadas pela impossibilidade de obtenção de anéis de crescimento com inclinações que pudessem ser negligenciadas por não interferirem nos ensaios. Certamente a adoção de corpo de prova menor reduziria essas diferenças.

Comparando-se as diferentes geometrias, verifica-se que as menores diferenças, em geral foram para o prisma. No entanto é importante lembrar que essa foi a única geometria na qual os ensaios estáticos foram realizados nos mesmos corpos de prova dos ensaios de ultrassom. Sendo assim, não houve nenhuma geometria que tenha se destacado positiva ou negativamente para que pudesse concluir que a mesma seja a mais adequada.

Apesar das diferenças numéricas existentes é importante verificar se há diferenças estatisticamente significativas. Essa análise foi realizada considerando-se os intervalos de confiança dos valores dos parâmetros elásticos determinados por ultrassom (matriz completa) e pelo ensaio de compressão. Para facilitar a visualização os resultados dessa equivalência são apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21. Análise de equivalência estatística entre os resultados do ensaio de ultrassom e de compressão estática.

1 = Equivalente e 0 = não equivalente

Parâmetro	Prisma	Disco	Poliedro	Prisma	Disco	Poliedro	Prisma	Disco	Poliedro
	Garapeira			Cupiúba			Eucalipto		
E_L	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E_R	1	1	1	1	1	1	1	1	0
E_T	1	0	0	1	1	1	1	1	1
G_{TR}	1	0	0	1	1	0	1	1	0
G_{TL}	1	1	1	1	1	0	1	0	0
G_{LR}	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ν_{RL}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ν_{TL}	1	1	1	1	0	1	1	0	1
ν_{LR}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ν_{TR}	1	0	0	1	1	1	1	1	1
ν_{LT}	0	1	1	0	0	0	0	0	0
ν_{RT}	1	1	0	1	1	1	1	1	1

Verifica-se que, para o prisma, todos os módulos de elasticidade e de cisalhamento são equivalentes para todas as espécies.

Para o disco apenas o E_T e G_{TR} não puderam ser considerados equivalentes para a Garapeira. Para a Cupiúba todos os módulos de elasticidade e de cisalhamento foram equivalentes e, para o Eucalipto, o G_{TL} , não pôde ser considerado equivalente.

Para o poliedro não puderam ser considerados equivalentes, o E_T e G_{TR} na Garapeira G_{TR} e G_{TL} na Cupiúba e o E_R e o G_{TL} no Eucalipto.

Destaca-se que, mesmo quando os intervalos de confiança não permitem a consideração de equivalência, os resultados dos módulos de elasticidade e de cisalhamento não são muito discrepantes.

Considerando essa equivalência, o prisma se destacou como a melhor geometria, seguida do disco multifacetado e, por último do poliedro. Mais uma vez é importante destacar que somente no caso dos prismas, os corpos de prova para o ensaio de ultrassom e estático foram os mesmos, o que certamente contribuiu para esse resultado.

Salienta-se ainda, que os casos de não equivalência podem ter sido conseqüência da influência da inclinação dos anéis de crescimento ou da inclinação de fibras no corpo de prova. Essa influência ocorre tanto no ensaio de ultrassom, no qual a propagação das ondas não se dá exatamente na direção esperada, quanto no ensaio estático, no qual as deformações lidas nos strain gages também são afetadas.

No caso do coeficiente de Poisson não houve equivalência entre o ensaio de ultrassom e o ensaio estático para o ν_{RL} e o ν_{LR} em nenhuma espécie e em nenhuma geometria de corpo de prova. Para os demais coeficientes de Poisson houve diferenças de resultados em função da espécie e da geometria do corpo de prova.

No caso do coeficiente de Poisson, o prisma e o disco multifacetado foram os que apresentaram o maior número de equivalências com o ensaio de compressão estática.

Verifica-se que no ensaio de ultrassom foram obtidos coeficientes de Poisson maiores do que 1,0. Resultados semelhantes foram obtidos também por diversos autores citados no capítulo de revisão e, no item 2.3. Bucur (2006) demonstra porque esse valor pode ser obtido no caso da madeira.

