

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

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

DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ELÁSTICAS DA MADEIRA CONSIDERANDO
A SUA ORTOTROPIA

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Determinação das constantes elásticas da madeira considerando sua ortotropia

Rejane Costa Alves

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

Área de concentração: Sistema construtivo

Orientador: Professor Edgar V. Mantilla Carrasco

BELO HORIZONTE

Escola de Engenharia da UFMG

2017

Alves, Rejane Costa.

A474d Determinação das constantes elásticas da madeira considerando sua ortotropia [manuscrito] / Rejane Costa Alves. - 2017.

xiii, 89 f., enc.: il.

Orientador: Edgar V. Mantilla Carrasco.

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

Bibliografia: f. 81-89.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Madeira - Teses. 3. Madeira - Propriedades mecânicas - Teses. 4. Testes não destrutivos - Teses.
I. Mantilla Carrasco, Edgar Vladimiro. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

“Ninguém é tão grande que não possa aprender,
nem tão pequeno que não possa ensinar”

(Píndaro, poeta romano)

AGRADECIMENTOS

Nesses anos que se passaram aprendi que o que vale não é o ponto de partida e sim a caminhada, como diz Cora Carolina. E nessa caminhada tive a oportunidade de cruzar com muitas pessoas que jamais imaginei conhecer. Certamente foi e é uma oportunidade de aperfeiçoar minha carreira profissional e, por que não dizer, uma chance de criar laços pessoais.

Gostaria de agradecer:

E primeiro lugar a Deus, por sempre me proteger e guiar da melhor forma.

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Departamento de Engenharia de Estruturas por terem me proporcionado toda experiência nesses vários anos, disponibilizando material e suporte para a realização deste trabalho.

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

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

Aos membros da Banca Examinadora, pelos comentários e sugestões.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido e, particularmente, ao Departamento de Ciências Vegetais, pela aprovação do meu afastamento para a execução deste trabalho e por todo o apoio que recebi dos colegas de trabalho, que se tornaram amigos fiéis, dos serventuários terceirizados, das secretárias do departamento, e da própria chefia do Departamento. Minha trajetória não seria tão comprometida e prazerosa se não fosse o suporte que vocês me deram.

À UNICAMP, representada pela Faculdade de Engenharia Agrícola, por disponibilizar a utilização dos laboratórios de Materiais e Estruturas e de Ensaios Não Destrutivos, bem como, de maneira especial, às professoras Raquel Gonçalves e Cinthya Pedroso e a toda brilhante equipe a elas ligada.

À Universidade Federal do Espírito Santo, por disponibilizar a utilização do laboratório de Anatomia da Madeira, com destaque ao amigo José Geraldo, pela ajuda na preparação das lâminas.

À Universidade Federal de Lavras, por disponibilizar a utilização do laboratório de Química da Madeira.

À FAPEMIG e a CAPES, pelo auxílio para a realização deste trabalho.

Aos meus pais e avós, juntamente com toda família, por me apoiarem sempre e por serem a base da minha caminhada.

Aos amigos que a vida me proporcionou, aos colegas de pós-graduação e a todos aqueles de forma direta ou indireta colaboraram para a minha formação acadêmica e pessoal.

Finalizo meu agradecimento com a certeza de que sou parte de tudo que encontrei pelo caminho no qual descobri momentos e pessoas especiais. Obrigada aos que facilitaram meus dias com um singelo sorriso ou um simples bom dia. Também agradeço àqueles que tentaram dificultá-los, porque ajudaram a me tornar uma pessoa mais forte do que eu era há quatro anos. Tenho a clareza de que não foi sorte, sempre foi DEUS!

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT.....	xii
INTRODUÇÃO	14
A. Objetivos.....	16
A.1 Objetivo geral	16
A.2 Objetivos específicos	16
B. Justificativa	17
1.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
1.1 Determinação da matriz de rigidez	20
1.2 Método de propagação de ondas	23
1.3 Materiais ortotrópicos submetidos a elevadas temperaturas	26
2.Análise Teórica	28
2.1 Propagação de ondas	28
2.2 Constantes Elásticas	31
2.3 Medidas de deslocamento e determinação de deformações	34
2.4 Determinação das constantes elásticas.....	38
3.Material e Métodos.....	42
3.1 Determinação da umidade e densidade aparente	43
3.2 Ângulo das microfibrilas (AMF) na camada S2.....	45
3.3. Análise termogravimétrica (TG/DTG)	45
3.4 Determinação da inclinação da grã.....	45
3.5 Métodos de Propagação da onda	46
3.5.1 Propagação de ondas de excitação	46
3.5.2 Propagação de ondas ultrassônicas	49
3.6 Determinação das propriedades mecânicas através do medidor de deslocamento portátil (MD)	50
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	59

4.1 Ensaio destrutivos	59
4.2 Ensaio não destrutivos	64
4.2.1 Ensaio de compressão com utilização do medidor portátil.....	64
4.2.2 Ensaio com a propagação de ondas ultrassônicas.....	67
4.2.3 Ensaio com a propagação de ondas de excitação.....	70
4.2.4 Ensaio com a propagação de ondas de excitação sob elevadas temperaturas.....	70
CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS	81

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Coeficiente de correção 1
B	Coeficiente de correção 2
C_{iklm}	Tensor de quarto grau conhecido como tensor de constantes elásticas
i,k,l,	Índice de coordenadas, cada um de forma independente pode atingir os valores de 1, 2 ou 3
\ddot{u}_i	Aceleração linear
ρ	Densidade aparente da madeira
ω^2	Quadrado da frequência angular
δ_{im}	Tensor unitário ou delta de Kronecker
u_{0i}	Amplitude das componentes do vetor deslocamento
k	Componente do vetor de onda
u_0	Representa a amplitude do deslocamento
α_i	Cossenos diretores do vetor deslocamento da partícula
v	Velocidade de propagação da onda
c	Constante de rigidez, ou constante elástica, MPa
g	Aceleração da gravidade, assumido como 10 m.s^{-2}
c_{11}	Constante elástica na direção longitudinal (L)
c_{22}	Constante elástica na direção radial (R)
c_{33}	Constante elástica na direção tangencial (T)
c_{44}	Constante elástica na direção radial tangencial (RT)
c_{55}	Constante elástica na direção longitudinal tangencial (LT)
c_{66}	Constante elástica na direção longitudinal radial (LR)
V_{TT}	Velocidade da onda ao longo do eixo tangencial (T)
V_{RR}	Velocidade da onda ao longo do eixo radial (R)
V_{LL}	Velocidade da onda ao longo do eixo longitudinal (L)
V_{LR}	Velocidade da onda de cisalhamento com eixo LR = RL
V_{LT}	Velocidade da onda de cisalhamento com eixo LT = TL
V_{RT}	Velocidade da onda de cisalhamento com eixo RT = TR

E_R	Módulo de elasticidade ao longo do eixo Radial
E_T	Módulo de elasticidade ao longo do eixo Tangencial
E_L	Módulo de elasticidade ao longo do eixo Longitudinal
G_{TL}	Módulo de deformação transversal no plano Tangencial Longitudinal
G_{LR}	Módulo de deformação transversal no plano Longitudinal Radial
G_{RT}	Módulo de deformação transversal no plano Radial Tangencial
ε_L	Deformação na direção L
ε_R	Deformação na direção R
ε_T	Deformação na direção T
σ	Tensão normal
τ	Tensão de cisalhamento
ν_{RL}	coeficiente de Poisson correspondente aos eixos RL
ν_{LR}	coeficiente de Poisson correspondente aos eixos LR
ν_{TL}	coeficiente de Poisson correspondente aos eixos TL
ν_{LT}	coeficiente de Poisson correspondente aos eixos LT
ν_{RT}	coeficiente de Poisson correspondente aos eixos RT
ν_{TR}	coeficiente de Poisson correspondente aos eixos TR
δ_x	Variação da dimensão x
ε_φ	Deformação encontrada na direção φ
δ_L	Variação da dimensão L
γ_{xy}	Distorção no plano xy
E_Y	Módulo de elasticidade na direção Y
σ_Y	Tensão normal aplicada na direção Y
ε_1	Deformação ocorrida na direção 1, radial às fibras
ε_2	Deformação ocorrida na direção 2, tangencial às fibras
ε_3	Deformação ocorrida na direção 3, longitudinal às fibras.
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
MD	Medidor de Deslocamento

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de carga com CP de compressão.....	34
	Esquema de deslocamentos em um MD (a) direção X; (b) direção	
Figura 2.2	Y; (c) Resultante.....	35
Figura 2.3	Roseta trevo.....	38
Figura 2.4	Esquema de carga do CP compressão.....	38
Figura 2.5	Posição dos 6 medidores de deslocamento.....	40
	Posições para a retirada de CPs para determinação de todas as	
Figura 2.6	constantes elásticas da madeira.....	41
	Posições para a retirada de CPs de ensaio de compressão, buscando	
	a determinação de todas as constantes elásticas da	
Figura 3.1	madeira.....	43
	Corpo de prova de angelim pedra usado para medição do ângulo da	
Figura 3.2	grã e riscador usado para medição do ângulo da grã.....	46
Figura 3.3	Ensaio utilizando o método de propagação de ondas de excitação	47
	Posicionamento dos CPs para obtenção dos modos (A) flexional e	
Figura 3.4	(B) torcional.....	48
	Corpo de Prova utilizado no ensaio de propagação de ondas	
Figura 3.5	ultrassônicas.....	50
Figura 3.6	Dimensões do mecanismo de deslocamento portátil.....	51
	Extensômetros elétricos colados formando o medidor de	
Figura 3.7	deslocamento.....	51
Figura 3.8	Ligação dos extensômetros em ponte completa de Wheatstone...	52
Figura 3.9	Plugs de rede fixos no SAD (Sistema de Aquisição de Dados)....	52
Figura 3.10	Dispositivo de calibração.....	53
	Medidores de deslocamento portátil instalados em fases opostas do	
Figura 3.11	CP.....	53
	Relação tensão-deformação para a madeira Angelim vermelho na	
Figura 3.12	direção longitudinal às fibras.....	54

	Corpos de Prova ensaiados à compressão com utilização do medidor portátil. (A) CP submetido à carga P orientado na direção longitudinal e (B) CP inclinado a 45°.....	55
Figura 3.13	Valores médios de densidade aparente a 12 % de umidade para as 7 espécies.....	60
Figura 4.1	Resultados das análises termogravimétricas das madeiras.....	64
Figura 4.2	Exemplos dos resultados do ensaio de compressão da madeira Angelim vermelho com a utilização do medidor portátil. (A) Módulo de elasticidade longitudinal. (B) Módulo de elasticidade transversal. (C) Coeficiente de Poisson Longitudinal Tangencial. (D) Coeficiente de Poisson Longitudinal Radial.....	65
Figura 4.3	Valores resultantes do ensaio de tensão Sonelastic. (A) Módulo de elasticidade longitudinal. (B) Módulo de elasticidade transversal.....	73
Figura 4.4	Valores resultantes do ensaio de tensão Sonelastic submetido à elevada temperatura.....	75
Figura 4.5	Variação do módulo de elasticidade longitudinal e da massa do CP com o acréscimo de temperatura.....	76
Figura 4.6		

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Corpo de prova e correspondente constante elásticas	41
Tabela 3.1	Corpo de prova orientado e constantes elásticas.....	57
Tabela 4.1	Valores médios de densidade aparente a 12% de umidade, ângulo da grã, ângulo microfibrilar e módulos de elasticidade nas três direções ortogonais para as madeiras de sete espécies.....	61
Tabela 4.2	Valores médios dos módulos de elasticidade determinados através dos métodos convencional e proposto.....	66
Tabela 4.3	Valores médios das constantes elásticas resultantes do ensaio de compressão da madeira Angelim vermelho (AV), Garapa (G) e Roxinho (R) com uso de medidor portátil.....	66
Tabela 4.4	Valores dos parâmetros elásticos determinados para a madeira Garapa comparados aos resultados encontrados por Gonçalves <i>et al</i> (2014).....	68
Tabela 4.5	Valores médios das constantes elásticas resultantes do ensaio de ultrassom para seis madeiras estudadas (exceto muiracatiara).....	69
Tabela 4.6	Valores médios dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal resultantes do ensaio de ondas de excitação para seis madeiras estudadas.....	72

RESUMO

Corroborando com a atual e importante ampliação dos parques estudos sobre madeira tropical, o objetivo desta pesquisa é o de determinar as constantes elásticas do material de sete espécies de madeira tropical, matriz de flexibilidade, tanto em temperatura ambiente como em altas temperaturas, realizando ensaios destrutivos e não destrutivos. Como a madeira é um material ortotrópico, foi necessário determinar três módulos de elasticidade, três módulos de deformação transversal e seis coeficientes de Poisson. As constantes elásticas foram determinadas através de dois métodos: o de propagação de ondas ultrassônicas e o de ondas de excitação e, para a validação dos resultados, foram realizados ensaios destrutivos seguindo as prescrições da NBR 7190/97. Os corpos de prova foram confeccionados, com a orientação das fibras em seis direções: as três principais, radial, tangencial e longitudinal; e as três intermediárias, longitudinal-radial (45°), longitudinal-tangencial (45°) e radial-tangencial (45°). Também foi desenvolvido um medidor de deslocamento portátil, descaracterizando o aspecto destrutivo do método, além de ter propiciado economia de tempo e de recursos. As espécies utilizadas foram: *Hymenolobium petraeum*, *Dinizia excelsa*, *Bertholletia excelsa*, *Apuleia leiocarpa*, *Astronium lecointei*, *Caryocar villosum* e *Peltogyne discolor*, com densidades variadas no intervalo de 650 a 1150 kg/m³. A utilização de dois métodos não destrutivos permitiu definir qual deles é o mais eficiente para estimar as constantes elásticas da madeira em temperatura ambiente. Para explicar algumas peculiaridades, foi necessário realizar ensaios para a determinação da inclinação da grã e do ângulo microfibrilar da madeira. A determinação das constantes elásticas em altas temperaturas através de ensaios não destrutivos foi feita apenas com ondas de excitação. Para explicar o comportamento destas constantes em altas temperaturas foi realizado o ensaio termogravimétrico da madeira. Os resultados permitiram concluir: a) que o ensaio de compressão com a utilização do medidor de deslocamento portátil foi capaz de determinar os valores dos módulos de elasticidade longitudinais (E), dos módulos de elasticidade transversais (G) e os coeficientes de Poisson; b) que com a utilização de propagação de ondas ultrassônicas, foi possível determinar todas as constantes elásticas, mas que, no entanto, foi percebida a carência de estudos de Coeficientes de Poisson para madeiras tropicais; c) que o método de propagação de ondas de excitação possibilitou a determinação do E (valores dos módulos de elasticidade longitudinais) e do G (valores dos módulos de elasticidade transversais). Quanto à determinação destas constantes submetidas a elevadas temperaturas, o método de propagação de onda de excitação determinou com precisão apenas o E (valores dos módulos de elasticidade longitudinais). Que o banco de dados criado a partir dessa pesquisa possa ser ampliado por novos estudos e disponibilizado aos interessados traduz o desejo da autora.

Palavras chave: Ensaios não destrutivos, madeira, propriedades elásticas, caracterização mecânica.

ABSTRACT:

Corroborating with the current and important the studies on the tropical wood, this research aimed to present a constitutive law of the material of seven species of tropical wood, by Matrix of Constants Elastic, both at ambient and at high temperatures, performing non-destructive tests. As the wood is an orthotropic material, three modules of elasticity, three module of transverse deformation and six Poisson ratio. The constants were determined by two methods: ultrasonic wave propagation and stress wave, to the results destructive tests, were carried following the NBR 7190/97. Tests specimens were made, with the fiber direction in six directions: three mains, radial, tangential and longitudinal; and three intermediates, longitudinal-radial, longitudinal-tangential e radial-tangential. A portable displacement meter was also developed, decharacterizing the destructive aspect from the method, besides the time and funds saving. The species were used are *Hymenolobium petraeum*, *Dinizia excelsa*, *Bertholletia excelsa*, *Apuleia leiocarpa*, *Astronium lecointei*, *Caryocar villosum* e *Peltogyne discolor* with densities ranging from 650 to 1150kg/m³. The use of two nondestructive methods allowed to define which one is the most efficient to determine the elasticity constants at ambient temperature. Nevertheless, to explain some peculiarities, it was necessary to perform tests to determine the wood grain and microfibrillar angle. The elastics constant determination at high temperature through the nondestructive test were performed only with stress waves. To explain the constants behavior at a high temperature it was performed the wood thermogravimetric analyses. The results allowed to conclude: a) the compression test using the portable displacement meter was capable of determining the values of the longitudinal elasticity modules (E), the transversal elasticity modules (G) and also the Poisson ratio; b) with the ultrasonic waves propagation method it was possible to determine all the elastic constant, however, it was observed a lack of studies about the Poisson rates for neotropical woods; c) the stress waves method helped to determine the E (values of the longitudinal elasticity) and of G (values of transversal elasticity). To determine those constants on high temperature, the stress wave method only did with precision the E (values of the longitudinal elasticity). The database created from this study can be expanded with new studies and made available to interested parties, reflecting the author's desire.

Keywords: nondestructive tests, wood, elastic proprieties, mechanical characterization

INTRODUÇÃO

Caso se olhe em volta de si mesmo, não há a menor dificuldade para perceber o tanto que se está cercado por objetos e estruturas advindas da madeira como matéria prima. Da simples folha de papel ao foguete interestelar é possível apontar a presença desse material. Isso, certamente justifica os estudos científicos sobre sua estrutura, para que se adeque e otimize tanto o seu uso quanto a sua preservação.

A madeira é constituída por fibras orientadas longitudinalmente ao eixo de crescimento da espécie, formando anéis concêntricos depositados ao longo da vida da árvore. Como resultados dessa sobreposição, são formadas várias direções de orientações distintas, sendo as principais: a direção longitudinal, a radial e a tangencial (BODIG e JAYNE, 1982). Em função dessa desorientação das fibras, a madeira é conhecida como material anisotrópico, cujas propriedades variam de acordo com a direção. Daí a importância de se conhecer o comportamento da madeira em suas direções, uma vez que possuem comportamentos físicos e mecânicos diferentes (SOTANDE *et al*, 2010 e ZIHERL *et al*, 2010).

A devastação das florestas fez surgir a preocupação com a utilização de madeiras corretamente caracterizadas e, por consequência, tem sido necessário desenvolver métodos e análises mais rápidos e que gerem menos perdas. Nesse contexto, têm-se introduzidos os métodos não destrutivos para avaliação desse material.

O estudo do princípio de propagação da onda aplicável a materiais ortotrópicos teve início em 1880, com o desenvolvimento da equação de Christoffel (BUCUR, 1984) e, cerca de um século depois, foram iniciados os estudos para a caracterização física e mecânica da madeira (STANGERLIN *et al*, 2010). Autores como Bolza e Kloot (1963), Kennedy (1965), Bodig e Godmann (1972), Curry e Tory (1976), Warren (1979) e Atherton (1980) foram grandes estimuladores da percepção sobre a importância da técnica de propagação de ondas acústicas para estimar as propriedades da madeira.

Apesar dos anos decorridos, ainda hoje há divergência de opinião a respeito da avaliação do módulo de elasticidade da madeira por meio de propagação de ondas. Alguns autores, como

Steiger (1997), Ross *et al.* (1998), Gonçalves e Bartholomeu (2000) utilizaram o módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) como resposta à relação entre a velocidade de propagação da onda e a densidade da madeira (Eq. Christoffel), fazendo uma aproximação da equação, sem levar em consideração as várias influências dos Coeficientes de Poisson dos módulos de deformação transversais. Outros estudiosos, como Bucur (1983), Sandoz (1989), Bartholomeu *et al.* (2003) e Gonçalves *et al.* (2011) chamam o produto da equação de Christoffel de constante elástica. Eles afirmam que, para ser considerada como E_{din} , é necessário ser levada em consideração uma série de outros fatores, como por exemplo, os coeficientes de Poisson. Vale destacar que, nesta pesquisa, a autora utiliza a nomenclatura “constantes elásticas (c)”.

Alguns trabalhos mais recentes foram realizados na tentativa de explorar o princípio de propagação da onda, para estimar algumas propriedades da madeira. Na maioria das vezes, as constantes elásticas foram determinadas em suas três direções principais. Entretanto, esta pesquisa amplia o espectro e investiga as constantes elásticas para um material ortotrópico (nove constantes elásticas).

Ainda para se definir a matriz de flexibilidade da madeira, a literatura apresenta a técnica de propagação de somente ondas ultrassônicas. Porém, esta investigação se diferencia do que já foi posto, utilizando também a propagação de ondas de excitação ou tensão.

Nos registros da literatura, para se determinar a matriz de flexibilidade das madeiras, é utilizado o emprego de extensômetros colados em cada um dos Corpos de Pesquisas, neste trabalho registrado como CPs. Por ser esta uma prática que gera desperdício de tempo e de recursos, esta tese apresenta uma inovação na forma de pesquisa, relativa a esse processo.

Essas inovações estão mais bem explicadas na Justificativa e ao longo de toda esta apresentação. Aliás, vale explicitar a estrutura desse trabalho, como guia de orientação aos seus leitores.

Esta tese está organizada em Introdução, quatro capítulos, a Conclusão e as Referências. Detalhando melhor:

A Introdução, esta em que se encontra agora o leitor, é constituída por uma breve abordagem sobre os estudos desenvolvidos sobre a madeira, além dos objetivos a serem alcançados e da justificativa da pesquisa que também pontua seus diferenciais.

O Capítulo 1 apresenta a Revisão Bibliográfica acerca do tema do trabalho: os conceitos de determinação da matriz de rigidez, do método de propagação de ondas e materiais ortotrópicos, submetidos às elevadas temperaturas.

O Capítulo 2 apresenta a Análise Teórica para o desenvolvimento da pesquisa, no qual foram apresentados os tópicos de propagação de ondas, das constantes elásticas e das medidas de deformações.

O Capítulo 3 apresenta o Material e os Métodos empregados no trabalho.

O Capítulo 4 apresenta os Resultados e Discussões desses dados.

Fechando o trabalho apresentam-se, objetivamente, as Conclusões obtidas por meio da pesquisa.

Ao final, as Referências utilizadas para a realização das investigações.

A. Objetivos

A.1 Objetivo geral

Determinar as constantes elásticas do material de sete espécies de madeira tropical, em temperaturas ambiente e elevada, realizando ensaios mecânicos e não destrutivos e considerando-as material ortotrópico.

A.2 Objetivos específicos

- Estudar a madeira de cada espécie escolhida quanto ao ângulo microfibrilar e grã;
- Desenvolver um medidor de deslocamento portátil para ser utilizado no ensaio de compressão;

- Determinar a matriz das constantes elásticas de cada espécie selecionada, através de ensaios de compressão;
- Estimar a matriz das constantes elásticas de cada espécie que compõe o *corpus*, através de ensaios não destrutivos (por propagação de ondas ultrassônicas e de excitação);
- Estimar a matriz de constantes elásticas da madeira angelim vermelho, através de ensaios não destrutivos, sob elevadas temperaturas;
- Correlacionar os valores das constantes elásticas determinadas através de ensaios não destrutivos e sob elevadas temperaturas com a análise termogravimétrica das madeiras selecionadas no *corpus*.

B. Justificativa

Em virtude da falta de conhecimento dos valores das constantes elásticas das madeiras brasileiras na literatura, essa pesquisa visa colaborar com esse vácuo de informação científica, fato que justifica todo o esforço empenhado. Para a realização desse propósito, foram utilizadas sete espécies de madeiras tropicais, contidas no intervalo de média à alta densidade, sendo elas: *Hymenolobium petraeum*, *Dinizia excelsa*, *Bertholletia excelsa*, *Apuleia leiocarpa*, *Astronium lecointe*, *Caryocar villosum* e *Peltogyne discolor*, com densidades variadas no intervalo de 650 a 1150 kg/m³. Tal escolha se deveu em razão de as espécies serem usadas com frequência na engenharia civil, bem como por elas se inserirem no intervalo de densidade descrito.

Em relação aos ensaios destrutivos, nesta tese foram realizados exames de CPs orientados nas seis direções: as três principais (radial, tangencial e longitudinal) e as três intermediárias (longitudinal radial, longitudinal tangencial e radial tangencial). Vale ressaltar que a maioria dos trabalhos voltados para as madeiras brasileiras são realizados apenas com as madeiras orientadas nas três direções principais. E, quando eventualmente se amplia a pesquisa para a caracterização das madeiras utilizando seis direções, utilizam-se poucas repetições por espécie. Ao contrário disso, nessa investigação foi tomado o cuidado de se fazer, no mínimo, seis repetições, com a finalidade de determinar os valores característicos de cálculo dessas propriedades. Tais dados não foram encontrados disponíveis na literatura, até a realização dessa pesquisa.

Para esse tipo de investigação, na maioria das vezes são utilizados extensômetros colados nos CPs, para que se determinem as propriedades elásticas da madeira. No entanto, sua utilização gera alto custo e muito gasto de tempo, fato superado por esta pesquisa. Explica-se: a) a pesquisa tem como *corpus* sete espécies de madeira; b) de cada espécie trabalhou-se com 7 vigas; c) cada viga foi subdividida em 6 CPs para a verificação de 6 direções, portanto para cada espécie obteve-se um total de 42 CPs; d) pelo uso tradicional seriam necessários 6 extensômetros em cada um dos 42 CPs, totalizando 252 extensômetros por espécie, isto é, em torno de 1.764 para toda a pesquisa. Um custo financeiro alto, um grande tempo gasto na colagem de cada um deles e, ainda, a não-reutilização tanto do CP quanto dos extensômetros. Por essa razão, foi desenvolvido um medidor portátil, com o dispositivo sendo calibrado para garantir eficiência na medição, tornando-o capaz de medir com precisão de 0,001 mm; exatidão suficiente para determinar as deformações na direção longitudinal às fibras e na direção normal delas.

Em relação aos ensaios não destrutivos, outro diferencial deste trabalho foi a utilização não apenas do método de propagação de ondas ultrassônicas, mas também de ondas de excitação. O objetivo dessa estratégia de pesquisa foi o de determinar as constantes elásticas utilizando a equação de Christoffel e, também, tornar possível, por meio de comparação, definir qual método foi o mais eficiente para a caracterização elástica da madeira.

As caracterizações elásticas das madeiras brasileiras, já realizadas, foram feitas, em sua totalidade, sob temperatura ambiente. Esta pesquisa buscou atender, pois, a necessidade de essa caracterização ser feita até a temperatura de 230°C; grandeza na qual a madeira já está carbonizada. Para entender o comportamento da madeira até essa temperatura foi realizado o ensaio termogravimétrico da madeira.

Pretendeu-se ainda conhecer o comportamento de propagação das ondas nas madeiras ensaiadas, e ainda os possíveis fatores que as influenciam, como a inclinação da grã e o ângulo microfibrilar nas fibras.

Com base nos resultados encontrados por meio da pesquisa aqui descrita, foi possível ter conhecimento da propagação da onda nas madeiras brasileiras e dos valores característicos das suas constantes elásticas, o que não está disponível na literatura brasileira, ainda. Com a

metodologia desenvolvida foi possível expandir essas caracterizações para outras espécies brasileiras, gerando, assim, um banco de dados das características de algumas árvores tropicais.

Para dar continuidade à apresentação da pesquisa em si, é necessário referenciar, como já previsto, a base teórica em que foi apoiada esta investigação, fato explicitado a seguir, no Capítulo 1 desta tese.

1.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Determinação da matriz de flexibilidade

Anisotropia é a característica de um meio ou de um material cujas certas propriedades físicas são diferentes conforme as variações de direção. Atribuída à madeira, por esta apresentar variação em resposta à direção em que a tensão é aplicada, esse comportamento é justificado pela organização de sua estrutura interna (BUCUR, 2006), lembrando que a estrutura pode ser, por exemplo, a orientação das fibras.

Mascia e Vanalli (2012) dizem que materiais anisotrópicos não apresentam simetria elástica, razão de ser necessário representar as diferenças nas propriedades mecânicas em direções diferentes, o que torna o estudo destes sólidos mais complexo do que o estudo de sólidos que possuem isotropia. Destacam ainda que, se em uma estrutura anisotrópica aparece algum tipo de simetria, suas propriedades de elasticidade também indicam tal simetria, e assim a Lei de Hooke pode ser simplificada.

Na tentativa de diminuir as constantes de engenharia, tem-se considerado a madeira como um material ortotrópico (SLYKER, 1972); (BODIG e JAYNE, 1982); (GARAB *et al.*, 2010); (MASCIA e VANALLI, 2012) (KOHLHAUSER e HELLMICH, 2012) e (MASCIA e NICOLAS, 2013). Dessa forma, suas constantes elásticas se reduzem a doze: três módulos de elasticidade (E_L , E_T , e E_R), três de módulos de cisalhamento (G_{RT} , G_{TL} , e G_{RL}), e seis Coeficientes de Poisson (γ_{LR} , γ_{LT} , γ_{RT} , γ_{RL} , γ_{TR} e γ_{TL}) (BODIG e JAYNE, 1982); (BUCUR, 2006); (GONÇALVES *et al.*, 2014) e (VÁZQUEZ *et al.*, 2015).

A análise de desempenho de qualquer componente estrutural requer o conhecimento das propriedades elásticas do material que o constitui. No caso da madeira, assim como para todos os materiais ortotrópicos, não é uma tarefa simples determinar as verdadeiras relações tensão-deformação, incluindo as tensões de ruptura (MORAIS, 2000). Muitos critérios de resistência que existem apresentam restrições em materiais heterogêneos e anisotrópicos, com propriedades de elasticidade e de resistência direcionais, como a madeira (NICOLAS *et al.*, 2009). Portanto, para caracterizar o comportamento mecânico da madeira é necessário conhecer suas relações tensão-deformação no referencial LRT (longitudinal, radial, tangencial), por meio de ensaios mecânicos com a utilização de extensômetros (MORAIS, 2000).

Os primeiros ensaios com o objetivo de analisar a relação entre a tensão e a deformação em madeiras, foram realizados por Galileu, em 1638 e Hooke, em 1678 (BALLARIN e NOGUEIRA, 2003). Slyker (1972) comenta em seu trabalho que a determinação dos valores de coeficiente de Poisson das madeiras já estavam sendo estudadas por Doyle *et al.* em 1945, e por Walker e Dale em 1963. Ainda autores como Shamov (1965), Schniewind e Barrett (1972) e Bodig e Jayne (1982) já discutiam sobre o comportamento viscoelastoplástico da madeira.

Na década de 1970, Slyker (1972) determinou os coeficientes de Poisson e os módulos de elasticidade para a espécie florestal *Pinus lambertiana Douglas* em um plano definido, melhor especificando, paralelo e perpendicular às fibras. No decorrer dos anos, outros trabalhos foram desenvolvidos com o mesmo objetivo, dentre eles os de Jakiela *et al.* (2008); Garrido (2003); Bindz e Samson (1995) e Blomberg e Persson (2007).

Cabrero *et al.* (2010) determinaram a matriz de flexibilidade para uma placa de madeira laminada colada, fina, submetida a pequenas deformações. Diaz *et al.* (2011) desenvolveram um medidor portátil, como alternativa para máquinas convencionais de ensaio universal, com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade de materiais plásticos e materiais compósitos.

Mascia e Nicolas (2013) determinaram o coeficiente de Poisson da espécie de madeira tropical *Goupia glabra*, por meio de ensaio de compressão com a utilização de extensômetros elétricos. Os autores compararam este ensaio com um modelo elástico, e as diferenças entre as médias de valores teóricos e experimentais estavam no intervalo de 2-15%, exceto para um ângulo de 75° (plano de LT) e para o ângulo de 90° (para ambos os planos).

Mascia (1991) determinou os valores de coeficiente de Poisson para quatro espécies florestais, dentre elas Guapuruvu (*Schizolobium parahyba*), Ipê (*Tabebuia* sp), Angico (*Piptadenia excelsa*) e Pinus (*Pinus caribaea* var. *Bahamensis*).

Bolza e Kloot (1983) afirmam que as propriedades elásticas são descritas por três constantes: o módulo de elasticidade longitudinal (E), o módulo de deformação transversal (G) e o coeficiente de Poisson (ν). Como a madeira é um material ortotrópico, as propriedades de elasticidade variam de acordo com a direção das fibras em relação à direção da aplicação da força. A Norma Brasileira NBR 7190 (1997) não traz nenhuma especificação a respeito dos valores dos coeficientes de Poisson para a madeira e apenas apresenta a relação $G = E/20$.

Naruse (2003), em ensaios de flexão, utilizou extensômetros elétricos no centro das regiões de cisalhamento para medir os módulos de deformação transversal nos planos radial e tangencial de peças de madeira de Buna (*Fagus crenata* Blume), comprovando assim a eficiência do método.

Ozyhar *et al.* (2013) estudaram o comportamento viscoelastoplástico da madeira de faia, por meio do ensaio de compressão e tração. A evolução da tensão e deformação no tempo, nas direções longitudinal e normal à grã, foram capturadas usando a técnica de correlação digital da imagem (DIC).

O Coeficiente de Poisson em madeiras é influenciado por alguns fatores. Reiterer e Stanzl-Tschegg (2001) avaliaram a influência de diferentes orientações de grã na madeira de *Picea abies*, sob ensaio de compressão. Assim como esperado, a orientação das fibras não influenciou apenas nos resultados do módulo de elasticidade, mas, também, no coeficiente de Poisson. Outrossim, Yamamoto e Kojima (2002) e Qing e Mishnaevsky (2010) estudaram a influência da anatomia microscópica no comportamento elástico da madeira.

Alguns autores avaliaram a influência da umidade no coeficiente de Poisson, dentre eles, autores como: Kretschmann e Green (1996), Hering *et al.* (2012) e Ozyhar *et al.*, (2013). Mizutani e Ando (2015) determinaram a influência do teor de umidade no coeficiente de Poisson das madeiras, *Chamaecyparis obtusa* Siebold & Zucc Endl. e *Magnolia obovata* Thunb. Para isso, foram realizados ensaios de compressão em CPs sob umidades variando de saturadas a completamente secas. A partir disso, foi possível concluir que há uma diminuição

dos coeficientes de Poisson com o aumento da umidade em níveis abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF). No entanto, quando em níveis acima do PSF, esse comportamento se inverte.

Keunecke *et al.* (2008) determinaram o comportamento elástico de duas madeiras de coníferas teixo (*Taxus baccata*) e abeto (*Picea abies*). Para isso, as madeiras foram ensaiadas à tração, utilizando a máquina universal de ensaios e o método de correlação de imagens digitais (DIC). Dessa maneira, foi possível comparar os resultados das duas madeiras e, com base nos resultados, concluíram que a madeira de teixo teve comportamento menos anisotrópico que a madeira de abeto. Sebera *et al.* (2014) também determinaram o coeficiente de Poisson em MDF (*medium density fiberboard*) utilizando o DIC.

Taniguchi *et al.* (2010) e Ando *et al.* (2013) determinaram o comportamento viscoelastoplástico tridimensional da espécie de madeira *Chamaecyparis obtusa*, através de ensaio de tração em CPs orientados nas três direções principais: longitudinal, tangencial, e radial às fibras.

Ballarin e Nogueira (2003) afirmaram que, para a maioria das espécies de madeiras comerciais americanas, os parâmetros elásticos já estão disponíveis em bancos de dados e se encontram tabelados em termos de valores médios. No entanto, em virtude da diversidade de espécies comercializadas no Brasil, poucos são os valores disponíveis referentes a estes parâmetros, sendo o mais frequente somente o módulo de elasticidade na direção paralela às fibras.

Diante dessa exposição, é fácil concluir que são relevantes os estudos sobre a madeira típica de floresta tropical. Decorre disso, sobretudo, a necessidade de se empreender pesquisas que objetivam ampliar os bancos de dados sobre essas espécies, tão presentes e, conseqüentemente, tão utilizadas no Brasil.

1.2 Método de propagação de ondas

O estudo do princípio de propagação da onda aplicável a materiais ortotrópicos teve início em 1880, com o desenvolvimento da Equação de Christoffel (BUCUR, 1984). Cerca de um século depois, foram iniciados novos estudos visando à caracterização física e mecânica da madeira (STANGERLIN *et al.*, 2010).

Com a tomada de consciência ecológica, os métodos não destrutivos de avaliação de madeira têm sido amplamente utilizados no mundo. Trabalhos como de Bolza e Kloot (1963); Kennedy

(1965); Bodig e Godmann (1972); Atherton (1980); Bucur (1984) e François (1995) já contribuía para a técnica de propagação de ondas acústicas, com o objetivo de estimar as propriedades da madeira. Atualmente, este método é amplamente estudado por diversos autores, como: Bucur (2006); Sasaki e Hasegawa (2007); Stangerlin *et al.* (2010); Teder *et al.* (2012); Ozyhar *et al.* (2013), Alves *et al.* (2014), Riggio *et al.* (2014), Gonçalves *et al.* (2014); Nocetti *et al.* (2015) e Vázquez *et al.* (2015).

Feio e Lourenço (2005) afirmam que, dentre muitos métodos e técnicas de ensaios, os métodos não destrutivos têm ganhado especial interesse. Afirmam ainda que eles podem ser divididos em dois grandes grupos: métodos globais de ensaio (GTM) e métodos locais de ensaio (LTM). Aos primeiros estão incluídos os métodos de propagação de ondas de excitação (acústicas) e ultrassônicas, especialmente de interesse nesta pesquisa ora apresentada.

De acordo com Bucur (2006), o desenvolvimento de técnicas de ultrassom para a determinação das constantes elásticas da madeira foi divulgado no Reino Unido, na década de 1960 e, a partir desse período, esses ensaios foram difundidos em todo o mundo. Estudiosos como Bodig e Goodman (1972), Bolza e Kloot (1963), Kennedy (1965), Atherton (1980), Curry (1976), Bucur (1984) e Warren (1979) contribuíram para a consciência da importância da técnica de propagação de ondas acústicas para avaliação de madeira. Vale ilustrar que, quando da utilização de ondas acústicas com frequências maiores que 20 kHz, são utilizados métodos de ultrassom que utilizam um cristal de quartzo. Este converte corrente elétrica em ondas oscilatórias.

Bucur (1984) cita em seu trabalho que os principais tipos de ondas utilizados para caracterizar propriedades da madeira são as ondas de volume e de superfície. Stangerlin *et al.* (2008), por sua vez, mencionam que as ondas transversais e longitudinais se enquadram entre as ondas de volume. Ressaltam que as ondas transversais apresentam vibração das partículas na direção perpendicular à de propagação da onda e, nas ondas longitudinais, as partículas do meio se propagam na mesma direção de propagação da onda. Quanto às ondas de superfície, afirmam que estas podem ser Rayleigh e Love, que apresentam movimento elíptico e que ocorrem, exclusivamente, na superfície dos sólidos.