Conforme discutido no item 2.3, embora a madeira seja considerada ortotrópica, tendo, portanto as matrizes de rigidez e de flexibilidade com simetria, em muitos casos há grande dispersão em torno dessa consideração.

A Tabela 4.22 apresenta as relações de simetria para as três espécies estudadas nessa pesquisa. Para a Garapeira e Cupiúba, os maiores desvios ocorreram no plano LT, enquanto para o Eucalipto no plano LR. Esses desvios podem estar relacionados com a inclinação dos anéis de crescimento, a micro fraturas, pois as dimensões dos corpos de prova não eram tão pequenas para evitar totalmente essas inclinações e estas fraturas. Quando comparados aos valores de Bodig e Jayne (1982), apresentados na Tabela 2.11, verifica-se coerência na ordem de grandeza das relações em cada plano. Comparações mais detalhadas não podem ser apresentadas porque não se tem informações a respeito do tipo de ensaio estático realizado nem das dimensões dos corpos de prova utilizados.

Tabela 4.22. Valores médios das relações dos termos da matriz de flexibilidade (10^{-5}) obtidas no ensaio de compressão estática.

Espécie	$\frac{\vartheta_{RL}}{E_R}$	$\frac{\vartheta_{LR}}{E_L}$	$\frac{\vartheta_{TL}}{E_T}$	$\frac{\vartheta_{LT}}{E_L}$	$\frac{\vartheta_{TR}}{E_T}$	$\frac{\vartheta_{RT}}{E_R}$
Garapeira	1,72	1,25	5,37	1,74	22,73	34,01
Cupiúba	2,13	1,63	4,14	2,06	17,65	39,28
Eucalipto	1,03	2,44	2,75	5,72	13,76	11,41

Conforme já detalhado no capítulo de revisão bibliográfica, no caso dos ensaios de ultrassom a premissa é a ortotropia, pois se consideram os termos $C_{12} = C_{21}$; $C_{13} = C_{31}$ e $C_{23} = C_{32}$ de forma que ao fazer a inversão se tem a condição teórica da matriz [S]. A Tabela 4.23 apresenta as relações obtidas para os termos simétricos.

Tabela 4.23. Relações médias dos termos da matriz de flexibilidade (10^{-5}) obtidas no ensaio de ultrassom.

Espécie	$\frac{\nu_{RL}}{E_R}$	$\frac{\nu_{LR}}{E_L}$	$\frac{\nu_{TL}}{E_T}$	$\frac{\nu_{LT}}{E_L}$	$\frac{\nu_{TR}}{E_T}$	$\frac{\nu_{RT}}{E_R}$
Garapeira prisma	7,67	7,67	6,08	6,08	12,50	12,50
Garapeira disco	6,40	6,40	2,26	2,26	12,20	12,20
Garapeira Poliedro	5,75	5,75	2,35	2,35	5,53	5,53
Cupiúba prisma	9,80	9,80	3,44	3,44	12,10	12,10
Cupiúba disco	7,14	7,14	4,16	4,16	12,70	12,70
Cupiúba Poliedro	7,81	7,81	2,81	2,81	6,84	6,84
Eucalipto prisma	8,73	8,73	2,00	2,00	12,60	12,60
Eucalipto disco	8,91	8,91	0,89	0,89	12,50	12,50
Eucalipto Poliedro	9,29	9,29	2,85	2,85	10,50	10,50

A Tabela 4.23 mostra que a maior discrepância entre as relações obtidas do ensaio de ultrassom e as obtidas por Bodig e Jayne (1982) (Tabela 2.14) e nessa pesquisa por meio do ensaio estático é no plano LR. Esse resultado reflete os valores dos coeficientes de Poisson que nesse plano não foram equivalentes aos obtidos pelo ensaio estático para nenhuma espécie e nenhuma geometria de corpo de prova.