Stangerlin *et al.* (2010) avaliaram os tipos de ondas geradas por dois modelos de transdutores, utilizados para a determinação das constantes elásticas, por meio de ensaios com ultrassom e

as correlacionaram ao módulo de elasticidade estático, obtido por compressão paralela às fibras. Concluíram que: a) as ondas longitudinais geradas pelos transdutores de faces planas são mais sensíveis às diferenças da região da medula à casca; b) a constante elástica dinâmica, obtida pelo uso da onda longitudinal, apresenta boa correlação com o módulo de elasticidade à compressão paralela e c) apesar dos transdutores exponenciais serem mais práticos, geram ondas de superfície que apresentam baixa velocidade de propagação e, conseqüentemente, baixa constante elástica dinâmica.

Feio *et al.* (2004) determinaram parâmetros que descrevem o comportamento linear de madeiras de castanheira, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e, ainda, a resistência à compressão perpendicular à grã, por meio da leitura da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

Bucur (1983) já determinou a matriz de constantes elásticas (matriz de rigidez) em nove árvores de *Fagus sylvatica L.*, com idade de 200 anos, a partir do método de propagação de ondas ultrassônicas. A validação do método foi testada por meio da comparação com os resultados do ensaio à flexão estática. Concluiu que as constantes elásticas são susceptíveis a variações localizadas na árvore. No Brasil, são poucos os estudos que determinam a matriz de constantes elásticas de madeiras com média e alta densidade.

Dahmen *et al.* (2010) determinaram as constantes elásticas da madeira de oliveira. Para isso, foi utilizada uma combinação de ondas do tipo Lamb com ondas volumétricas ultrassônicas. Como resultados obtiveram toda a matriz de constantes elásticas. Por sua vez, Ozyhar *et al.* (2013) e Longo *et al.* (2012) também obtiveram as constantes elásticas da espécie *Fagus sylvatica* com a utilização do método de propagação de ondas ultrassônicas. Já Vázquez *et al.* (2015) analisaram as propriedades mecânicas da espécie *Castanea sativa*, usando um método de onda ultrassônica. Os resultados foram comparados com os obtidos através de ensaios estáticos de compressão e flexão e, assim, concluíram que o uso de ondas ultrassônicas é um poderoso método para a determinação das constantes elásticas de madeira, bem como que são necessários futuros estudos, para melhorar os resultados de determinação do coeficiente de Poisson por métodos não destrutivos.

Mouridi *et al.* (2011) determinaram a matriz de rigidez da espécie *Tetraclinis articulata* com a utilização de propagação de ondas ultrassônicas, em amostras esféricas e obtiveram resultados compatíveis com os da literatura.

Ainda na década de 1980, Bucur (1983) já estudava o motivo das diferenças entre G_{LT} e G_{TL} , G_{LR} e G_{RL} , G_{RT} e G_{TR} . Ela concluiu que um dos fatores que ajuda a explicar esse comportamento é a anatomia microscópica da madeira. A propagação da onda em CPs de madeira, com as fibras orientadas na direção longitudinal, é parcialmente influenciada pelos elementos anatômicos situados perpendicularmente à direção das fibras, tais como os raios (BUCUR e BOHNKE, 1994). Calegari *et al.* (2007) também confirmaram a necessidade de estudos que avaliassem os parâmetros que afetam a velocidade das ondas. Inserem-se nesses parâmetros a densidade, a anatomia, o ângulo microfibrilar da madeira e ainda sua composição química.

Finalmente, Bucur (2006) afirma que a velocidade na direção longitudinal é a mais afetada pela variação da geometria do CP, enquanto, na direção normal às fibras (direções, tangencial e radial), há uma maior influência da anatomia em suas propriedades de propagação da onda.

1.3 Materiais ortotrópicos submetidos a elevadas temperaturas

A utilização da propagação de ondas em materiais ortotrópicos submetidos às elevadas temperaturas deve ser cuidadosamente estudada, já que, de acordo com Bucur (1984) e Calegari *et al.* (2008), a temperatura é um dos fatores que influencia o comportamento de propagação da onda.

Quando se avalia o comportamento da madeira sob estas condições (Gerhards (1982), Lartigau *et al.* (2015); Guo *et al.* (2014)), tem-se que estudar fenômenos como o de transferência de calor e massa. De acordo com Trcala (2012), a teoria dos fenômenos de transporte em materiais porosos foi resumida por Luikov, em 1975 e Whitaker, em 1977. Luikov (1975) desenvolveu equações diferenciais parciais, para descrever este fenômeno em materiais porosos, como é o caso da madeira. Assumiu que a transferência de calor é semelhante à transferência de umidade e, também, que o transporte de calor é proporcional à umidade e ao gradiente de temperatura.

Há duas décadas, Turner e Ferguson (1995) apresentaram um modelo matemático que descreve o processo de secagem de material poroso isotrópico, aplicado em madeira de coníferas. Porém,

ainda na atualidade, muito tem sido estudado sobre o gradiente de temperatura na madeira. Geralmente esses estudos possuem como foco a indústria de secagem da madeira, cujo objetivo é o monitoramento da sua umidade (BUCUR, 2006; GONÇALVES e COSTA, 2002 e NOCETTI *et al.*, 2015). Também, na maioria das vezes, os trabalhos que avaliam o fenômeno de degradação térmica da madeira são realizados por métodos numéricos (PANG, 1996 e TRCALA, 2012). Na verdade, vários autores avaliam o efeito do tratamento térmico sobre o desempenho da madeira: WIDMANN *et al.*, 2012; CAO *et al.*, 2012; GUO *et al.*, 2014 e DRAKE *et al.*, 2015. No Brasil, no entanto, observa-se uma carência de pesquisas que articulem métodos não destrutivos (NDT) e análises do comportamento da madeira sob temperaturas elevadas.

Concluindo este capítulo, a autora afirma que estes foram os principais conhecimentos que embasaram as investigações do *corpus* selecionado.

2.

Análise Teórica

2.1 Propagação de ondas

A propagação de ondas em madeiras é descrita pelas equações de movimento estabelecidas para um sólido anisotrópico, que podem ser encontradas através da combinação entre a Lei de Newton e a Lei de Hooke generalizada. Utilizando a definição de deformações, obtém-se:

$$\rho \ddot{u}_i = C_{iklm} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_l} \right) \quad (1)$$

Em que:

- C_{iklm} é um tensor de quarto grau, conhecido como tensor de constantes elásticas;
- i, k, l, m são os índices de coordenadas e cada um, de forma independente, pode atingir os valores de 1, 2 ou 3;
- \ddot{u}_i é a aceleração linear.

Assumindo-se que ondas harmônicas planas estejam se propagando no corpo, resolvendo a equação diferencial (1) e considerando os cossenos diretores do vetor deslocamento da partícula, obtém-se a equação (2)

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

Em que:

- ρ é a densidade aparente da madeira;
- ω^2 é o quadrado da frequência angular;
- δ_{im} é o tensor unitário ou delta de Kronecker;
- u_{0i} é a amplitude das componentes do vetor deslocamento;
- k é a componente do vetor de onda;
- α_i são os cossenos diretores do vetor deslocamento da partícula.

De acordo com Carrasco e Azevedo Júnior (2003), a equação (2) foi desenvolvida por Christoffel, em 1877, razão de ser comumente conhecida como *Equação de Christoffel*. Ela representa um conjunto de três equações homogêneas de primeiro grau (lineares) em u_1, u_2 e u_3 . Estas equações terão soluções não nulas, não triviais, se, e somente se, o determinante da matriz dos coeficientes for igual a zero. O desenvolvimento desta equação fornece uma equação cúbica em ω^2 (ou em termos de v^2). As três raízes desta equação são diferentes, gerando três diferentes valores de velocidades de propagação. Em geral, é mais conveniente escrever a equação (2) na forma da equação (3), onde v representa a velocidade de fase das ondas e n_i , implícitos em λ_{im} denotam os cossenos diretores da normal às frentes de onda.

$$\left(\lambda_{im} - \rho v^2 \delta_{im} \right) u_m = 0 \quad (3)$$

Em que:

- ρ é a densidade do material;
- v é a velocidade de propagação da onda.

Portanto, considerando que o tensor λ_{im} depende da simetria estrutural do corpo e da orientação das ondas neste corpo, o novo determinante a ser calculado será:

$$\begin{bmatrix} (\lambda_{11} - \rho v^2) & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{12} & (\lambda_{22} - \rho v^2) & \lambda_{23} \\ \lambda_{13} & \lambda_{23} & (\lambda_{33} - \rho v^2) \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

O exame cuidadoso da equação (4) mostra que os vetores deslocamento (autovetores), associados a cada autovalor, ρv^2 , são mutuamente perpendiculares. Para uma dada direção de propagação, definida pelo vetor de onda \vec{k} , três ondas se propagam com vetores deslocamento mutuamente perpendiculares entre si e com velocidades diferentes.

Em geral, estas ondas não são puramente longitudinais ou puramente transversais. Entretanto, para certas direções de propagação em um dado meio material, em que \vec{k} é um autovetor de λ_{im} , uma onda é puramente longitudinal e as outras duas são puramente transversais.

Para uma onda longitudinal pura, o vetor deslocamento da partícula \vec{u} é paralelo ao vetor unitário normal às frentes de onda \vec{n} ; e, conseqüentemente, o produto vetorial $\vec{u} \times \vec{n}$ é nulo. Por outro lado, para uma onda transversal pura, os mesmos vetores são perpendiculares entre si e, portanto, o produto escalar $\vec{u} \cdot \vec{n}$ 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:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \lambda_{11} + \alpha_2 \lambda_{12} + \alpha_3 \lambda_{13} &= \alpha_1 \rho v^2 \\ \alpha_1 \lambda_{12} + \alpha_2 \lambda_{22} + \alpha_3 \lambda_{23} &= \alpha_2 \rho v^2 \\ \alpha_1 \lambda_{13} + \alpha_2 \lambda_{23} + \alpha_3 \lambda_{33} &= \alpha_3 \rho v^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Dessa maneira, conhecidas a velocidade de propagação da onda, a direção de propagação e a densidade da madeira se pode determinar os elementos da matriz de constantes elásticas, através da Equação de Christoffel. A Equação (6) foi utilizada por Gonçalves e Bartholomeu (2000) e Bucur (2006), obtendo bons resultados.

$$C = \frac{\rho V^2}{g} \quad (6)$$

Sendo:

- C = constante de rigidez, ou constante elástica, MPa;
- g = aceleração da gravidade.

2.2 Constantes Elásticas

A determinação das constantes elásticas da madeira pode ser simplificada ao se considerá-la, numa primeira aproximação, como um sólido ortogonalmente anisotrópico ou, simplesmente, ortotrópico. A matriz dos coeficientes elásticos de um sólido ortotrópico (matriz de rigidez) é dada por:

$$[C]_{\text{Ortotrópico}} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sendo:

- $C_{11} = \rho V_{LL}^2$; $C_{22} = \rho V_{RR}^2$; $C_{33} = \rho V_{TT}^2$;
- $C_{44} = \rho V_{RT}^2$; $C_{55} = \rho V_{LT}^2$; $C_{66} = \rho V_{LR}^2$;

Onde:

- C_{11} é a constante elástica determinada a partir da direção longitudinal (L);
- C_{22} é a constante elástica determinada a partir da direção radial (R);
- C_{33} é a constante elástica determinada a partir da direção tangencial (T);
- C_{44} é a constante elástica determinada a partir da direção radial tangencial (RT);
- C_{55} é a constante elástica determinada a partir da direção longitudinal tangencial (LT);
- C_{66} é a constante elástica determinada a partir da direção longitudinal radial (LR);
- V_{TT} é a velocidade da onda propagando na direção tangencial (T);
- V_{RR} é a velocidade da onda propagando na direção radial (R);
- V_{LL} é a velocidade da onda propagando na direção longitudinal (L);

- V_{LR} é a Velocidade da onda de cisalhamento com eixo LR = RL;
- V_{LT} é a Velocidade da onda de cisalhamento com eixo LT= TL;
- V_{RT} é a Velocidade da onda de cisalhamento com eixo RT = TR.

Para a madeira, os eixos 1, 2 e 3 podem ser substituídos pelas direções longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T), respectivamente.

Ainda de acordo com Gonzalez *et al.* (2001):

$$\begin{aligned} /V/ &= V_{LL}V_{RR}V_{TT} + 2(V_{LR}V_{RT}V_{TL}) - V_{LL}(V_{RT})^2 - V_{RR}(V_{TL})^2 - V_{TT}(V_{LR})^2; \\ E_R &= \frac{/V/}{V_{RR}V_{TT} - (V_{RT})^2}; \quad E_T = \frac{/V/}{V_{TT}V_{LL} - (V_{TL})^2}; \quad E_L = \frac{/V/}{V_{LL}V_{RR} - (V_{LR})^2}; \\ v_{TR} &= \frac{(V_{TL}V_{RT} - V_{LR}V_{TT})}{(V_{TT}V_{LL} - (V_{TL})^2)}; \quad v_{LT} = \frac{(V_{LR}V_{TL} - V_{RT}V_{LL})}{(V_{LL}V_{RR} - (V_{LR})^2)}; \quad v_{RL} = \frac{(V_{RT}V_{LR} - V_{TL}V_{RR})}{(V_{RT}V_{TT} - (V_{RT})^2)}; \\ G_{TL} &= V_{44}; \quad G_{LR} = V_{55}; \quad G_{RT} = V_{66} \end{aligned} \quad (9)$$

Em que:

- E_R é o módulo de elasticidade ao longo do eixo radial;
- E_T é o módulo de elasticidade ao longo do eixo tangencial;
- E_L é o módulo de elasticidade ao longo do eixo longitudinal;
- G_{TL} é o módulo de cisalhamento no plano tangencial longitudinal;
- G_{LR} é o módulo de cisalhamento no plano longitudinal radial e
- G_{RT} é o módulo de cisalhamento no plano radial tangencial.

Em que:

- $C_{12} = C_{21}$; $C_{13} = C_{31}$ e $C_{23} = C_{32}$ por simetria e
- a matriz inversa de C: $S = C^{-1}$ é a matriz de flexibilidade.

Vale ressaltar, que os componentes da matriz de flexibilidade (S) são medidos através de métodos estáticos, no caso, através de ensaios de compressão (Equação 10). E quanto aos componentes da matriz de rigidez (C), estes são medidos através de métodos dinâmicos (Gonzalez *et al.*, 2001).

Então a matriz de flexibilidade pode ser escrita (Bodig e Jayne (1982); Bucur (2006); Ballarin e Nogueira, (2003)):

$$\begin{array}{c} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{array} = \begin{array}{c} \frac{1}{E_L} \quad \frac{-\nu_{RL}}{E_R} \quad \frac{-\nu_{TL}}{E_T} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ \frac{-\nu_{LR}}{E_L} \quad \frac{1}{E_R} \quad \frac{-\nu_{TL}}{E_T} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ \frac{\nu_{LT}}{E_L} \quad \frac{-\nu_{RT}}{E_R} \quad \frac{1}{E_T} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{G_{RT}} \quad 0 \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{G_{LT}} \quad 0 \\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{G_{LR}} \end{array} * \begin{array}{c} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{array} \quad (10)$$

ou $\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}$

Sendo:

- ε = deformação encontrada na direção L; R e T
- σ = tensão nas direções da madeira, L, R e T;
- τ = tensão de cisalhamento nos planos RT, LT e LR;
- γ = distorção nos planos RT, LT e LR.

De acordo com Ballarin e Nogueira (2003), devem ser respeitadas as três condições:

$$\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}; \quad \frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L}; \quad \frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R} \quad (11)$$

E quanto aos coeficientes de Poisson, são dados pelas equações:

$$\nu_{LR} = \frac{-\varepsilon_R}{\varepsilon_L}; \quad \nu_{LT} = \frac{-\varepsilon_T}{\varepsilon_L}; \quad \nu_{TR} = \frac{-\varepsilon_R}{\varepsilon_T} \quad (12)$$

Bodig e Jayne (1982) mostram que, geralmente, devem-se levar em conta as comparações apresentadas a seguir:

$$E_L > E_R \approx E_T, \text{ e que } \nu_{RT} > \nu_{LT} \approx \nu_{LR} \gg \nu_{RL} \approx \nu_{TL} \quad (13)$$

2.3 Medidas de deslocamento e determinação de deformações.

Para a determinação das constantes elásticas através de ensaio de compressão, foram utilizados medidores de deslocamento portáteis (MD). Na Figura 2.1 é possível observar os MD instalados em um CP que foi ensaiado à compressão. À frente estão detalhados a fabricação e o funcionamento do MD.



Figura 2.1- Esquema de instalação do MD no CP de compressão.

Com a composição de alguns MD, foram determinadas as deformações em diversas direções, como também a distorção por cisalhamento. A seguir, está apresentada uma descrição dos esquemas do grupo de MD utilizados, bem como a formulação para determinar as deformações.

Na Figura 2.2 é mostrado um MD na linha OB, formando um ângulo φ com o eixo x. Após a aplicação de um deslocamento δ_x na direção x, Figura 2.2.(a), a linha OA passa a ser OA' e a linha OB passa a ser OB'. Considerando que um plano do CP seja o plano XY, no qual o eixo do MD é a direção OB, e φ é o ângulo do MD com o eixo X.

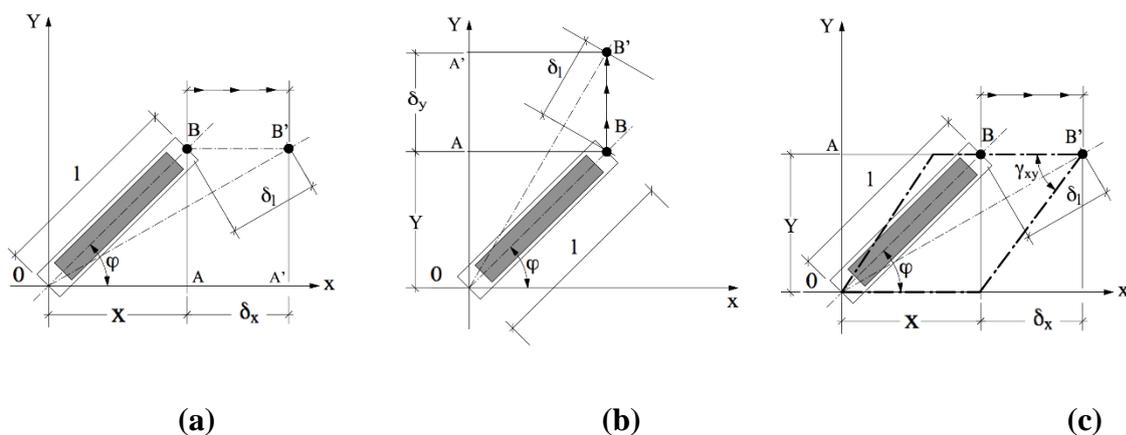


Figura 2.2 – Esquema de deslocamentos em um MD: **(a)** direção X; **(b)** direção Y; **(c)** Resultante. Adaptado de Carrasco (1989).

A deformação do CP na direção X é:

$$\varepsilon_x = \frac{\delta x}{x}, \quad (14)$$

A deformação determinada através da medida do MD (na direção OB') é:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\delta l}{l} \quad (15)$$

Sendo: $l = \frac{x}{\cos \varphi}$; $\delta l = \delta_x \cos \varphi$ (16)

Tem-se: $\varepsilon_\varphi = \frac{\delta x \cos^2 \varphi}{x} = \varepsilon_x \cos^2 \varphi$ (17)

Em que:

- ε_φ é a deformação na direção OB';
- δl é variação do comprimento L do MD;
- δ_x é variação do comprimento do MD na direção X;
- γ_{xy} é a distorção do plano XY.

A seguir é aplicado um deslocamento na direção Y, Figura 2.2(b), através de relações geométricas análogas entre ε_y e ε_φ e com o ângulo $(90^\circ - \varphi)$, tem-se:

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_y \cos^2(90 - \varphi) = \varepsilon_y \sin^2 \varphi \quad (18)$$

Finalmente, aplica-se um deslocamento devido à tensão de cisalhamento (distorção), τ_{xy} , Figura 2.2(c). A deformação na direção do MD devido ao alongamento δ_l é:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\delta_l}{l} \quad (19)$$

$$\text{Com:} \quad l = \frac{y}{\sin \varphi} \quad \text{e} \quad \delta_l = \delta_x \cos \varphi \quad (20)$$

Sendo: $\delta_x = y \tan \gamma_{xy} \cong y \gamma_{xy}$ (devido ao ângulo ser muito pequeno)

$$\text{Tem-se:} \quad \delta_l = y \gamma_{xy} \cos \varphi \quad \text{e} \quad \varepsilon_\varphi = \frac{y \gamma_{xy} \cos \varphi}{y / \sin \varphi} = \gamma_{xy} \sin \varphi \cos \varphi \quad (21)$$

Atuando simultaneamente ε_x , ε_y e γ_{xy} , a deformação será a soma algébrica das equações (17), (18) e (21). Desta maneira obtêm-se:

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_x \cos^2 \varphi + \varepsilon_y \sin^2 \varphi + \gamma_{xy} \sin \varphi \cos \varphi \quad (22)$$

Escrevendo em termos de ângulo duplo, tem-se:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\varphi + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi \quad (23)$$

Para se ter as deformações ε_x , ε_y e γ_{xy} , é necessário efetuar medidas de 3 deslocamentos e logo determina-se 3 deformações, ε_1 , ε_2 e ε_3 , em três direções, φ_1 , φ_2 e φ_3 , em relação ao eixo X.

Assim:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\varphi_1 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi_1 \\ \varepsilon_2 &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\varphi_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi_2 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\varphi_3 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi_3$$

Com as equações (24), pode-se determinar ε_x , ε_y e γ_{xy} . Caso seja necessário determinar as deformações em outras direções a partir das deformações nas direções X e Y, a transformação tensorial das componentes de deformações é dada por:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon'_x \\ \varepsilon'_y \\ \gamma'_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi & \sin \varphi \cos \varphi & \sin^2 \varphi \\ \sin^2 \varphi & -\sin \varphi \cos \varphi & \cos^2 \varphi \\ -\cos \varphi \sin \varphi & (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) & 2 \sin \varphi \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (25)$$

Considerando-se a roseta da Figura 2.3, formada por 3 MD, os ângulos de inclinação em relação ao eixo X são: $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = \theta$ e $\varphi_3 = 90^\circ$.

Substituindo na equação (24), tem-se:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} = \varepsilon_x \\ \varepsilon_2 &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_2 \\ \varepsilon_3 &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} = \varepsilon_y \end{aligned} \quad (26)$$

Resolvendo para ε_x , ε_y e γ_{xy} , tem-se:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_1 \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_3 \\ \gamma_{xy} &= \frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) \cos 2\theta}{\sin 2\theta} \quad \text{ou} \quad \gamma_{xy} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cos^2 \theta - \varepsilon_3 \sin^2 \theta}{\sin \theta \cos \theta} \end{aligned} \quad (27)$$

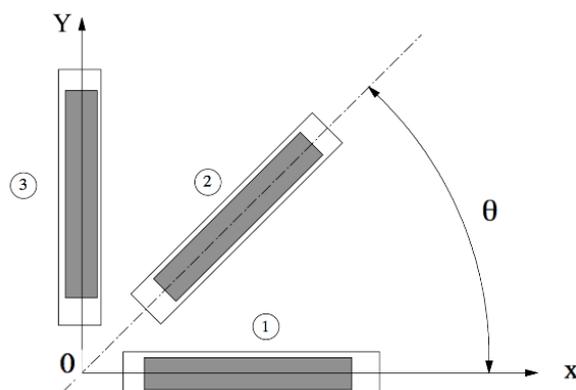


Figura 2.3 – Roseta trevo

A princípio, seriam necessários três MD; entretanto, como o ensaio para determinação das constantes elásticas a se realizar era de compressão simples, necessitou-se de apenas dois MD, para definir o estado de tensão, como está apresentado a seguir. Uma vez que, os CPs já estão orientados a 45° nos planos longitudinal-radial, longitudinal-tangencial e tangencial-radial, como mostrado na Fig. 3.13.

2.4 Determinação das constantes elásticas

Seja o CP da Figura 2.4 solicitado pela tensão σ_y ; a direção paralela às fibras, L: o chamado corpo de prova tipo I (CP-I) e instrumentado com três MD formando uma roseta, as constantes elásticas no ponto A podem ser calculadas da seguinte maneira:

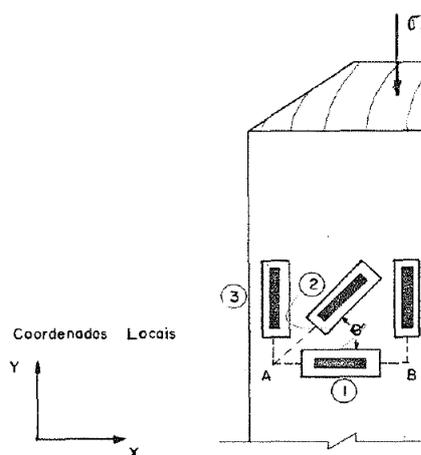


Figura 2.4 – Esquema de carga do CP compressão

Fonte: Carrasco (1989)

Considerando que apenas é aplicada a tensão σ_y , isto é, as outras tensões são iguais a zero, substituindo-se estas tensões na equação ($\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}$), 22 e 27, tem-se:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x = \varepsilon_1 &= -\frac{v_{yx}}{E_y} \sigma_y \\ \varepsilon_y = \varepsilon_3 &= \frac{\sigma_y}{E_y}\end{aligned}\quad (28)$$

$$\gamma_{xy} = 0$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \cos^2 \theta + \varepsilon_3 \sin^2 \theta$$

Assim:

$$E_y = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_3} \quad (29)$$

$$\frac{E_y}{v_{yx}} = -\frac{\sigma_y}{\varepsilon_1} \quad (30)$$

Com as transformações tensoriais das componentes de tensão e de deformação tem-se:

$$\gamma_\theta = 2(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \sin \theta \cos \theta + \gamma_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

$$\tau_\theta = \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta$$

E com $G_\theta = \frac{\tau_\theta}{\gamma_\theta}$

tem-se: $G_\theta = \frac{\sigma_y}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)} \quad (31)$

Observando as equações 29, 30 e 31 conclui-se que são apenas necessários dois MD. Na Figura 2.5 está mostrada a localização dos MD. São utilizados seis MD, sendo dois na direção da força aplicada (um em cada face oposta) e quatro perpendiculares à força aplicada, com um em cada face.

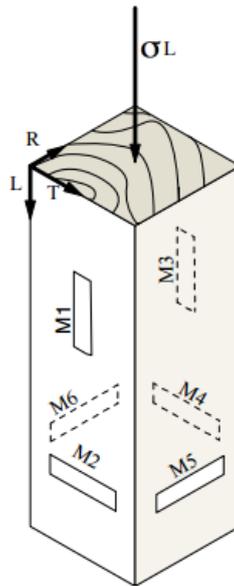


Figura 2.5 – Posição dos seis medidores de deslocamento

Agora, aplicando as tensões na direção radial (R), CP-II e tangencial (T), CP-III, separadamente, e seguindo um raciocínio análogo, estabelecem-se as outras constantes elásticas. Além disso, utilizando as transformações tensoriais das componentes de tensão, a de deformação e das constantes elásticas, dados por Lekhnitskii (1981), obtêm-se os módulos de deformação transversal, Equação 32 (Método 2):

$$\frac{1}{G'_{LR}} = 4 \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_R} + \frac{\nu_{LR}}{E_L} - \frac{1}{G_{LR}} \right) \text{sen}^2\theta \text{cos}^2\theta + \frac{1}{G_{LR}}$$

$$\frac{1}{G'_{RT}} = \frac{\text{cos}^2\theta}{G_{RT}} + \frac{\text{sen}^2\theta}{G_{LT}} \quad (32)$$

$$\frac{1}{G'_{LT}} = \frac{\text{sen}^2\theta}{G_{RT}} + \frac{\text{cos}^2\theta}{G_{LT}}$$

Os módulos de deformação transversal também podem ser determinados através dos CPs orientados nos planos: LT, CP tipo IV (CP-IV); LR, CP tipo V (CP-V) e RT, CP tipo VI (CP-VI), Figura 2.6 (Método 1). Com estes CPs determina-se o $E\alpha$, que corresponde ao E em cada plano inclinado. Utilizando as equações determinadas por Mascia (1991), obtêm-se todos os módulos de deformação transversal, Equação 33.

$$\begin{aligned}
\frac{1}{G_{LT}} &= \frac{1}{E_{\alpha}(\sin^2\alpha \cos^2\alpha)} - \frac{\cos^4\alpha}{E_T(\sin^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{\sin^4\alpha}{E_L(\sin^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L}, \\
\frac{1}{G_{LR}} &= \frac{1}{E_{\alpha}(\sin^2\alpha \cos^2\alpha)} - \frac{\cos^4\alpha}{E_R(\sin^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{\sin^4\alpha}{E_L(\sin^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LR}}{E_L}, \\
\frac{1}{G_{TR}} &= \frac{1}{E_{\alpha}(\sin^2\alpha \cos^2\alpha)} - \frac{\cos^4\alpha}{E_R(\sin^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{\sin^4\alpha}{E_T(\sin^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{TR}}{E_T},
\end{aligned} \tag{33}$$

Na Figura 2.6 é apresentada, esquematicamente, a posição em que os CPs devem ser retirados; e, na Tabela 2.1, as constantes elásticas de cada corpo de prova que são determinadas.

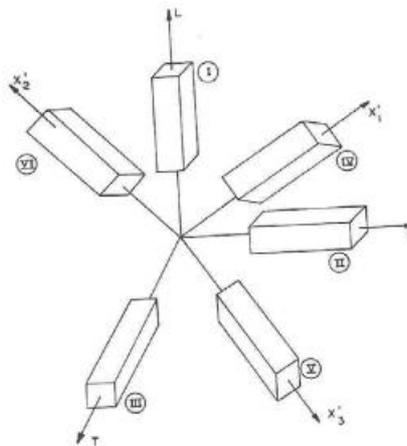


Figura 2.6 - Posições para a retirada de CPs para determinação de todas as constantes elásticas da madeira.

Tabela 2.1 - Corpos de Prova e correspondentes constantes elásticas.

Constantes Elásticas	Corpo de Prova					
	I (L)	II (R)	III (T)	IV (LT,45°)	V (LR,45°)	VI (TR,45°)
	$E_L, \nu_{LR}, \nu_{LT},$	$E_R, \nu_{RT}, \nu_{RL},$	$E_L, \nu_{LR}, \nu_{LT},$			
	$G'_{LT} \rightarrow G_{LT}$		$G'_{TR} \rightarrow G_{TR}$	$E_{\alpha,} \rightarrow G_{TL}$	$E_{\alpha,} \rightarrow G_{LR}$	$E_{\alpha,} \rightarrow G_{TR}$
	$G'_{LR} \rightarrow G_{LR}$					

Apresentadas as Análises Teóricas, neste Capítulo 2, a seguir o leitor pode conferir, no Capítulo 3, os Materiais que foram utilizados e os Métodos que foram aplicados, na busca de que esta pesquisa alcançasse o objetivo desejado.

3.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos empregados no trabalho, para que o leitor consiga vislumbrar o passo a passo desta pesquisa.

Os ensaios destrutivos e não destrutivos foram realizados no Centro de Pesquisa Avançada da Madeira e Novos Materiais (CPAM³), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). As madeiras ensaiadas foram angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), castanheira (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*) e roxinho (*Peltogyne discolor*). Para cada uma das 7 espécies foram confeccionados seis corpos de prova, sendo um para cada uma das seis direções analisadas, totalizando 42 CPs.

Os CPs utilizados para os ensaios não destrutivos também foram utilizados para determinação do teor de umidade, da densidade aparente e de toda a matriz de flexibilidade por meio de ensaio à compressão. Os procedimentos de ensaio para determinação de características mecânicas seguiram as prescrições da NBR 7190 (1997), bem como obedeceram aos padrões rigorosos dos requisitos e procedimentos do sistema de qualidade implantados nos laboratórios do CPAM³.

Para cada uma das madeiras foram utilizadas seis vigas de 2,5 m de comprimento e seção transversal de 150mm X 150mm. As mesmas foram secas ao ar e, posteriormente, desdobradas em peças menores. Em seguida, foram armazenadas para a estabilização da umidade, e então

confeccionados os CPs, de acordo com a norma NBR 7190 (1997), para determinação do teor de umidade.

A partir de cada viga de madeira foram retirados cubos com dimensões de 150mm e logo em peças de 50mm X 50mm X 150 mm, sendo, respectivamente, a largura, a altura e o comprimento. O restante foi armazenado para confecção de possíveis réplicas dos CPs. Os CPs ensaiados à compressão foram orientados nas três direções principais e nas três direções inclinadas às fibras, conforme mostra a Figura 3.1. De cada viga foram confeccionados dois CPs, sendo a réplica, para determinação da umidade e da densidade aparente da madeira.

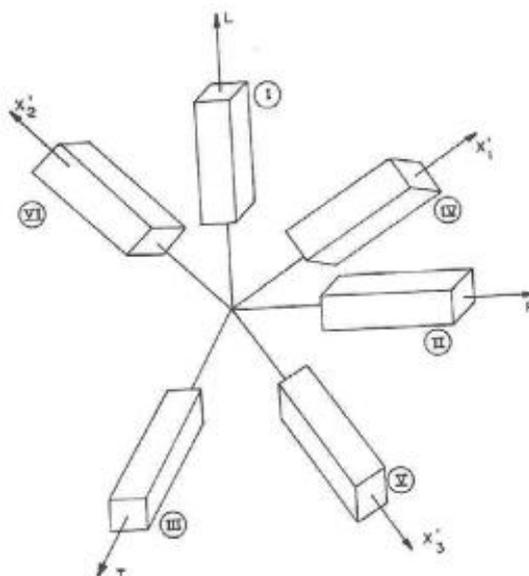


Figura 3.1- Posições para a retirada de CPs de ensaio de compressão, buscando a determinação de todas as constantes elásticas da madeira.

Fonte: Ballarin e Nogueira (2003)

3.1 Determinação da umidade e densidade aparente

Os teores de umidade e de densidade aparente das madeiras foram determinados no Laboratório de Caracterização Física da Madeira (LACAF/DEES/UFMG). Todos os aparelhos, dentre eles os paquímetros, as balanças e as estufas foram calibrados por órgão competente, segundo as recomendações do Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

Os cálculos de umidade e de densidade aparente foram determinados de acordo com a NBR 7190 (1997), e suas correções foram realizadas utilizando a ASTM D 2395 (1998) e a ISO 3130 (1975).

Para a estimativa do teor de umidade dos CPs (U_{cp}), antes da realização dos ensaios, foi utilizada a Equação 34 deduzida da Equação 35 da ASTM D 2395 (1998).

$$D_{ap,cp} = \frac{D_{ap,in}}{1 - D_{ap,in} 0,009(U_{in} - U_{cp})} \quad (34)$$

$$U_{cp} = \frac{D_{ap,in} - D_{ap,cp}}{D_{ap,in} D_{ap,cp} 0,009} + U_{in} \quad (35)$$

Em que:

- $D_{ap,cp}$ é a densidade aparente do corpo de prova, em kg/m^3 ;
- $D_{ap,in}$ é a densidade aparente inicial, com $U\%$ de umidade, em kg/m^3 ;
- U_{in} é o teor de umidade inicial determinado em ensaio com CPs específicos, em %;
- U_{cp} é o teor de umidade do corpo de prova, em %.

Para a correção da densidade aparente, calculada através da NBR 7190 (1997) para a densidade aparente com o teor de umidade de referência de 12%, foi utilizada a Equação 36 da ISO 3130 (1975). Esta equação se mostra necessária, uma vez que, na prática, não é possível colocar os corpos de prova na estufa para secar, antes da realização dos ensaios, pelo único intuito de preservar suas propriedades originais.

$$\rho_{12} = \rho_u \left[1 - \frac{(1-k)(u-12)}{100} \right] \quad (36)$$

Em que:

- k é o coeficiente volumétrico para mudança de 1% de umidade, cujo valor é = $0,85 \cdot 10^3 \rho_w$;
- u é o teor de umidade em que se encontra o corpo de prova, em %;
- ρ_u é a densidade aparente a $u\%$ de teor de umidade, em $kg \cdot m^{-3}$.

3.2 Ângulo das microfibrilas (AMF) na camada S2

Foram realizados cortes histológicos longitudinais tangenciais de 8 μm de espessura, e as finas seções do lenho foram maceradas (mesmo procedimento para as fibras). Com a massa de fibras, foram montadas lâminas histológicas para serem observadas em microscopia de luz polarizada (LIMA *et al.*, 2004). Foram feitas 20 mensurações individuais por amostra, ou seja, 140 mensurações por espécie, sob uma objetiva de 40x. Para isso, foi utilizado um microscópio com adaptador para a polarização da luz, bem como uma mesa giratória, com escala de 0 a 360°. A mesa foi girada de forma para que as fibras ficassem alinhadas, verticalmente, ao eixo capilar da ocular do microscópio. Em seguida, a mesa foi girada no sentido horário, até que o fundo da fibra ficasse escuro, momento este de máxima posição de extinção de luz. A diferença entre os ângulos da posição vertical da fibra e a da extinção de luz corresponde ao AMF.

3.3 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

Para análise termogravimétrica da madeira, foi utilizado o aparelho DTG-60H, Shimadzu. As análises foram submetidas à atmosfera de gás nitrogênio, a uma vazão constante de 50 $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$, utilizando-se aproximadamente 2mg, em cápsula de alumina aberta. As curvas termogravimétricas foram obtidas a partir de 50°C, até a temperatura máxima de 400°C, com taxa de aquecimento de 10°C. min^{-1} . A curva termogravimétrica (TG) avalia a perda de massa em função da temperatura e da curva da derivada primeira da perda de massa (DTG). A partir das curvas TG, é calculada a perda de massa nos seguintes intervalos de temperatura: 50°C - 100°C; 100°C - 150°C; 150°C - 200°C, 200°C - 250°C, 250°C - 300°C, 300°C - 350°C e 350°C - 400°C (PEREIRA *et al.*, 2013).

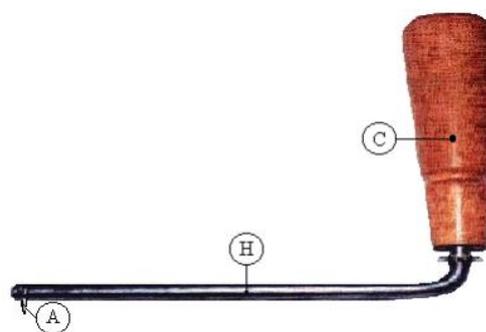
3.4 Determinação do ângulo da grã

O ângulo da grã foi medido nos mesmos CPs ensaiados à compressão e à propagação de ondas ultrassônicas e de excitação. O número de repetições variou de acordo com a orientação dos CPs. Para CPs orientados, foram realizadas medições na direção tangencial, com repetição dos dois lados opostos. Já em CPs sem orientação, as medições foram feitas em cada um dos quatro lados do CP, nas direções tangencial e radial. Foi utilizado o riscador, que consiste de uma haste

de aço de 6,0mm de diâmetro e 250mm de comprimento, também utilizados por Lima (1999) e Silva (2002). Ainda de acordo com Silva (2002), a determinação do ângulo da grã é alcançada através do arco tangente, obtido entre uma linha central paralela a aresta da peça (10cm) e o risco executado pela agulha cravada na extremidade desta linha, que percorre o sentido da linha de acompanhamento da grã. Nas Figuras 3.2.(a) e 3.2.(b) estão mostrados o corpo de prova utilizado e o riscador usado para medição do ângulo da grã.