Verifica-se, pelas Tabelas 4.15 a 4.17, que os valores obtidos por ultrassom para o coeficiente de Poisson por Preziosa *et al.* (1981) (Tabela 2.3), Bucur e Archer (1984) (Tabela 2.4), Preziosa (1982) (Tabela 2.5) e François (1995) (Tabela 2.7) são, em geral, de mesma ordem de grandeza dos obtidos nessa pesquisa. Além disso há, como no caso dessa pesquisa, discrepâncias com os valores teóricos sugeridos por Bodig e Jayne (1982).

Da mesma forma que Bucur e Archer (1984) (Tabela 2.7), os valores mais altos (algumas vezes acima de 1,0) foram obtidos para ν_{LR} e ν_{LT} . Os valores de ν_{TL} e ν_{RL} que no ensaio estático são os menores, no ensaio de ultrassom nem sempre se comportam da mesma maneira, tanto nos dados de Bucur e Archer (1984) e Preziosa (1982) quanto nesse trabalho.

As discrepâncias entre os coeficientes de Poisson obtidos pelo ensaio estático e de ultrassom podem estar relacionadas com a consideração da ortotropia na definição da matriz de rigidez.

A Tabela 4.24 mostra as relações entre os módulos de elasticidade e os módulos de cisalhamento, obtidas no ensaio de ultrassom e de compressão estática.

Tabela 4.24. Relações médias entre parâmetros elásticos longitudinais e transversais.

	Espécie	E_L/E_T	E_R/E_T	G_{LR}/G_{RT}	G_{LT}/G_{RT}	E_L/G_{LR}
Garapeira	Prisma	8,0	1,4	3,4	2,6	7,9
	Disco	5,7	1,1	2,1	1,8	9,9
	Poliedro	5,0	1,0	2,9	2,0	7,4
	Estático	9,9	1,6	3,5	2,8	7,7
Cupiúba	Prisma	6,8	1,2	3,1	1,5	6,8
	Disco	8,3	1,5	3,4	1,9	7,1
	Poliedro	7,4	1,4	2,2	1,9	7,9
	Estático	7,5	1,2	3,0	1,4	7,0
Eucalipto	Prisma	5,9	1,6	2,9	1,5	5,7
	Disco	6,2	1,6	3,0	1,5	6,1
	Poliedro	6,8	1,3	3,1	1,6	6,8
	Estático	6,2	1,7	2,8	1,4	5,8

As relações apresentadas na Tabela 4.24 permitem verificar que há grandes diferenças entre os valores de relações sugeridas por Bodig e Jayne (1982) (item 2.3) para E_L/E_R que é de 20. No entanto, segundo os autores essas relações apresentam grandes variações entre as espécies, de forma que tais diferenças não devem representar erros de medição. Além disso, verifica-se que a ordem de grandeza das relações foi bem próxima para o ensaio estático e os ensaios de ultrassom, independente da geometria do corpo de prova. Já a relação E_L/E_T foi próxima da sugerida por Bodig e Jayne (1982) que é de 1,6.

Para as relações G_{LR}/G_{LT} , G_{LT}/G_{RT} e E_L/G_{LR} os valores dessa pesquisa foram bem menores que os sugeridos por Bodig e Jayne (1982) que são respectivamente de 10,0; 9,4 e 14,0. No entanto, da mesma forma que no caso das relações entre os módulos longitudinais, a ordem de grandeza das relações foi bem próxima para o ensaio estático e os ensaios de ultrassom, independente da geometria do corpo de prova.

Estes resultados sugerem que as anisotropias das espécies ensaiadas são menores do que o esperado por Bodig e Jayne (1982) que relatam em seu texto que a relação E_L/E_T próxima de 20 colocaria a madeira como o material mais ortotrópico conhecido pelo homem.