(a)



(b)

Figura 3.2. – (a) Corpo de prova de Angelim Pedra usado para medição do ângulo da grã e (b) Riscador usado para medição do ângulo da grã, sendo A = agulha de gramofone; H = haste em aço; C = cabo de madeira com movimento pivotante.

Fonte: SILVA (2002)

3.5 Métodos de Propagação de onda

3.5.1 Propagação de ondas de excitação

As amostras foram caracterizadas com relação aos modos de vibração flexional e torcional. Para isso, foi utilizado um suporte ajustável para barras, um pulsador, um captador direcional e um software específico. A Figura 3.3 apresenta esta versão do equipamento.



Figura 3.3- Ensaio utilizando o método de propagação de ondas de excitação.

A técnica de excitação por impulso utiliza a norma ASTM E1876 (2006) como base em suas determinações. Vale ressaltar que essa norma é utilizada para materiais isotrópicos. O instrumento de teste Sonelastic visa determinar os módulos elásticos a partir das frequências naturais de vibração do CP. As frequências são excitadas por meio do pulsador, seguido da captação da resposta acústica por um sensor. Aplica-se um tratamento matemático ao sinal (transformada de Fourier), para a obtenção do espectro de frequências correspondentes (OTANI e PEREIRA, 2013). Em consequente, são calculados os módulos elásticos dinâmicos. Para isso foi necessário considerar a geometria do CP, a massa, as dimensões e a frequência obtida pelo equipamento utilizado.

As amostras possuíam dimensões de 17mm X 10mm X 150mm. Foram 42 CPs por espécie de madeira, igualmente distribuídos nas direções radial, tangencial e longitudinal, e nas intermediárias (RT, LR e LT). Os CPs foram marcados com traços distantes $0,224L$ de cada extremidade, sendo que L representa o comprimento do CP. Estas posições corresponderam às linhas nodais do CP, referentes ao modo de vibração flexional, e torcional para as geometrias de barras retangulares.

A função do suporte era o de sustentar o corpo de prova, apoiando-o nas linhas nodais, de tal forma que ficasse livre para vibrar ao receber o impulso mecânico de excitação. Os corpos de prova foram apoiados nas linhas nodais referentes à flexão, independentemente do modo de vibração que se desejava excitar. O que se alterou para cada modo foi a posição de excitação e de captação da resposta acústica (OTANI e PEREIRA, 2013).

Na Figura 3.4(a) e (b) é possível ver o posicionamento adequado dos CPs para a obtenção dos modos. Para a obtenção do modo flexional, Figura 3.4(a), o impulso e a captação do sinal foram realizados no centro do CP. Para a obtenção do modo torcional, o impulso precisou ser aplicado em uma região lateral do CP, próximo de sua aresta. A captação foi feita em uma região oposta, também próxima à aresta.

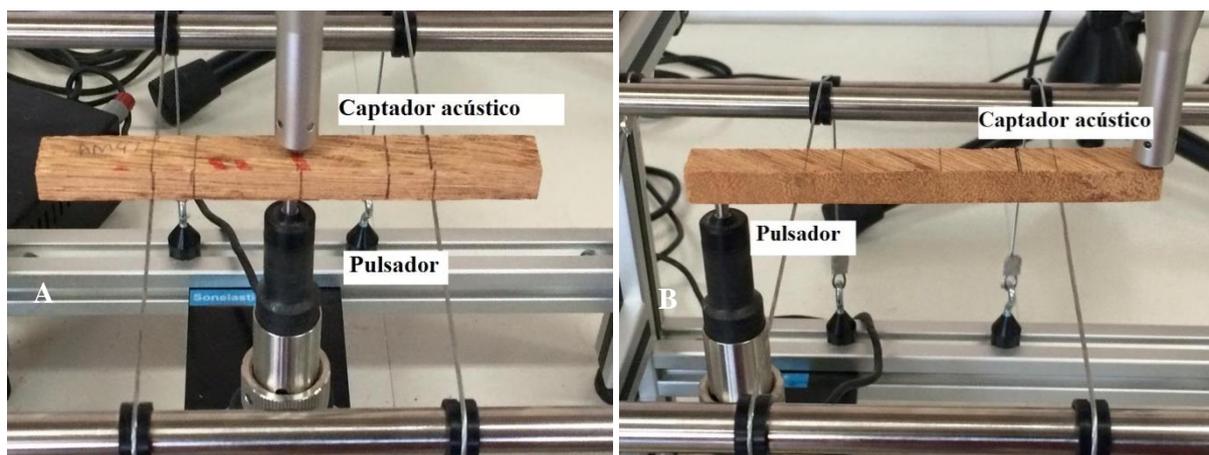


Figura 3.4- Posicionamento adequado dos CPs para a obtenção dos modos (A) flexional e (B) torcional.

Para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico (E_{din}), foi utilizada a frequência de vibração na flexional (f_f) em seu cálculo, enquanto para o módulo de elasticidade transversal (G) foi a de vibração na torção (f_t) ASTM E,1876 (2006).

$$R = \left[\frac{1 + \left(\frac{b}{t}\right)^2}{4 - 2,521 \frac{t}{b} \left(1 - \frac{1,991}{e^{\frac{b}{\pi t} + 1}}\right)} \right] \left[1 + \frac{0,00851n^2 b^2}{L^2} \right] - 0,060 \left(\frac{nb}{L}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{b}{t} - 1\right)^2 \quad (37)$$

$$T_1 = 1 + 6,585 (1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2) - \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - \left[\frac{8,34 (1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^4}{1 + 6,338 (1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2} \right] \quad (38)$$

$$E = 0,9465 \left(\frac{mf_f^2}{w}\right) \left(\frac{l^3}{t^3}\right) T_1 \quad (39)$$

$$G = \left(\frac{4lmf_t^2}{wt} \right) (R) \quad (40)$$

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (41)$$

Em que:

- E_{din} é o módulo de elasticidade dinâmico, em MPa;
- G é o módulo de elasticidade transversal dinâmico, em MPa;
- m é a massa do CP, em grama;
- b é a largura do CP, em milímetro;
- R é a constante, adimensional;
- L é o comprimento do CP, em milímetro;
- t = espessura do CP, em milímetro;
- f_f é a frequência de ressonância fundamental do CP em flexão, em Hertz;
- f_t = frequência de ressonância fundamental da barra de torção, em Hertz;
- T_1 = fator de correção para o modo de flexão fundamental para espessura finita.

3.5.2 Propagação de ondas ultrassônicas

Para a propagação de ondas ultrassônicas, o aparelho utilizado foi o Panametrics-NDT EPOCH4 (Olympus/Panametrics NDT Inc, San Diego, EUA), com o uso dos transdutores longitudinal e transversal, em frequência de 1MHz e diâmetro de 25mm. As amostras possuíam forma de poliedros de 26 lados, já que esse formato de amostras foi experimentado por François (1995), Vásquez *et al.* (2015) e Gonçalves *et al.* (2011). Gonçalves *et al.* (2011) concluíram que essa é a forma mais simples e eficiente de determinar a matriz de rigidez da madeira, ao comparar esse formato de amostras com mais dois formatos utilizados usualmente na literatura, prismas cúbicos e discos multifacetados.

Em regra, o comprimento do CP deve ser determinado a partir do comprimento de onda ($\lambda = V_{onda}/frequência$). Existem ainda divergências sobre o valor mínimo necessário para que a velocidade da onda seja constante: a NBR 58000 (2007) prescreve que o comprimento do CP deve ser de no mínimo 3λ ; já Bucur (2006) estabelece que deve ser no mínimo 2λ . Bucur (2006)

afirma que os valores de λ são superiores na direção longitudinal, seguido das direções radial e tangencial. Foi necessário calcular o valor de λ para as madeiras utilizadas e com transdutor de 1 MHz.

Na Figura 3.5 é mostrado como o poliedro de 26 lados foi ensaiado com a utilização do método de propagação de ondas ultrassônicas.



Figura 3.5 – Corpo de prova utilizado no ensaio de propagação de ondas ultrassônicas.

3.6 Determinações das características mecânicas através do medidor de deslocamento portátil (MD)

Com o objetivo de diminuir custo e tempo gasto na colagem dos extensômetros foi desenvolvido um medidor portátil, com exatidão suficiente para determinar as deformações na direção longitudinal às fibras e na direção normal delas. Tal metodologia possibilitou a reutilização do medidor durante todo o ensaio de compressão.

Utilizou-se uma tira de aço em forma de arco, na qual foram colados quatro extensômetros elétricos de resistência, sendo dois na parte superior (R1 e R3) e outros dois na parte inferior (R2 e R4), todos centralizados, conforme as Figuras 3.6 e 3.7.

As especificações dos extensômetros de resistência elétrica (*strain gage*) utilizados são: KFG-2-120-C1-11, fabricante: Kyowa. Extensômetro em lâmina de uso geral, comprimento de 2 mm. Resistência do extensômetro: $120,2 \pm 0,2 \Omega$. Fator gage $2,11 \pm 1,0\%$. Expansão térmica adaptável de 11,7 PPM / C. Sensibilidade transversal de 0,7%.

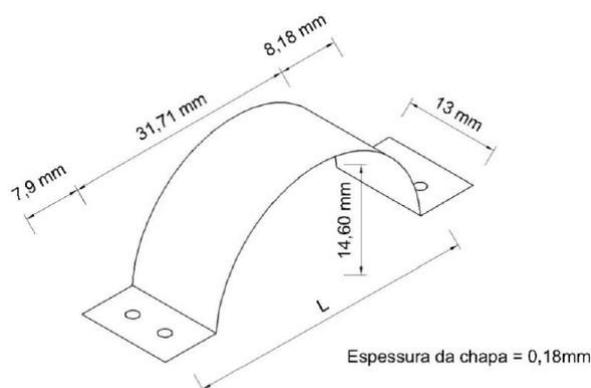


Figura 3.6- Dimensões do mecanismo de deslocamento portátil.

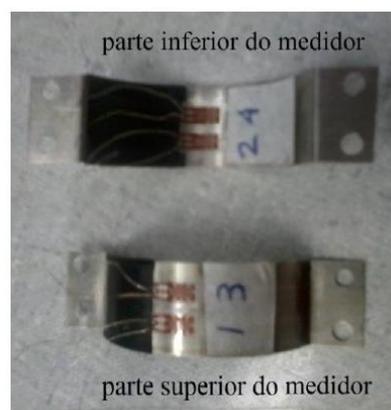


Figura 3.7- Extensômetros elétricos colados, formando o medidor de deslocamento.

O arco metálico é constituído de aço carbono, equivalente ao aço SAE 1095. De acordo com LG Steel (2015), a resistência desse tipo de aço é de 1015 MPa. O aço utilizado apresentou boa ductilidade, importante para que o MD não perdesse facilmente sua elasticidade, podendo ser reutilizado diversas vezes. Eles foram confeccionados por uma indústria especializada, para garantir a padronização, seis chapas para os MD e possuíam duas abas nas extremidades e dois furos em cada uma delas, conforme a Figura 3.6. Isso possibilitou a fixação do medidor de deslocamento no corpo de prova, por meio de parafusos, de forma a garantir que seu deslocamento relativo entre os parafusos fosse proporcional à deformação do corpo de prova.

Após terem sido colados no arco metálico, os extensômetros tiveram seus terminais soldados aos cabos. Um teste então foi feito, usando um voltímetro para garantir o correto funcionamento dos extensômetros, antes de os instalar no sistema de aquisição de dados. O valor da resistência elétrica foi de aproximadamente 120Ω .

Para obter maior sensibilidade na flexão e eliminar a influência da temperatura na deformação dos extensômetros, estes foram configurados em um circuito em ponte completa de Wheatstone (Fig.3.8), e logo conectados a um sistema de aquisição de dados (SAD), conforme mostra a

Figura 3.9. Para facilitar a utilização dos medidores em mais de um ensaio, sem a necessidade de calibrar o sistema a cada medição, foram colocados terminais de rede nos fios dos extensômetros, e *plugs* de rede fixos no SAD, conforme ilustra a mesma Figura 3.9.

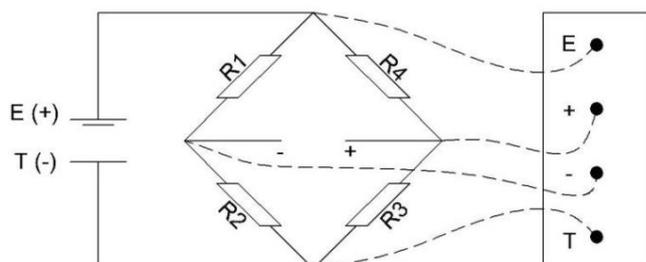


Figura 3.8- Ligação dos extensômetros em ponte completa de Wheatstone.

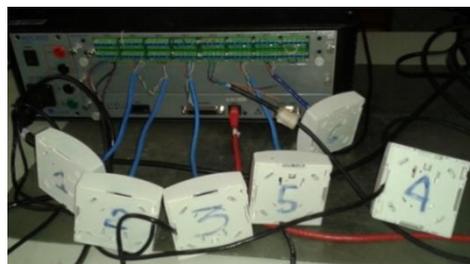


Figura 3.9- *Plugs* de rede fixos no SAD.

Em seguida os MD foram calibrados por meio de um dispositivo que utiliza um relógio comparador, cuja precisão é de 0,001mm, da marca Mitutoyo, conforme Figura 3.10. O princípio de funcionamento desse dispositivo comparador se dá a partir de um ajuste por meio do giro de um parafuso que está inserido em uma chapa de aço. Por consequência, uma carga aplicada lentamente deforma o aparelho medidor de deslocamento e desloca o relógio. Foi tomado todo cuidado para que as deformações decorrentes no ensaio fossem sempre menores que a deformação máxima permitida nos extensômetros, objetivando que os mesmos não se plastifiquem. Para a calibração foi utilizado o SAD, inicialmente o relógio comparador foi zerado e, em seguida, lida a voltagem do circuito do medidor de deslocamento. Para cada variação de deslocamento da chapa rígida (ocasionada pelo movimento do parafuso) foi lido o valor do relógio comparador e a variação de voltagem do MD. Estes pares de valores foram arquivados no programa do SAD e correlacionados através de uma regressão linear. Utilizou-se como fundo de escala a máxima deformação ocorrida na direção normal às fibras.



Figura 3.10- Dispositivo de calibração.

Para a validação do medidor de deslocamento portátil, foi realizado um ensaio prévio de compressão paralela às fibras em um CP da madeira angelim vermelho (*Dinizia excelsa*). O corpo de prova utilizado no ensaio possuía a relação $L/a \cong 3$ (comprimento/aresta), e base aproximadamente quadrada com dimensões de 49,43mm X 49,85mm e área de 2.464,09 mm².

Foram instalados dois MD em faces opostas (Fig. 3.11), conectados ao SAD. Para aplicação de carga foi utilizada uma máquina universal com capacidade de 300 KN.

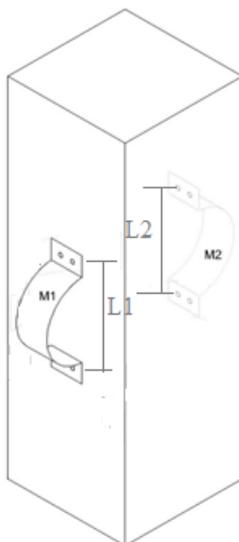


Figura 3.11- Medidores de deslocamento portátil instalados em faces opostas do CP.

A aplicação da carga foi com a velocidade especificada pela NBR 7190 (1997), até próximo do limite de elasticidade do CP. Com o par de valores da força aplicada e as medidas dos MD, foram determinadas as tensões e deformações. Na Figura 3.12 está mostrado o gráfico Tensão X Deformação com a respectiva regressão linear. O módulo de elasticidade $E = 10400$ MPa é próximo ao valor de 10473 MPa encontrado pelo IPT (2013).

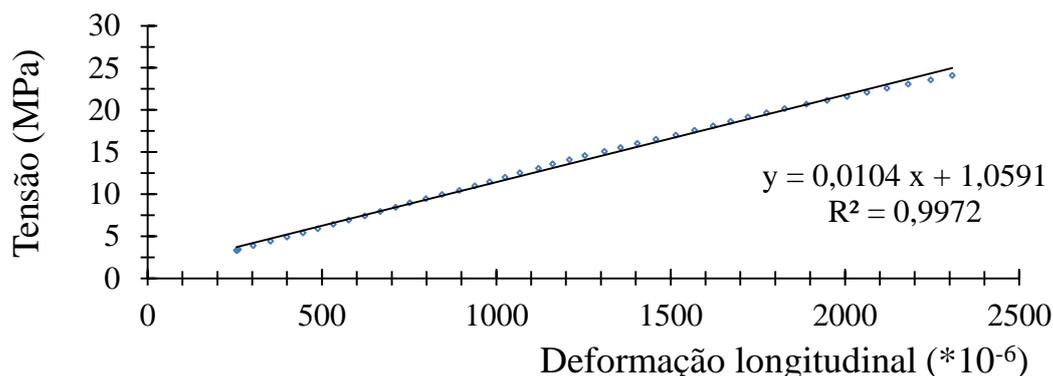


Figura 3.12- Relação Tensão-Deformação para a madeira angelim vermelho na direção longitudinal às fibras.

A madeira pode ser considerada como um material ortotrópico tri-ortogonal, com três eixos de simetria ortogonais entre si (BODIG e JAYNE, 1982; BUCUR e ARCHER, 1984). Para determinar E , G e ν nas três direções principais foram utilizados os medidores portátil de deslocamento, conforme mostra a Figura 3.13. Na Figura 3.13 é mostrado, como exemplo, um CP sendo ensaiado à compressão, na máquina universal EMIC, modelo DL 30.000, com capacidade de carga de 300 KN, sobre uma célula com capacidade de 100 KN, previamente calibrada.

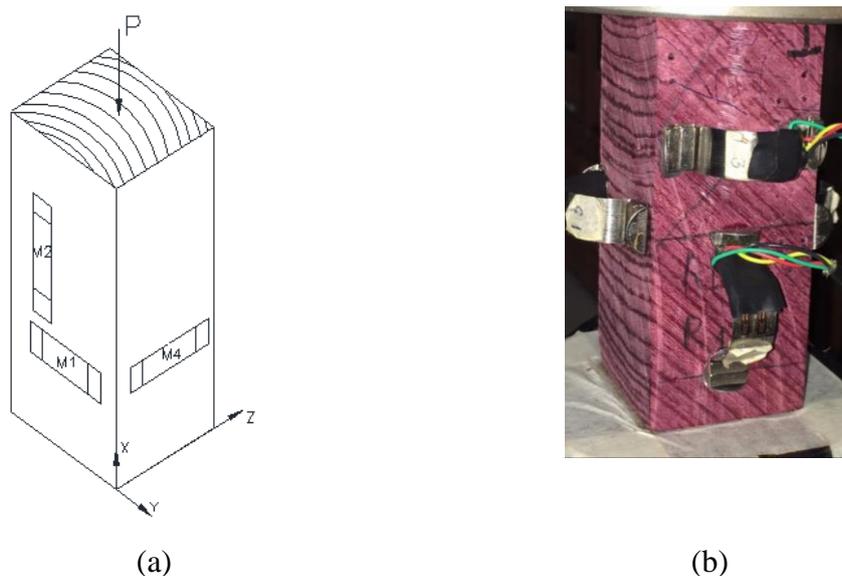


Figura 3.13 – Corpos de prova ensaiados à compressão com a utilização do medidor portátil. (A) CP submetido à carga P orientado na direção longitudinal e (B) CP inclinado a 45°.

O ensaio de compressão foi realizado seguindo prescrições da NBR 7190 (1997). Os MD e a célula de carga foram instalados no SAD. O ensaio foi monitorado pelo programa AqDados 7.02 (Programa de Aquisição de Sinais) e os sinais tratados pelo AqDAnalysis 7 (Programa de Análise de Sinais). Os valores obtidos no ensaio foram de tensão e deslocamento dos MD. Estes valores foram tratados no programa EXCEL, para a obtenção das constantes desejadas. Utilizando os 6 MD, a partir do deslocamento medido, foi feita a determinação das deformações, aplicando-se a expressão:

$$\left(\varepsilon_i = \frac{M_i}{L_i} \text{ com } i = 1, \dots, 6 \right)$$

Em que:

- M_i é a medida do deslocamento do MD $_i$
- L_i é a distância inicial entre os parafusos de fixação do MD $_i$.

Todas as constantes elásticas foram determinadas com os seis tipos de CPs orientados convenientemente. Na Tabela 3.1 são mostradas estas orientações e as constantes elásticas obtidas a partir de cada um dos CPs orientados. Com os resultados de ensaio, com a aplicação das fórmulas apresentadas e com a utilização de regressões lineares, foi possível determinar

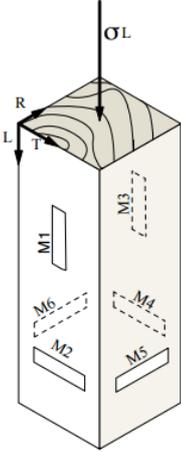
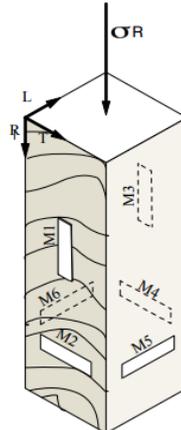
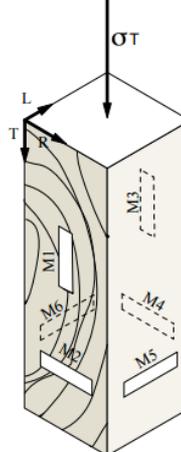
todas as constantes elásticas. A determinação dos módulos de deformação transversal, como já foi dito anteriormente, foi feita por dois métodos. O método 1 utiliza as equações apresentadas por Mascia (1991), apresentadas, novamente, a seguir:

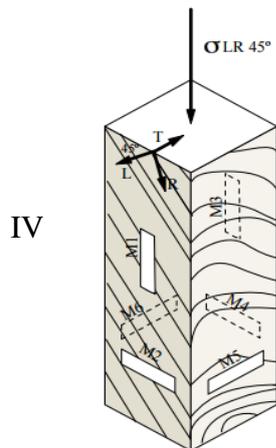
$$\begin{aligned}\frac{1}{G_{LT}} &= \frac{1}{E_{\alpha}(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} - \frac{\cos^4\alpha}{E_T(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_L(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LT}}{E_L}, \\ \frac{1}{G_{LR}} &= \frac{1}{E_{\alpha}(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} - \frac{\cos^4\alpha}{E_R(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_L(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{LR}}{E_L}, \\ \frac{1}{G_{TR}} &= \frac{1}{E_{\alpha}(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} - \frac{\cos^4\alpha}{E_R(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{\text{sen}^4\alpha}{E_T(\text{sen}^2\alpha \cos^2\alpha)} + \frac{2\nu_{TR}}{E_T},\end{aligned}\tag{42}$$

Em relação ao método 2, foram utilizadas as equações apresentadas por Lekhnitskii (1981), expostas a seguir:

$$\begin{aligned}\frac{1}{G'_{LR}} &= 4 \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_R} + \frac{\nu_{LR}}{E_L} - \frac{1}{G_{LR}} \right) \text{sen}^2\theta \cos^2\theta + \frac{1}{G_{LR}}, \\ \frac{1}{G'_{RT}} &= \frac{\cos^2\theta}{G_{RT}} + \frac{\text{sen}^2\theta}{G_{LT}}, \\ \frac{1}{G'_{LT}} &= \frac{\text{sen}^2\theta}{G_{RT}} + \frac{\cos^2\theta}{G_{LT}}\end{aligned}\tag{43}$$

Tabela 3.1- Corpo de prova orientado e constantes elásticas

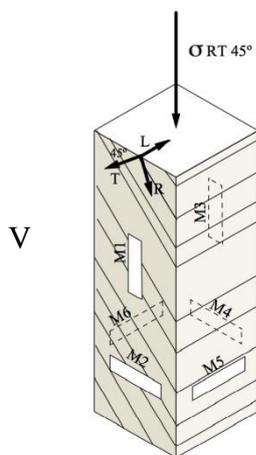
Tipo CP	Deformações	Constantes elásticas
I		$E_L = \frac{\sigma_L}{\varepsilon_L};$ $\nu_{LR} = -\frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_L};$ $\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}$ $\varepsilon_L = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ $\varepsilon_T = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_4}{2}$ $\varepsilon_R = \frac{\varepsilon_5 + \varepsilon_6}{2}$ $G'_{LR} = \frac{\sigma_{LT}}{2(\varepsilon_R - \varepsilon_{LT})} \text{ Equação (32)} \rightarrow G_{LR}$ $G'_{LT} = \frac{\sigma_{LT}}{2(\varepsilon_* - \varepsilon_{LT})} \text{ Equação (33)} \rightarrow G_{LT}$
II		$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ $\varepsilon_T = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_4}{2}$ $\varepsilon_L = \frac{\varepsilon_5 + \varepsilon_6}{2}$ $G'_{LT} = \frac{\sigma_{LT}}{2(\varepsilon_* - \varepsilon_{LT})}$
III		$E_T = \frac{\sigma_T}{\varepsilon_T}$ $\nu_{TL} = -\frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_T}$ $\nu_{TR} = -\frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_T}$ $\varepsilon_T = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$ $\varepsilon_R = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_4}{2}$ $\varepsilon_L = \frac{\varepsilon_5 + \varepsilon_6}{2}$ $G'_{TR} = \frac{\sigma_R}{2(\varepsilon_R - \varepsilon_T)} \text{ Equação (34)} \rightarrow G_{TR}$



$$\varepsilon_{LR}^{45} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}$$

$$E_{LR}^{\alpha} = \frac{\sigma_{LR}^{45}}{\varepsilon_{LR}^{45}}$$

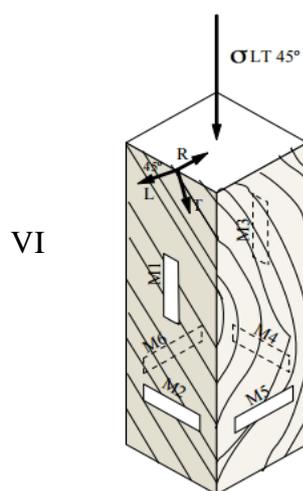
Equação (30) $\rightarrow G_{LR}$



$$\varepsilon_{TR}^{45} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}$$

$$E_{TR}^{\alpha} = \frac{\sigma_{TR}^{45}}{\varepsilon_{TR}^{45}}$$

Equação (31) $\rightarrow G_{TR}$



$$\varepsilon_{LT}^{45} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}$$

$$E_{LT}^{\alpha} = \frac{\sigma_{LT}^{45}}{\varepsilon_{LT}^{45}}$$

Equação (29) $\rightarrow G_{LT}$

Visto que a fundamentação teórica que embasou esta tese já foi exposta e que, neste presente capítulo, foram apresentados os materiais e métodos utilizados nesta investigação, podemos apresentar o capítulo 4, em que estão dispostos os resultados e as discussões sobre os dados colhidos.

4.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor orientação do leitor, deve-se esclarecer que neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios destrutivos no subitem 4.1, bem como os ensaios não destrutivos têm seus resultados e discussões presentes no item 4.2.

4.1 Ensaios destrutivos

Na Figura 4.1 é apresentado um gráfico de densidade aparente a 12% de umidade, para cada uma das madeiras utilizadas. Nesta figura é possível observar que os valores médios de densidade aparente das madeiras estão contidos no intervalo de 650 a 1150 kg.m^{-3} ; portanto, elas são classificadas como madeiras de média a alta densidade.

O menor valor de densidade aparente dentre as espécies investigadas, isto é 650 Kg.m^{-3} , foi encontrado na madeira castanheira e o maior valor, 1150 Kg.m^{-3} , no angelim vermelho. Dias e Lahr (2004) encontraram valores de 1131 Kg.m^{-3} para a madeira angelim vermelho, bem como 920 Kg.m^{-3} para a madeira garapa. IPT (1989) determinou os seguintes valores médios para densidade aparente a 15 % de umidade: 750 Kg.m^{-3} para a madeira castanheira; 1090 Kg.m^{-3} para angelim vermelho; 930 Kg.m^{-3} para pequi; 970 Kg.m^{-3} para muiracatiara; 890 Kg.m^{-3} para roxinho e 830 Kg.m^{-3} para garapa. Já o IBAMA (1997) determinou para a madeira angelim-pedra o valor de 710 Kg.m^{-3} , para densidade aparente a 12% de umidade.

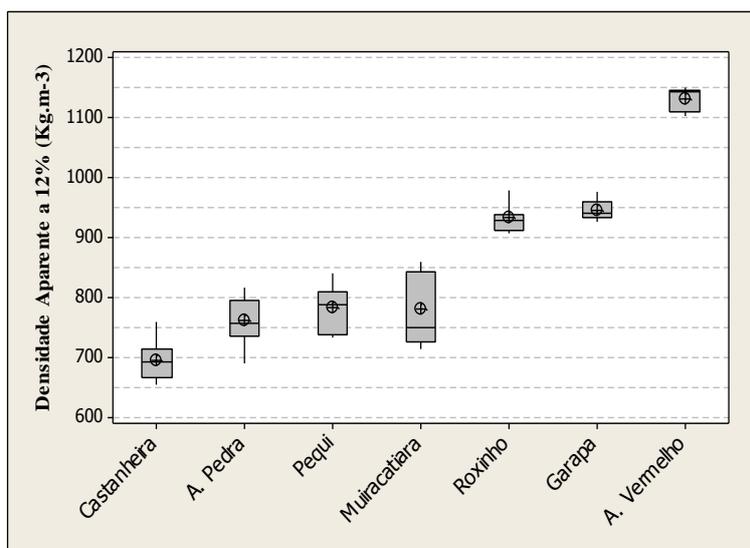


Figura 4.1 – Valores da densidade aparente a 12% de umidade para as sete espécies.

Na Tabela. 4.1 são apresentados os valores médios de desvio de grã, o ângulo microfibrilar das fibras, a densidade aparente a 12% de umidade e o módulo de elasticidade nas três direções (longitudinal, tangencial e radial), para as sete madeiras deste estudo. Os números em parênteses são o desvio padrão, e as letras são parâmetros atribuídos pelo teste de Tukey a 5% de significância. As médias seguidas pela mesma letra, na mesma linha, indicam que elas não diferem entre si. Foi realizada também a análise entre as direções longitudinal, tangencial e radial, para verificar se as mesmas se diferenciavam entre si.

Pelos dados da Tabela 4.1 é possível constatar, pela média geral, que a característica de densidade aparente a 12% de umidade se dividiu em quatro diferentes grupos. A madeira angelim vermelho foi a que obteve maior valor, diferenciando-se estatisticamente das demais, sendo classificada, então, como madeira de alta densidade, seguida pelas madeiras roxinho e garapa, com valores estatisticamente iguais e, também, classificadas como de alta densidade. Já as madeiras pequi, muiracatiara e angelim pedra não se diferenciaram entre si e puderam ser classificadas como de densidade moderadamente alta. Por último, a madeira de castanheira obteve o menor valor em média, ficando, pois, classificada como de média densidade.

Tabela 4.1 – Valores médios de densidade aparente a 12% de umidade, ângulo da grã, ângulo microfibrilar e módulos de elasticidade nas três direções ortogonais para as madeiras de sete espécies.

Propriedade	Espécies							
	Castanheira	A. pedra	Muiracatiara	Pequi	Roxinho	Garapa	A. vermelho	
Densidade aparente (kg.m ⁻³)	696 D (35)	761 C (42)*	780 C (63)	783 C (38)	933 B (23)	946 B (17)	1131 A (20)	
Desvio de grã (Graus)	0,94 C (0,27)	2,39 B (0,39)	0,99 C (0,32)	4,12A (1,23)	2,35 B (0,40)	1,09 C (0,30)	3,89 A (0,80)	
AMF (Graus)	4,91 BC (0,23)	4,36 C (0,18)	4,52 C (0,18)	5,19 BC (0,24)	6,56 AB (1,63)	6,25 BC (0,76)	8,36 A (2,64)	
E (MPa)	E _L	9007 CD (1173)	12077 AB (1174)	8729 CD (923)	7345 D (1553)	12024 AB (1999)	12258 A (1448)	9909 BC (808)
	E _T	678 D (169)	750 CD (94)	788 CD (267)	821 CD (84)	911 BC (85)	1048 AB (169)	1228 A (92)
	E _R	969 C (78)	1052 BC (226)	1055 BC (152)	911 BC (85)	1486 A (275)	1483 A (114)	1600 A (237)

Médias seguidas pela mesma letra na mesma linha, não se diferem entre si. Pelo teste de Tukey há 5% de probabilidade.

E_L, E_T e E_R são módulos de elasticidade longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. *Desvio padrão.

Com relação ao módulo de elasticidade na direção tangencial (E_T), foi observado que os maiores valores foram para as madeiras de alta densidade. De acordo com o teste de Tukey, as madeiras angelim vermelho e garapa não se diferenciaram estatisticamente e têm os maiores valores de E_T. Também as madeiras de castanheira, angelim pedra, muiracatiara e pequi não se diferenciaram estaticamente e têm os menores valores de E_T.

Para o módulo de elasticidade radial (E_R), foi verificado um comportamento semelhante ao descrito para o E_T, no qual os maiores valores de E_R são correspondentes às maiores densidades. As madeiras de angelim vermelho, garapa, roxinho e pequi tiveram o E_R estatisticamente iguais.

Para a direção longitudinal, os maiores valores de módulo de elasticidade foram para garapa, roxinho e angelim pedra; enquanto os menores valores foram para pequi, muiracatiara e castanheira. Esse fator pode ser justificado pelas variações de AMF e inclinação da grã, como observado para a madeira angelim vermelho, que possui o maior valor de densidade aparente, no entanto possui um valor intermediário de módulo de elasticidade longitudinal. O que pode ser justificado pela presença de altos valores de AMF (8,36) e desvio de grã (3,89) quando comparados com as outras espécies estudadas.

Em relação ao módulo de elasticidade longitudinal das mesmas madeiras, o IPT (1989a) apresenta o valor de 11572 MPa para a madeira angelim pedra a 12% de umidade e 14460 MPa para garapa verde. Ainda o IPT (1989b) definiu, com umidade verde, o valor de 20565 MPa para a madeira roxinho. O IBAMA (1997) apresenta, para madeira verde, o valor de 14073 MPa para a madeira angelim vermelho e, de 12303 MPa para a madeira muiracatiara.

Os valores do ângulo microfibrilar das madeiras estudadas variaram de 4,36, para a madeira angelim pedra, a 8,36 para a madeira angelim vermelho. Bucur (2006) afirma a importância de se estudar o ângulo microfibrilar da madeira, já que é uma característica que afeta não apenas as propriedades mecânicas como também as acústicas. Atualmente os trabalhos que estudam os valores de AMF são para espécies de rápido crescimento, em que geralmente sua poda acontece quando ainda jovem, como a madeira eucalipto. Geralmente com as madeiras comercializadas para uso na engenharia civil, caso das espécies estudadas, este crescimento é mais demorado e o corte é realizado quando as árvores já estão adultas, impossibilitando a comparação dos resultados.

Bucur (2006), Aguilera *et al.* (2007) e Bremaud *et al.* (2011) afirmaram que o desvio de grã afeta as propriedades acústica da madeira, reduzindo a velocidade de propagação. Lee (1958) já dizia que, para madeiras macias, a propagação da onda é um método capaz de prever a condição da grã. Soma *et al.* (2002), por sua vez, determinaram uma equação para estimar a velocidade de propagação da onda em madeira com desvio de grã, tendo como base a equação de Hankinson's. Bucur (1984) também avaliou o efeito da orientação da grã na velocidade de propagação da onda das madeiras, a partir de corpos de prova orientados com ângulos de 0 °, 15 °, 30 °, 45 °, 60 °, 75 ° e 90 °. Bucur e Perrin (1989) ainda avaliaram o método de determinar o desvio de grã para árvore em pé, com a utilização do ultrassom. Soma *et al.* (2002), Bucur

(2006) e Bremaud *et al.* (2011) confirmaram que essa propriedade é afetada praticamente pela genética do material e outros fatores.

Nesta pesquisa, o menor valor numérico de desvio de grã foi encontrado para a madeira castanheira, que, aliás, estatisticamente não se diferenciou das madeiras muiracatiara e garapa. Já o maior valor numérico foi encontrado na madeira pequi, estatisticamente igual ao angelim vermelho. Onchieku (2013) afirmou que, para madeira de coníferas, o desvio de grã de 5° (cinco graus) ainda não desqualifica o material quanto à qualidade para estruturas. Não há valores padronizados para folhosas e para todas as madeiras estudadas os valores de desvio de grã foram inferiores a 5 (cinco graus).

De acordo com Pinto e Calil Júnior (2006), quando submetida ao calor, a madeira libera inicialmente vapor de água e gases, perdendo massa de modo uniforme, em um processo denominado pirólise lenta. Ainda que os gases, rapidamente liberados, não ignizem de imediato, uma condição exotérmica é atingida. A temperatura na qual as reações se tornam exotérmicas é considerada em muitas definições como o ponto de ignição da madeira. Ocorrem vários registros desta temperatura: 235°C a 240°C; 232°C a 260°C e 192°C a 220°C. Esta variação se deve ao tempo e à temperatura envolvida na ignição a baixas temperaturas. Esta fase é conhecida como pirólise rápida. Observa-se na Figura 4.2 um comportamento semelhante, para todas as espécies estudadas. A partir de 200°C, há uma queda brusca na curva de massa.

Oliveira (2009) afirma que o teste de gravimetria permite acompanhar possíveis processos de degradação do material em função da temperatura. Foi possível observar na Figura 4.2 que, apesar das propriedades das madeiras variarem entre si, seu comportamento permaneceu semelhante. Carneiro *et al.* (2013) relatam que, com esse método, é possível determinar em qual temperatura o processo de degradação térmica se inicia e quando é mais acentuado, com base na massa da amostra. A partir de 220° fica clara uma mudança de comportamento da madeira. Paula *et al.* (2014) afirmam que: para as hemiceluloses, a transição vítrea é observada na faixa de 150°C a 220°C; para a celulose, a temperatura de transição situa-se entre 200°C e 250°C e para a lignina, temperaturas superiores a 205°C. Irvine (1984) já dizia que o amolecimento dos polímeros é acompanhado de mudanças importantes nas propriedades mecânicas do material, sendo o módulo de elasticidade a principal delas.