Mascia (1991) obteve, no ensaio de compressão estático, relações de G_{LR}/G_{LT} e G_{LT}/G_{LR} próximas de 8,0. Por outro lado, Bucur (2006) obteve, para ensaios de ultrassom em quatro espécies (Tulip tree, Oak, Beech e Douglas fir) relações G_{LR}/G_{LT} entre 2,5 e 3,0, G_{LT}/G_{LR} entre 2,0 e 2,5 e E_L/G_{LR} entre 5 e 8, valores estes que se aproximam muito dos resultados obtidos nessa pesquisa.

4.3. Avaliação do melhor ângulo para a determinação dos elementos de fora da diagonal da matriz de rigidez.

Para discutir a questão do ângulo de retirada do corpo de prova para a determinação dos parâmetros que estão fora da diagonal da matriz de rigidez, foram avaliados os erros nos cálculos dos valores de C_{12} , C_{13} e C_{23} em função das velocidades obtidas nos diferentes ângulos. Essa verificação foi realizada somente para os corpos de prova com geometria de discos multifacetados, uma vez que para as outras geometrias, o único ângulo avaliado foi o de 45°.

A Tabela 4.25 apresenta os valores dos erros para cada espécie e ângulo avaliado. As equações utilizadas no cálculo de C_{12} , C_{13} e C_{23} foram as 2.17, 2.18 e 2.19.

Os valores apresentados na Tabela 4.25 permitem verificar que o ângulo que apresentou menores erros, para todas as espécies, foi o de 45°. Bucur e Archer (1984) obtiveram valores de erros na determinação dos coeficientes de fora da diagonal da matriz de rigidez bem próximos dos obtidos nessa pesquisa. Os autores comentam que é normal que os erros sejam maiores do que os obtidos para os termos da diagonal da matriz e indicam o intervalo de 4 a 20% como o esperado para o caso dos termos de fora da diagonal. O ângulo de 45° também foi o que apresentou menores erros no caso do trabalho de Bucur e Archer (1984) No caso desses autores os erros foram de 55,77% para o ângulo de 15°, 22,03% para 30° e 11,90% para 45°.

Tabela 4.25. Erros relativos dos termos de fora da diagonal da matriz de rigidez (C_{12} , C_{13} e C_{23}) em relação ao ângulo de propagação α . Corpo de prova em disco multifacetado.

	15	30	45	60	75
Garapeira					
C_{12}	5412	4723	4920	4182	4231
Erro (%)	20	22	8	15	16
C_{13}	5270	4599	4791	4072	4120
Erro (%)	22	25	12	18	28
C_{23}	2960	2580	2691	2287	2314
Erro (%)	23	27	15	17	25
Cupiúba					
C_{12}	6580	6123	6253	6120	6100
Erro (%)	18	20	9	15	18
C_{13}	3620	3412	3501	3506	3500
Erro (%)	25	26	14	13	15
C_{23}	1670	1642	1644	1640	1639
Erro (%)	22	24	11	14	17
Eucalipto					
C_{12}	11400	11000	11347	11220	11100
Erro (%)	22	25	11	18	18
C_{13}	6200	6015	6020	6010	5998
Erro (%)	27	32	9	20	23
C_{23}	3300	3100	3143	3120	3116
Erro (%)	26	30	10	17	19

Os erros na determinação dos termos de fora da diagonal da matriz de rigidez estão associados à distorção das frentes de onda devido à orientação do corpo de prova, os quais podem ser agravados caso haja inclinação dos anéis de crescimento. Essa distorção varia para os diferentes planos de simetria. Bucur e Archer (1984) argumentam que o modelo ortotrópico para a madeira é apenas aproximadamente válido para representar seu real comportamento e que a condição real se aproximará do tratamento teórico quanto menor for o comprimento de onda em relação ao corpo de prova. Assim, para poder melhorar a precisão do ensaio sem aumentar a dimensão do corpo de prova, pelos motivos já expostos, é necessário aumentar a frequência do transdutor. Por outro lado, o aumento da frequência é limitado pelas dimensões da estrutura anatômica do material, de forma que 1 MHz parece ser a frequência mais adequada para esse ensaio. Mesmo assim, a utilização de corpos de prova de dimensões menores permitem a redução dos erros devidos aos problemas de inclinação de fibras e de anéis de crescimento.