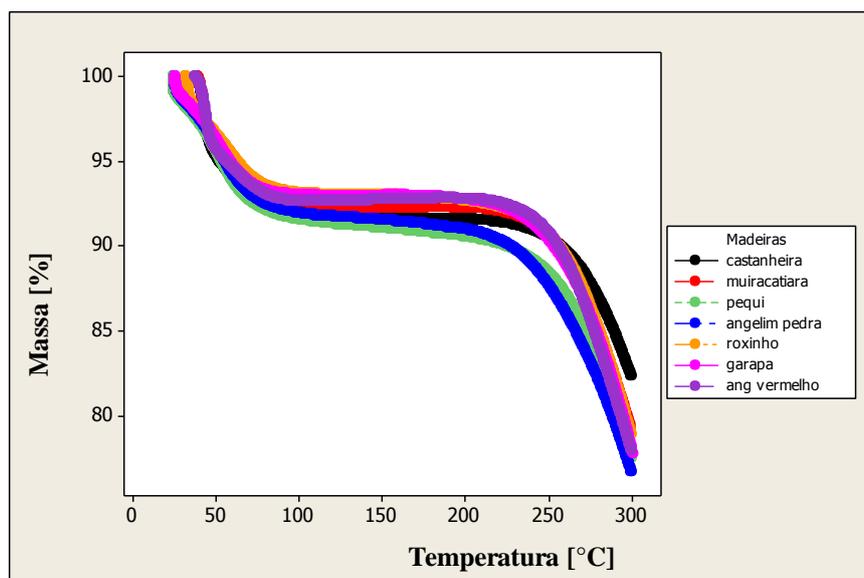


Figura 4.2– Resultados das análises termogravimétricas das madeiras em estudo.

4.2 Ensaios não destrutivos

4.2.1 Ensaio de compressão com utilização do medidor portátil

A partir da inclinação da reta de tensão e deformação longitudinal (Fig. 4.3.a), foi determinado o valor do módulo de elasticidade longitudinal às fibras; 10400 MPa para a madeira de angelim vermelho. Comparando esse valor com o valor médio (15027 MPa) apresentado para essa madeira na Tabela 4.3, pôde-se concluir que, apesar bastante inferior, o medidor de deslocamento portátil foi capaz de capturar a ordem de grandeza da deformação longitudinal no CP. Essa variação pode ser atribuída a grande variabilidade das propriedades da madeira em uma mesma árvore.

Na Figura 4.3.b é mostrado o valor de G_{TL} , determinado a partir da inclinação da reta entre a tensão e a relação proposta por Carrasco (1989). O valor encontrado foi de 850 MPa. Autores como Vásquez *et al.* (2015) encontraram valores de 822 MPa para a madeira castanheira. Também Gonçalves *et al.* (2011) encontraram valores de: 1489 MPa para a madeira garapa; 892 MPa para a cupiúba e 1172 MPa para eucalipto saligna. Os diferentes valores são justificados pela heterogeneidade das madeiras.

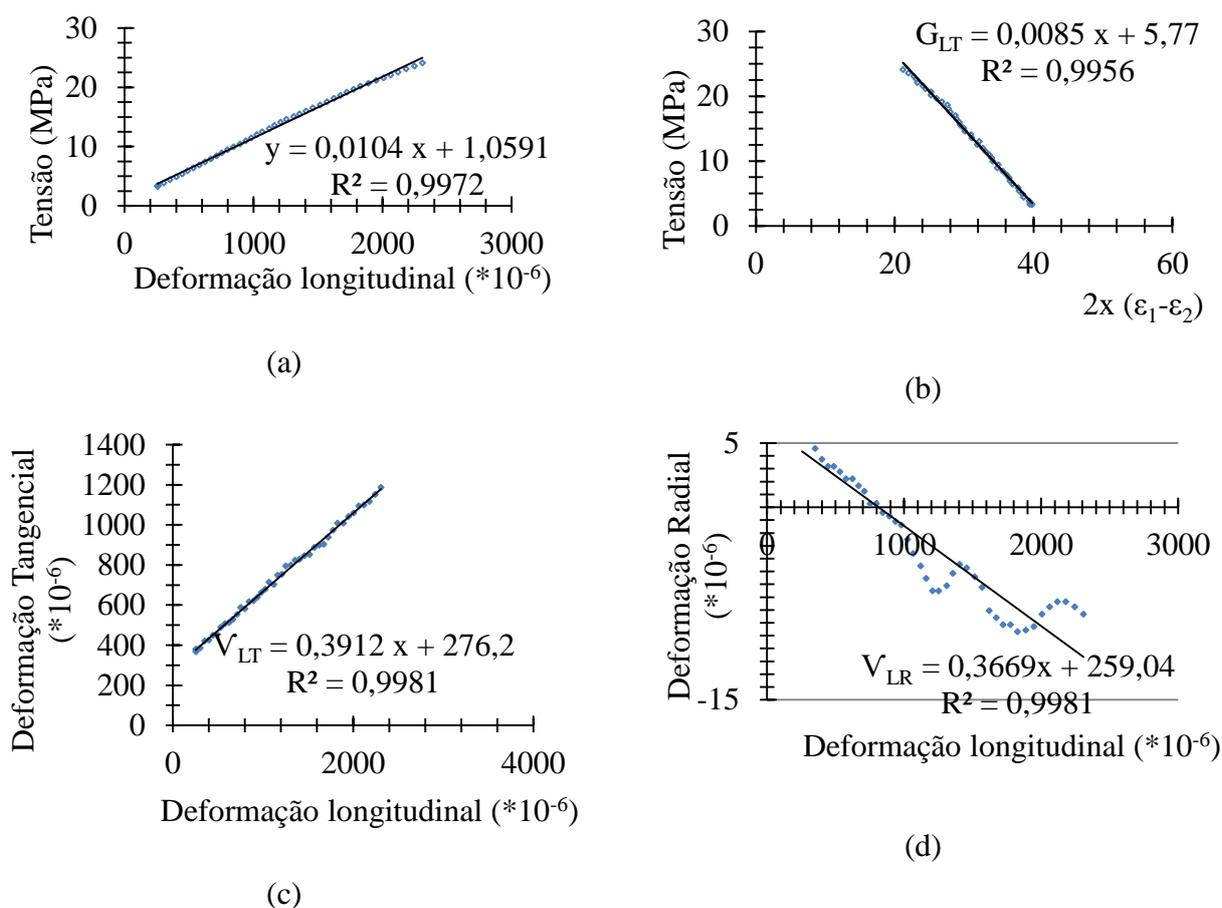


Figura 4.3 – Exemplo dos resultados do ensaio de compressão da madeira angelim vermelho com a utilização do medidor portátil. **(a)** Módulo de elasticidade longitudinal. **(b)** Módulo de elasticidade transversal. **(c)** coeficiente de Poisson Longitudinal Tangencial. **(d)** coeficiente de Poisson Longitudinal Radial.

Na Tabela 4.2 é possível constatar que, de acordo com o teste de Tukey (95% de confiança), os valores do método convencional e do método proposto não variam estatisticamente. Indicando que este método é capaz de determinar, com precisão, o valor do módulo de elasticidade estático para as três direções propostas.

Tabela 4.2– Valores médios dos módulos de elasticidade determinados através dos métodos convencional e proposto

	Método convencional	Método proposto
Média	5095 (A)	6440 (A)
95% CI	(5094,13; 5096,68)	(6438,80; 6441,33)
Nº CPs	60	60

Na Tabela 4.3 foram expostos os valores médios das constantes elásticas, determinados a partir do ensaio de compressão, com a utilização do medidor portátil. Os valores de v_{RT} variaram de 0,30 para a madeira roxinho e 0,38 para as madeiras angelim vermelho e garapa. De acordo com Mascia (1993), o valor médio dessa constante em madeiras folhosas é de 0,71, enquanto afirmam Bodig e Jayne (1993) que, para folhosas de clima temperado, esse valor médio é de 0,67. Ballarin e Nogueira (2003) encontraram o valor médio de 0,70 para a madeira de eucalipto citriodora.

Tabela 4.3 – Valores médios das constantes elásticas, resultantes do ensaio de compressão da madeira angelim vermelho (AV), garapa (G), e roxinho (R), com o uso do medidor portátil

Madeiras	E_L (MPa)	E_R (MPa)	E_T (MPa)	E_{TR} (MPa)	E_{LT} (MPa)	E_{LR} (MPa)	v_{RT} (Ad.)	v_{LR} (Ad.)	v_{LT} (Ad.)	G_{RT} (MPa)	G_{LR} (MPa)	G_{LT} (MPa)	
AV	Média	15027	1471	1331	1732	3456	2198	0,38	0,42	0,57	433	864	549
	D.P.	1965	133	90,26	376,09	419,40	683,93	0,07	0,07	0,07	94,02	104,28	170,98
	C.V.	13,08	9,07	6,78	21,72	12,14	31,12	18,13	17,78	11,92	21,72	12,08	31,12
G	Média	17621	1681	1442	1399	3469	2181	0,38	0,49	0,66	350	867	545
	D.P.	1830	117	83,50	263,00	441,67	312,16	0,22	0,15	0,09	65,75	110,42	78,04
	C.V.	10,39	6,99	5,79	18,80	12,73	14,31	58,87	29,88	12,80	18,80	12,73	14,31
R	Média	16245	1650	1280	1264	3422	1935	0,30	0,51	0,65	316	855	484
	D.P.	3067	242	77,08	245,72	246,96	213,37	0,01	0,13	0,11	61,43	61,74	53,34
	C.V.	18,88	14,68	6,02	19,44	7,22	11,03	35,35	25,57	16,29	19,44	7,22	11,03

D.P. = Desvio padrão; C.V. = Coeficiente de variação (%)

Para v_{LR} , os valores variaram de 0,42 para a madeira angelim vermelho e 0,51 para a madeira roxinho. Mascia (1993) por sua vez, determina o valor médio de 0,47 para madeiras de folhosas e Bodig e Jayne (1993) encontraram o valor de 0,37 para folhosas de clima temperado. Ballarin e Nogueira (2003) acharam o valor médio de 0,23 para a madeira eucalipto citriodora.

Já para o ν_{LT} , o menor valor foi para a madeira angelim vermelho, isto é 0,57 e o maior valor para a madeira garapa, 0,66. Novamente comparando, Mascia (1993) determina o valor médio de 0,47 para madeiras tropicais e Bodig e Jayne (1993) o valor de 0,50 para as denominadas folhosas de clima temperado. E Ballarin e Nogueira (2003) defendem o valor de 0,48 para a madeira eucalipto citriodora. Na verdade, por se tratar de uma característica muito sensível, os valores não devem ser comparados com outras espécies que não as mesmas deste trabalho, já que a variação existe, até mesmo, dentro da mesma espécie; portanto, fácil é supor que certamente haverá entre espécies. Embora Bodig e Jayne (1982) digam que para ter uma melhor precisão na determinação dos valores do coeficiente de Poisson a alternativa seja aumentar as dimensões dos CPs, surge outro problema: a dificuldade de orientação dos anéis de crescimento.

Para efeito de comparação, podem-se contrapor dois trabalhos do mesmo autor, Mascia (1993) e Mascia e Lahr (2006). No primeiro trabalho o autor afirma que os valores médios para folhosas são de 0,71, 0,47 e 0,47 para ν_{RT} , ν_{LR} e ν_{LT} , respectivamente. No entanto, Mascia e Lahr (2006) mostraram valores de 0,43, 0,51 e 0,78 para os mesmos Coeficientes de Poisson da madeira jatobá; valores estes mais próximos aos encontrados na presente tese.

Os valores de módulo de deformação transversal (G) também foram determinados para as madeiras angelim vermelho, garapa e roxinho. Os valores de G_{RT} variaram de 316 MPa para a madeira roxinho e 433MPa para a madeira angelim vermelho. Na qualidade G_{LR} , os valores variaram de 855MPa para a madeira roxinho e 867MPa para a madeira garapa. Já para G_{LT} , os valores variaram de 484MPa para a madeira roxinho e 549MPa para a madeira angelim vermelho. Mascia e Lahr (2006) encontraram, para a madeira de jatobá, os valores de 496 MPa, 1024 MPa e 1450 MPa para G_{RT} , G_{LR} e G_{LT} , respectivamente.

4.2.2 Ensaio com a propagação de ondas ultrassônicas

Na Tabela 4.4 foram mostrados os valores médios das constantes elásticas da madeira garapa, resultantes do ensaio com a propagação de ondas ultrassônicas, comparados ao trabalho de Gonçalves *et al.* (2014). Vale ressaltar, que os valores de Poisson obtiveram muitas diferenças entre eles. Pelo que mostrou Bucur (2006), esse fenômeno já poderia ser esperado, por se tratar de um material heterogêneo. A autora apresentou, para a mesma espécie, valores diferentes, apenas variando a peça ou a frequência do transdutor.

Tabela 4.4- Valores dos parâmetros elásticos determinados para a madeira garapa, comparados aos resultados encontrados por Gonçalves *et al.* (2014)

Parâmetros elásticos	Gonçalves <i>et al.</i> (2014).	Resultados experimentais	Variação (%)
E_L [MPa]	15705	15993	1,83
E_R [MPa]	2483	2619	5,48
E_T [MPa]	1626	1908	17,34
G_{TR} [MPa]	568	552	2,82
G_{TL} [MPa]	1425	804	43,58
G_{LR} [MPa]	1897	1918	1,11
ν_{RL} [ad.]	0,046	0,14	204,35
ν_{TL} [ad.]	0,046	0,10	117,39
ν_{LR} [ad.]	0,295	0,87	194,92
ν_{TR} [ad.]	0,351	0,42	19,66
ν_{LT} [ad.]	0,438	0,84	91,78
ν_{RT} [ad.]	0,537	0,57	6,15

Na Tabela 4.5 foram apresentados os valores médios das constantes elásticas resultantes do ensaio com propagação de onda ultrassônica, para seis espécies estudadas. É necessário ressaltar que a madeira muiracatiara não foi analisada, por possuir defeito interno, impossibilitando a preparação do CP em forma de poliedro. Bucur (1995) também determinou todas essas constantes para madeiras americanas.

Os valores de E_L , E_R e E_T foram de 12307 [MPa], 2908[MPa], e 2296[MPa] para a madeira angelim vermelho, o que pode ser comparado com os resultados experimentais determinados na Tabela 4.3, em que os valores foram de 15027 [MPa], 1471 [MPa] e 1331 [MPa] respectivamente. A madeira de garapa, conforme mostrado na Tabela 4.5 teve valores de 15993 [MPa], 2619 [MPa] e 1908 [MPa] para os módulos de elasticidade, longitudinal, radial e tangencial. Podendo ser comparados aos valores mostrados na Tabela 4.3, de 17621 [MPa], 1681 [MPa] e 1442 [MPa] para a E_L , E_R e E_T . E também a madeira de roxinho com valores mostrados na Tabela 4.5 de 16260 [MPa], 2493 [MPa] e 1874 [MPa] e 16245 [MPa], 1650 [MPa] e 1280 [MPa] para E_L , E_R e E_T conforme mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.5 – Valores médios das constantes elásticas resultantes do ensaio de ultrassom para seis madeiras estudadas (exceto a madeira muiracatiara).

Madeiras		E _L (MPa)	E _R (MPa)	E _T (MPa)	G _{RT} (MPa)	G _{LT} (MPa)	G _{LR} (MPa)	v _{RL} (Ad.)	v _{TL} (Ad.)	v _{LR} (Ad.)	v _{TR} (Ad.)	v _{LT} (Ad.)	v _{RT} (Ad.)
AP	Média	15404	2438	1619	552	1117	1429	0,13	0,08	0,84	0,28	0,75	0,42
	D.P	738,05	193,50	10,46	14,64	18,43	146,90	0,03	0,03	0,10	0,12	0,24	0,16
	C.V. (%)	4,79	7,94	0,65	2,65	1,65	10,28	25,73	36,14	12,30	42,85	31,85	38,16
AV	Média	12307	2908	2296	739	1345	2282	0,194	0,115	0,825	0,37	0,62	0,47
	D.P	179,22	204,14	73,52	14,15	89,89	206,44	0,03	0,03	0,16	0,02	0,14	0,03
	C.V. (%)	1,46	7,02	3,20	1,91	6,68	9,04	17,19	23,04	18,93	5,04	22,10	5,34
CA	Média	11434	1839	1298	419	955	1178	0,11	0,06	0,70	0,38	0,55	0,54
	D.P	1050,45	123,91	72,71	4,79	44,89	13,83	0,01	0,03	0,03	0,03	0,34	0,02
	C.V. (%)	9,19	6,74	5,60	1,14	4,70	1,17	4,98	49,19	3,93	7,65	60,84	4,26
G	Média	15993	2619	1908	552	804	1918	0,14	0,10	0,87	0,42	0,84	0,57
	D.P	1904,17	187,44	124,27	35,62	14,19	92,27	0,00	0,02	0,04	0,02	0,10	0,03
	C.V. (%)	11,91	7,16	6,51	6,45	1,76	4,81	1,75	15,32	4,09	4,58	11,46	5,08
P	Média	12981	2553	1447	506	859	1216	0,17	0,09	0,88	0,32	0,78	0,56
	D.P	622,72	131,24	25,48	27,76	30,14	304,57	0,01	0,04	0,11	0,01	0,28	0,03
	C.V. (%)	4,80	5,14	1,76	5,49	3,51	25,06	7,09	40,31	12,04	4,10	36,04	4,53
R	Média	16260	2493	1874	630	1171	1892	0,11	0,09	0,73	0,43	0,77	0,58
	D.P	2107,71	33,46	39,67	10,20	8,23	61,56	0,04	0,01	0,16	0,03	0,03	0,05
	C.V. (%)	12,96	1,34	2,12	1,62	0,70	3,25	31,70	16,62	22,21	6,65	3,85	9,44

AP = angelim pedra; AV = angelim vermelho; CA = castanheira; G = garapa; P = pequi; R = roxinho.

E= Módulo de elasticidade (MPa); G = Módulo de elasticidade transversal (MPa) e v = Poisson (Adimensional).

4.2.3 Ensaio com a propagação de ondas de excitação

Na Tabela 4.6 foram mostrados os valores médios do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico (E_{din}) e o módulo de deformação transversal dinâmico (G_{din}) para seis espécies de madeira: angelim pedra; angelim vermelho; castanheira; garapa; pequi e roxinho. Vale destacar, que a relação entre E_{din} e G_{din} variou de 2,86 a 26,14 para as direções longitudinal e longitudinal tangencial, respectivamente. O método mostrou ser eficiente para estimar E_{din} , entretanto, vulnerável para a estimativa de G_{din} . Não há trabalhos que caracterizem as constantes elásticas em CPs de madeira, orientados nas seis direções, por meio da utilização de propagação de ondas de excitação.

A norma NBR 7190 (1997) assume o valor da relação de G e E igual a 20. A partir da tabela 4.6 é possível constatar que este valor é variável com a variação das espécies e a direção de orientação do CP. O maior valor encontrado a partir da propagação de ondas de excitação foi de 26 para o CP da madeira angelim vermelho orientado na direção Longitudinal Tangencial (45°), já para CPs orientados nas três direções principais, os maiores valores foram de 14,75 para o CP de castanheira orientado na direção longitudinal, o valor de 16,44 para o CP de garapa orientado na direção radial, e 12 para o CP da madeira castanheira orientado na direção tangencial.

Em relação os valores calculados a partir do método de propagação da onda de excitação, os valores determinados para a direção longitudinal, variaram de 12,47 GPa para a madeira angelim vermelho, até 20,20 GPa para a madeira roxinho. Assim como observado na Tabela 4.1, apesar de possuir o maior valor de densidade aparente, a madeira de angelim vermelho não tem o valor mais alto para módulo de elasticidade, isso pode ser justificado pelos altos valores de AMF e inclinação de grã quando comparados com as demais madeiras.