4.4. Simulações

A Tabela 4.26 apresenta os valores médios de deformação obtidos no ensaio de compressão uniaxial, enquanto a Tabela 4.27 apresenta os resultados de deformações provenientes das simulações do ensaio de compressão uniaxial e a Tabela 4.28 as diferenças entre os resultados obtidos no ensaio de compressão e proveniente das simulações nas três condições.

Tabela 4.26. Valores médios de deformações específicas (10^{-6}) obtidas nos ensaios uniaxiais de compressão.

Tensão (MPa)	Direção L	Direção R	Direção T
Carga na direção L			
5	-346	62	87
10	-693	125	173
15	-1039	187	260
20	-1386	249	346
Carga na direção R			
5	73	-1824	1441
10	146	-3648	2882
15	219	-5472	4323
20	292	-7297	5764
Carga na direção T			
5	297	1211	-3668
10	594	2421	-7337
15	891	3632	-11005
20	1189	4842	-14674

Tabela 4.27. Valores, em módulo, de deformações (10^{-6}) obtidas em simulações de ensaios uniaxiais

Condição A			Condição B			Condição C			
Carga na direção longitudinal									
Tensão (MPa)	Direção L	Direção R	Direção T	Direção L	Direção R	Direção T	Direção L	Direção R	Direção T
5	-272	54	54	-272	101	136	-349	58	626
10	-545	109	109	-545	202	272	-697	116	1252
15	-817	163	163	-817	302	409	-1046	174	1878
20	-1089	218	218	-1089	403	545	-1395	232	2503
Carga na direção radial									
5	1089	-5447	1089	240	-3450	3649	59	-2024	1425
10	2179	-10893	2179	479	-6820	7298	117	-4049	2850
15	3268	-16340	3268	719	-10350	10948	176	-6073	4275
20	4357	-21786	4357	959	-13900	14597	235	-8097	5700
Carga na direção tangencial									
5	1089	1089	-5447	235	2875	-5447	627	1428	-4263
10	2179	2179	-10893	470	5749	-10893	1253	2856	-8525
15	3268	3268	-16340	706	8624	-16340	1880	4284	-12788
20	4357	4357	-21786	941	11498	-21786	2506	5712	-17050

Tabela 4.28. Relação entre os resultados de deformações obtidos no ensaio estático e nas simulações utilizando propriedades obtidas nas condições A, B e C.

Condição	Direção L	Direção R	Direção T	Direção L	Direção R	Direção T	Direção L	Direção R	Direção T
	Carga na direção L			Carga na direção R			Carga na direção T		
A	1,27	1,14	1,61	0,07	0,33	1,32	0,27	1,11	0,67
B	1,27	0,61	0,64	0,30	0,53	0,39	1,26	0,42	0,67
C	0,99	1,07	0,14	1,24	0,90	1,00	0,47	0,85	0,86

Os resultados da Tabela 4.28 permitem verificar que o uso de valores de propriedades tabelados para uma determinada espécie ou ainda de valores de propriedades obtidas por meio de correlações podem ocasionar erros em programas de simulação.

Alguns das relações foram maiores que 1,00 indicando que as deformações do ensaio foram superiores às previstas, se constituindo em erro contra a segurança.

Por outro lado relações muito menores que 1,00 indicam previsão de deformação muito superior à real, constituindo-se em erros contra a economia, já que levariam a superdimensionamento.

No caso do uso das propriedades obtidas por ultrassom (Condição C) também houve erros contra a segurança. Esses erros foram de 7% (Carga na direção L e deformação em R) e

de 24% (Carga na direção R e deformação em L). Tais erros são provenientes da imprecisão do cálculo dos coeficientes de Poisson bem como de imprecisões de leituras de deformações no ensaio, devido à questões já discutidas anteriormente. Verifica-se que para os deslocamentos obtidos na direção de aplicação das cargas, onde o coeficiente de Poisson não interfere no resultado, os erros foram sempre a favor da segurança e inferiores a 15%, indicando estar dentro da variabilidade do material.

No caso do uso da Condição B os erros contra a segurança foram de 26% a 27% (2 casos) e no caso da Condição A de 11% a 59% (5 casos).

Do ponto de vista do super dimensionamento a Condição C é a que apresenta as menores diferenças entre as deformações esperadas e reais.

É importante destacar que, para o caso da condição de corpos de prova os resultados dos deslocamentos são, se considerados isoladamente, pequenos, mas considerando um cálculo estrutural no todo, essas diferenças podem afetar significativamente o dimensionamento.

4.5 Custos dos ensaios

Para o cálculo de custo foi primeiramente avaliada uma situação na qual fosse necessária a montagem de um laboratório para a execução dos dois tipos de ensaio. Para esse caso, os principais custos são apresentados na Tabela 4.29

Para o ensaio de ultrassom foram considerados os custos da fonte de ultrassom e dos transdutores longitudinal e de cisalhamento (equipamento), dos cabos microdot, dos cabos coaxiais e do calibrador (periféricos) e do acoplante (material de consumo).

Para o ensaio estático de compressão foram considerados os custos da máquina de ensaios, da célula de carga e do sistema de aquisição de dados (equipamentos), dos cabos de conexão, terminais, estação de solda, sugador, pinça, alicate de corte (periféricos) e strain gage, adesivos, lixas, material de solda, acetona, e álcool isopropílico (materiais de consumo).

Tabela 4.29 Composição de custo (US\$) para montagem de infra-estrutura para ensaios de ultrassom e estático de compressão. Cotação utilizada: 1,00 US\$ = 1,70 R\$

Item	Ultrassom	Ensaio estático
Equipamentos	32.710,00	111.717,94
Periféricos	317,00	134,11
Material de consumo	11,76	1211,80
Total	33.038,76	113.063,85

Considerando uma estrutura de laboratório já montada, para a realização do ensaio estático são utilizados, por espécie, 108 strain gages; 6 corpos de prova (3 nas direções principais e 3 em ângulo) com 6 strain gages em cada um e 3 repetições). Cada cartela com 10 unidades desses strain gages tem custo de cerca de US\$ 100,00 de forma que, para cada espécie, considerando os demais acessórios – terminais, cabos e cola, o custo desse ensaio é de aproximadamente **US\$ 1.209,41**.

Para a mesma situação (infra-estrutura existente), a realização do ensaio de ultrassom teria apenas o custo do acoplante, aproximadamente US\$ 0,50.

Não estão previstos neste total, para nenhum dos ensaios, o custo da madeira nem o custo de mão de obra para confeccionar os corpos de prova.

5. CONCLUSÕES

De posse dos resultados e, considerando as bases teóricas do ensaio de ultrassom é possível tecer as seguintes conclusões:

- Os valores dos módulos de elasticidade longitudinais e de cisalhamento, utilizando-se a metodologia de ensaio por ultrassom, foram compatíveis com os obtidos nos ensaios de compressão estática.

- Os coeficientes de Poisson determinados por ultrassom apresentaram resultados discrepantes dos obtidos no ensaio de compressão estática, principalmente para os planos RL e LR. No entanto, os valores foram compatíveis com resultados obtidos por outros autores que utilizaram metodologia semelhante. Além disso, os coeficientes de Poisson determinados pelo ensaio estático também não foram compatíveis com resultados médios indicados na literatura, comprovando que a determinação do coeficiente de Poisson da madeira apresenta dificuldades qualquer que seja o método. Essa questão tem ainda que ser melhor avaliada pelos pesquisadores da área.

- Para obtenção de resultados adequados dos termos da matriz de rigidez, o corpo de prova deve ter as arestas coincidentes com os eixos de simetria e, adicionalmente, é necessário que os anéis de crescimento não apresentem inclinações na seção. Assim, a dimensão do corpo de prova deve ser adotada em função da possibilidade de atendimento dessas condições. Além disso, é imprescindível que a dimensão do corpo de prova esteja associada às dimensões do transdutor e ao comprimento de onda λ , portanto, à frequência do transdutor.

- Para a obtenção dos módulos longitudinais e de cisalhamento não houve destaque de nenhum tipo de corpo de prova. O corpo de prova prismático apresentou resultados mais coincidentes com o ensaio estático, mas foi o único no qual os ensaios de ultrassom e estático foram realizados nos mesmos corpos de prova. Nos demais casos, apesar do cuidado em tirar os corpos de prova próximos, para evitar influência da variabilidade da madeira, é certo esperar que essa variabilidade não tenha sido totalmente eliminada.

- Para a obtenção dos coeficientes de Poisson, a geometria prismática apresentou resultados mais compatíveis com os obtidos no ensaio de compressão, seguido do disco e, por último do poliedro.

- O corpo de prova que apresentou maior facilidade para confecção foi o poliedro, não tendo sido necessário o uso de equipamentos especiais, além de um único corpo de prova ser suficiente para a realização de todos os ensaios.

- Para a obtenção dos termos de fora da diagonal da matriz de rigidez pode ser adotado o ângulo de 45° , pois foi o que apresentou menores erros para todas as espécies. Os ângulos de 60° e 75° também foram adequados.

- O ensaio de ultrassom, para a determinação dos parâmetros elásticos da madeira é mais fácil e mais econômico do que o ensaio estático de compressão também passível de erros e imprecisões e os seus resultados são igualmente adequados, principalmente para a determinação dos módulos de elasticidade longitudinal e de cisalhamento.

Espera-se que a pesquisa auxilie na metodologia, baseada em ensaio não destrutivo de ultrassom, para a determinação das constantes elásticas de espécies de madeira de ocorrência no Brasil e que estes resultados permitam subsidiar norma brasileira de caracterização da madeira por ultrassom.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSOCIACÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – NBR 7190/97 - **Projeto de estruturas de madeira** 107p. Rio de Janeiro(RJ), 1997.

AZEVEDO Jr., A. P. **Avaliação não-destrutiva das propriedades mecânicas de madeira através da técnica do ultrassom.** Dissertação de mestrado, UFM, 2002.

BARTHOLOMEU, A.. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultrassom.** 105 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Na área de concentração de Construções Rurais, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2001.

BARTHOLOMEU, A.GONÇALVES, R. , BUCUR V. Dispersion of ultrasonic waves in Eucalyptus lumber as a function of the geometry of boards . **Scientia Forestalis** n. 63 p. 235-240, jun. 2003

BRASIL, M.A.M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica e das características das fibras em Eucalyptus grandis HILL EX MAIDEN ao nível do DAP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.5, p.81-90, 1972.

BODIG, J. & JAYNE, B.A. – **Mechanics of wood and wood composites** New York, Van Nostrand Reinhold, 1982. p. 419.

BUCUR, V.; FEENEY,F.(1992) Attenuation of ultrasound in solid wood. **Ultrasonics**. 30(2):76-81.

BUCUR, V.; RASOLOFOSAON, P. ; (1998). Dynamic elastic anisotropy and nonlinearity in wood and rock. **Ultrasonics** 36 :816-824.

BUCUR, V. ; ARCHER, R.R. (1984). **Elastic constants for wood by an ultrasonic method.** Wood Sci Technol 18:255-265.

BUCUR, V. PERRIN, J.P. (1988). **Ultrasonic waves-wood structure interaction.** Proc Inst Acousti Edinb 10(2):199-206.

BUCUR, V.. **Acoustics of wood.** 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2006. 393p

CHUDNOFF, M., ESLYN W.E.; McKEEVER, O.B. Decay in mine timbers. Part III. Species – Independent stress grading. **Forest Products Journal** 34(3): 43-50, 1984.

FRANÇOIS, M (1995). **Identification des symmetries materielles de materiaux anisotropies.** França, Tese de Doutorado –Universidade de Paris, 137p.

FRANÇOIS, M. (2000). Vers une mesure non destructive de la qualité des bois de lutherie. **Rev Comp Mat Avancés** 10(3) : 261-279.

FURLANI, J.E..(1995) **Um estudo sobre a variação numérica do coeficiente de Poisson na madeira, considerando a anisotropia do material.** Campinas, Tese de Mestrado –Faculdade de Engenharia Civil , Departamento de Construção Civil/ UNICAMP .

GOIA, F. R. O.; MILLER, K. P.; CANDIAN, M.; SALES, A.. Efeito do comprimento do corpo de prova na velocidade ultra-sônica em madeiras. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.1, jan./fev.2006.

GONÇALEZ et al. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultrassonoras (ultrassom). **Revista Cerne**, vol. 7, n.2, pag. 81 a 92, 2001.

HERZIG, L. (1992) **Evaluation du module d'Young de bois d'épinette par méthode ultrasonore sur carottes de sondage.** 290p., M.Sc. Thesis (Génie Forestière), Faculté de Foresterie et de Géomatique, Departement des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, Canadá,

KEUNECKE et al (2007) Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves, **Wood Sci Technol** (2007) 41,41:309-327

LASAYGUES, P.(2007) Wavelet based deconvolution method in ultrasonic tomography. **Paper...** Presented at the Internacional Congresso on Ultrasonic, Vienna, April 9-13,2007.

MASCIA, N.T. (1991) **Considerações à respeito da anisotropia na madeira.** São Carlos, *Tese de Doutorado* - Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 295p.

PREZIOSA, C; Mudry ,M.; LAUNAY, J.; GILLETTA, F.(1981). **Détermination des constantes élastiques du bois par une méthode acoustique goniométrique.** CR Acad Sci Paris 293(2):91-94.

PREZIOSA, C; (1982) **Méthode de détermination des constantes élastiques du matériau bois par utilisation des ultrasons.** Université d'Orléans (Orléans)

ROSE, J.R.; DITRI J.J.; DATTATRAYA, P.; SHUN-CHIN CHOU (1991). **One side ultrasonic inspection technique for the elastic constant determination of advanced anisotropic materials.** J Nondestructive Evaluation 10(4):159-166.

SINCLAIR, A.N., FARSHAD, M.. Comparation of Three Methods for Determining Elastic Constants of Wood. **Journal of Testing of Evaluation**, v. 15, n. 2, p. 77-86, March,(1987).

SANDOZ, J. L.(1990) **Triage et fiabilité de bois de construction**. 186p. Thèse (Doctorat em Sciences Techniques) – Departement de Génie Civil, Ecole Polytechnique Federale dee Lausanne, Lausanne, Suisse.

TRINCA, A.J.; GONÇALVES, R.. Variação da Velocidade de Propagação de Ondas de Ultrassom e Atenuação do sinal em Função da Pressão nos Transdutores. In: Encontro Brasileiro de Madeiras e de Estruturas de Madeira, 10,2006. São Pedro. **Anais...** ,2006,v. 1, p. 1-6.

TRINCA, A.J.; GONÇALVES, R. (2008) Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do **transdutor** na velocidade de propagação de ondas de ultrassom na madeira. **Revista Árvore** (no prelo).

TRINCA, A J.; GONÇALVES, R.. Efeito da Dimensão e da Frequência sobre a Determinação da Velocidade de Propagação de Ondas de Ultrassom na Madeira, **Revista Arvore**, v.33, p.177-184, (2009).

WAUBKE, N.V. (1981) **Grundsätzliche Untersuchungen zur Eignung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen als vereinfachte und genauere Methode zur Klassifikation von Bauhölzern**. 56p. Institut für Baustoffkunde and Bauphysik der Hochschule der Bundeswehr München, Deutschland.

ZIMMER, J.E. ; COST, J.R. (1970). **Determination of the elastic constants of a unidirectional fiber composite using ultrasonic velocity measurements..** J Acoust Soc Am 47 :795-803.