Os valores dinâmicos de E_L , E_R e E_T foram de 12,47 [GPa], 2,84 [GPa], e 2,01 [GPa] para a madeira angelim vermelho, o que pode ser comparado com os resultados experimentais determinados na Tabela 4.3, em que os valores foram de 15,03 [GPa], 1,47 [GPa] e 1,33 [GPa] respectivamente. A madeira de garapa, conforme mostrado na Tabela 4.6 teve valores de 17,97 [GPa], 2,63 [GPa] e 1,99 [GPa] para os módulos de elasticidade, longitudinal, radial e tangencial. Podendo ser comparados aos valores mostrados na Tabela 4.3, de 17,62 [GPa], 1,68 [GPa] e 1,44 [GPa] para a E_L , E_R e E_T . E também a madeira de roxinho com valores mostrados

na Tabela 4.6 de 20,20 [GPa], 2,81 [GPa] e 1,93 [GPa] e 16,25 [GPa], 1,65 [GPa] e 1,28 [GPa] para E_L , E_R e E_T conforme mostrado na Tabela 4.3.

Neste parágrafo é comparado os valores calculados a partir da propagação da onda de excitação, como mostrado na Tabela 4.6, com os valores determinados a partir da propagação de ondas ultrassônicas, apresentados na Tabela 4.5. Como apresentado, a partir da propagação de ondas de excitação foram determinados os valores de 12,47 [GPa], 2,84 [GPa], e 2,01 [GPa] para a madeira angelim vermelho, enquanto a partir de ondas ultrassônicas, os valores foram de 12,31 [GPa], 2,91 [GPa], e 2,30 [GPa] para E_L , E_R e E_T (todos dinâmicos). Já para a madeira de garapa, os valores apresentados na Tabela 4.6 foram 17,97 [GPa], 2,63 [GPa] e 1,99 [GPa] e na Tabela 4.5 foram de 15,99 [GPa], 2,62 [GPa] e 1,91 [GPa] para os módulos de elasticidade, longitudinal, radial e tangencial dinâmicos. E para a madeira roxinho, os valores determinados pela propagação de onda de excitação (Tabela 4.6) são 20,20 [GPa], 2,81 [GPa] e 1,93 [GPa] e as calculadas a partir da propagação de ondas ultrassônicas (Tabela 4.5) de 16,26 [GPa], 2,49 [GPa] e 1,87 [GPa].

Tabela 4.6 – Valores médios dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal, dinâmicos, resultantes do ensaio de ondas de excitação para seis madeiras estudadas

Amostra	Edin (GPa)	Gdin (GPa)	E/G	Amostra	Edin (GPa)	Gdin (GPa)	E/G		
AP	L	13,97 (1,82)*(13,03)**	2,46 (1,72)(69,69)	5,68	AV	L	12,47 (0,34)(2,70)	4,36 (0,15)(3,33)	2,86
	LT	2,34 (0,31)(13,22)	0,21 (0,07)(33,99)	11,43		LT	3,66 (0,47)(10,21)	0,14 (0,01)(7,14)	26,14
	LR	2,88 (0,06)(2,00)	0,24 (0,06)(24,03)	12,0		LR	4,63 (0,47)(10,21)	0,19 (0,015)(8,18)	24,63
	RT	1,23 (0,12)(10,06)	0,12 (0,07)(55,19)	10,25		RT	2,78 (0,59)(21,10)	1,00 (0,13)(12,62)	2,78
	R	1,79 (0,06)(3,11)	0,23 (0,16)(67,92)	7,78		R	2,84 (0,39)(13,64)	0,49 (0,08)(15,96)	5,80
	T	1,38 (0,17)(11,93)	0,30 (0,21)(67,75)	4,6		T	2,01 (0,35)(17,39)	0,68 (0,02)(2,94)	2,96
CA	L	15,49 (0,52)(3,37)	1,05 (0,19)(18,12)	14,75	G	L	17,97 (1,64)(9,13)	3,28 (0,11)(3,47)	5,48
	LT	2,05 (0,06)(2,77)	0,13 (0,02)(16,43)	15,77		LT	3,91 (1,97)(14,14)	0,25 (0,62)(34,79)	15,64
	LR	3,47 (0,04)(1,16)	0,25 (0,02)(10,20)	13,88		LR	3,58 (0,88)(24,71)	0,34 (0,25)(73,88)	10,53
	RT	1,07 (0,04)(3,55)	0,12 (0,01)(8,33)	8,92		RT	2,23 (0,01)(0,26)	0,15 (0,02)(10,41)	14,87
	R	1,59 (0,07)(4,12)	0,11 (0,01)(9,09)	14,45		R	2,63 (0,31)(11,76)	0,16 (0,03)(17,67)	16,44
	T	1,08 (0,14)(12,64)	0,09 (0,01)(12,37)	12,0		T	1,99 (0,41)(20,55)	0,16 (0,03)(19,68)	12,44
P	L	13,96 (1,97)(14,14)	1,78 (0,62)(34,79)	7,84	R	L	20,20 (2,81)(13,89)	3,37 (0,33)(9,67)	6,00
	LT	3,57 (1,70)(47,54)	0,21 (0,04)(17,17)	17,00		LT	3,14 (0,41)(12,96)	0,27 (0,10)(36,81)	11,63
	LR	3,46 (1,08)(31,26)	0,26 (0,08)(31,73)	13,31		LR	3,69 (0,55)(14,79)	1,30 (0,05)(4,25)	2,84
	RT	2,03 (0,13)(6,29)	0,15 (0,02)(13,33)	13,53		RT	1,95 (0,18)(9,08)	0,39 (0,05)(12,22)	5,00
	R	2,89 (1,00)(34,66)	0,28 (0,13)(44,41)	10,32		R	2,81 (0,40)*14,29)	0,61 (0,04)(7,15)	4,61
	T	1,56 (0,38)(24,31)	0,29 (0,06)(20,98)	5,38		T	1,93 (0,09)(4,82)	0,48 (0,06)(11,93)	4,03

AP = angelim pedra; AV = angelim vermelho; CA = castanheira; G = garapa; P = pequi; R = roxinho.

Edin = Módulo de elasticidade dinâmico (MPa); G = Módulo de deformação transversal (MPa) e ν = coeficiente de Poisson (adim.).

*Desvio padrão. **Coeficiente de variação.

Na Figura 4.4 são apresentados os valores de módulo de elasticidade dinâmico e módulo de deformação transversal dinâmicos, de acordo com as seis orientações. É possível observar que as maiores variações de E_{din} e G_{din} ocorreram na direção longitudinal, chegando a um coeficiente de variação de quase 70%,

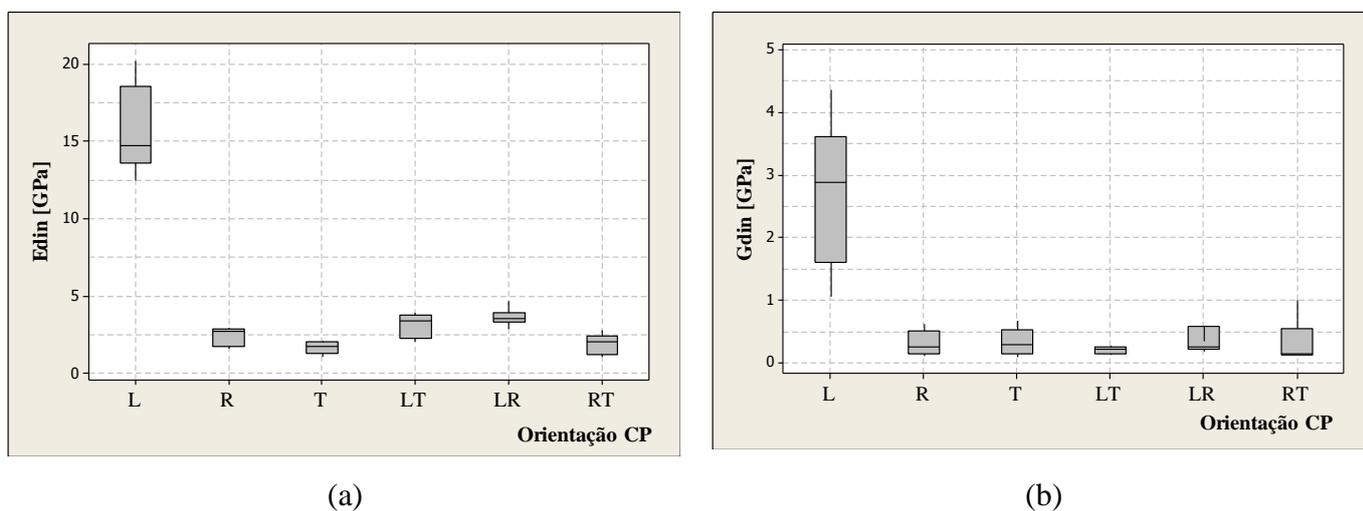


Figura 4.4 – Valores resultantes do ensaio de tensão Sonelastic. **(a)** Módulo de elasticidade dinâmico. **(b)** Módulo de deformação transversal.

4.2.4 Ensaio com a propagação de ondas de excitação sob elevadas temperaturas

A partir do aparelho Sonelastic com elevadas temperaturas, foi possível estimar os valores de módulo de elasticidade longitudinal dinâmico e do módulo de deformação transversal das madeiras. Como forma de exemplificação, a Figura 4.5 mostra os valores médios de E_{din} e de G_{din} e suas respectivas perdas de massa (determinada pelo ensaio de termogravimetria), à medida que a temperatura aumenta para a madeira angelim vermelho. Wood Handbook (2010) afirma que a velocidade de propagação da onda é reduzida com o aumento da temperatura e, por consequência, há uma diminuição do seu módulo de elasticidade. Isto se confirmou com a resposta encontrada, conforme está demonstrado na Figura 4.5. Na mesma Figura 4.5, pôde ser constatado que para E_{din} e G_{din} foi possível determinar e avaliar a tendência de queda dos valores, quando a madeira foi submetida a elevadas temperaturas. No entanto, na determinação de G_{din} , foi possível perceber uma variação mais acentuada na queda, visto que a 25°C o valor

de G_{din} foi de 3,86 GPa, enquanto a 50°C esse valor já caiu para 0,20 GPa, ou seja, restaram apenas cerca de 5% do valor inicial.

Em contrapartida, quando se considerou: a 100°C o valor foi de 1,97 GPa (51%); a 150°C de 1,39 GPa (36%); a 200°C de 1,59 GPa (41%) e a 235°C essa queda pontuou 0,59 GPa (15,28%). Disso é possível concluir que, apesar de mostrar a queda dos valores de G_{din} , quando se submete a madeira a elevadas temperaturas, esse método não se mostrou tão eficiente, por haver muita variação nos resultados.

Wood handbook (2010) e Moraes (2009) mostraram o efeito negativo que a temperatura tem no módulo de elasticidade de madeiras duras e macias. Carrasco *et al.* (2016) afirmaram que, para a madeira eucalipto, submetida a até 120°C, existe uma diminuição linear não muito acentuada, em torno de 8%. Já de 120°C até 200°C a diminuição também é linear, porém, bastante acentuada, chegando a 38%. É possível observar na Figura 4.5 que, para a temperatura de 25°C, o valor de E_{din} foi 8,18 GPa; e, quando a madeira angelim vermelho foi submetida a elevadas temperaturas, houve a diminuição desse valor: a 50°C o valor de E foi 8,05 GPa (98%); a 100°C foi 7,18 GPa (88%); a 150°C foi 4,88 GPa (60%); a 200°C foi 5,67 GPa (69%) e a 235°C o valor se reduziu para 4,51 GPa (55%).

Foi notável que, assim como nos estudos de Carrasco *et al.* (20116), para a madeira angelim vermelho exposta a até 100°C, o módulo de elasticidade diminuiu de uma forma não muito acentuada, isto é 12%. No entanto, quando elevada a 150°C, já foi possível perceber a queda abrupta do valor do módulo de elasticidade, alcançando perda de 40%, bem como quando a 235°C atingiu a marca de 45% de perda. Paula *et al.* (2014) afirmam que, para as hemiceluloses, a transição vítrea é observada na faixa de 150°C a 220°C. Isso pode justificar os aumentos dos valores de E_{din} e G_{din} sob as temperaturas de 150°C para 200°C nesta experiência.

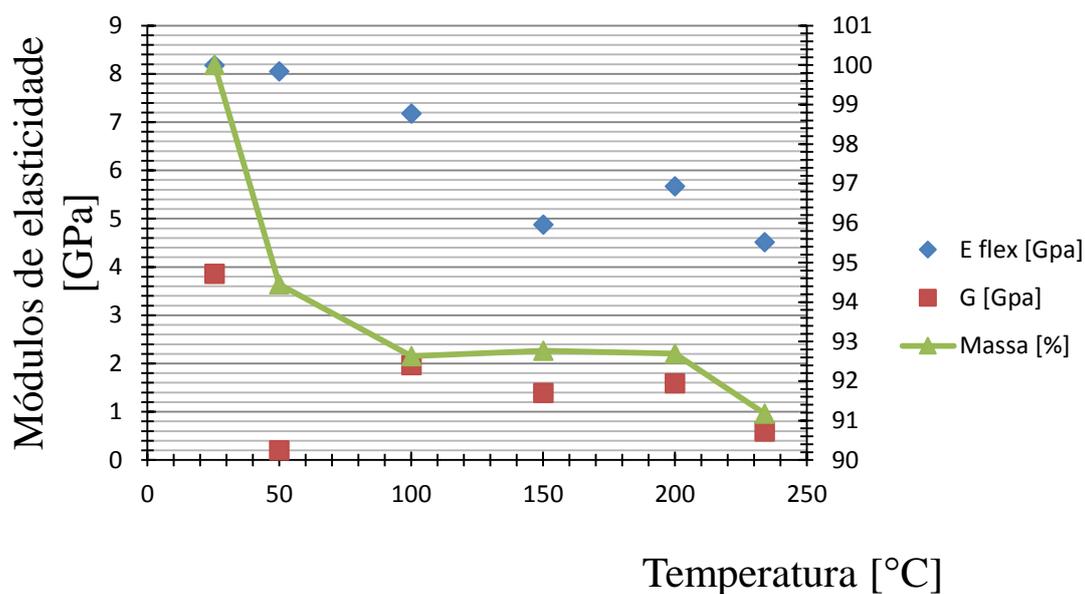
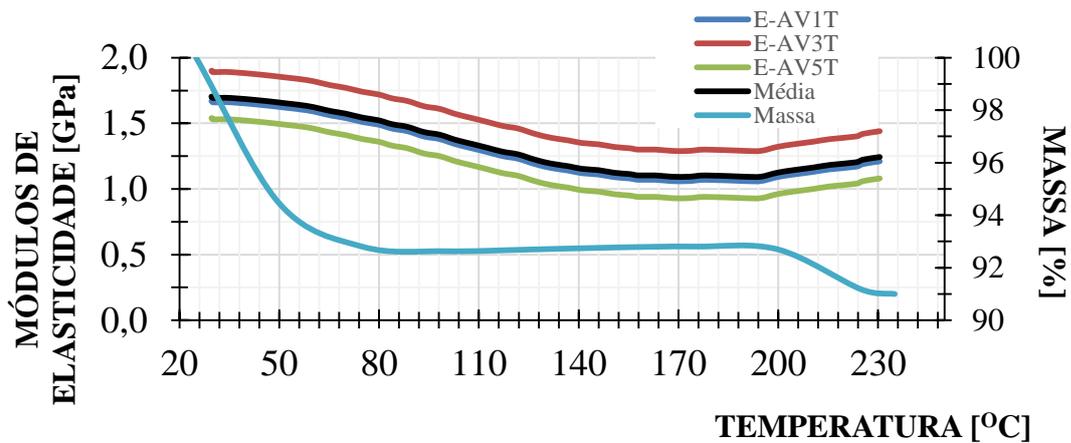
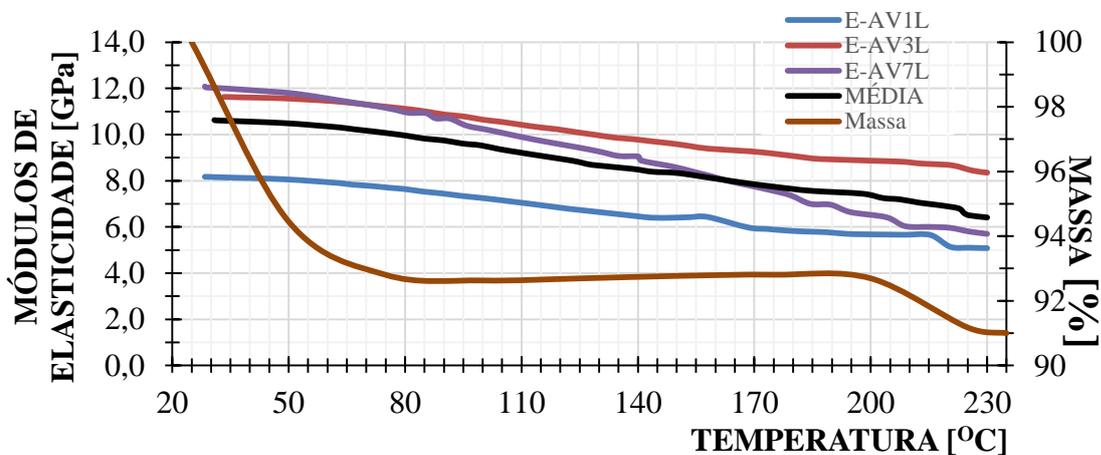


Figura 4.5– Valores resultantes do ensaio de propagação de ondas de excitação em madeiras de angelim vermelho submetidas a elevadas temperaturas.

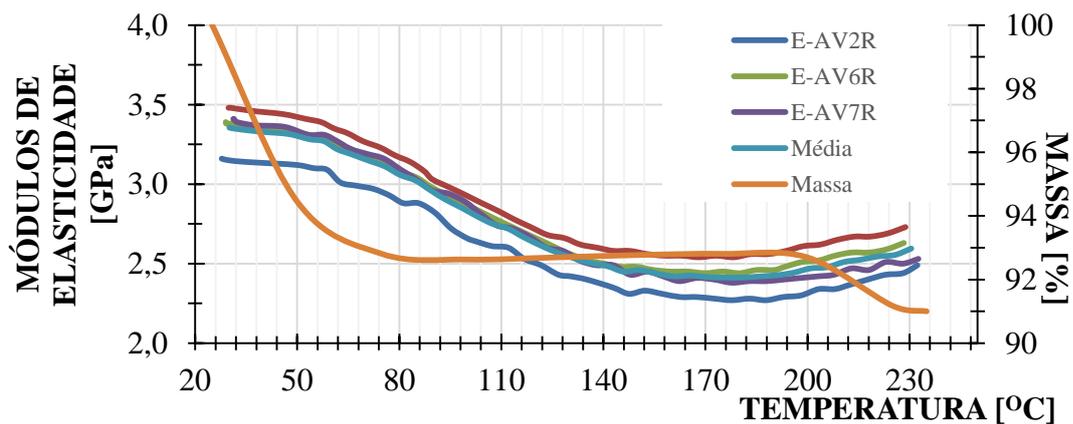
Para melhor detalhar os resultados deste ensaio com propagação de ondas de excitação sob altas temperaturas, na Figura 4.6 (a-f) é possível constatar a diminuição do módulo de elasticidade dinâmico em cada uma das seis direções e no decorrer do aumento da temperatura.



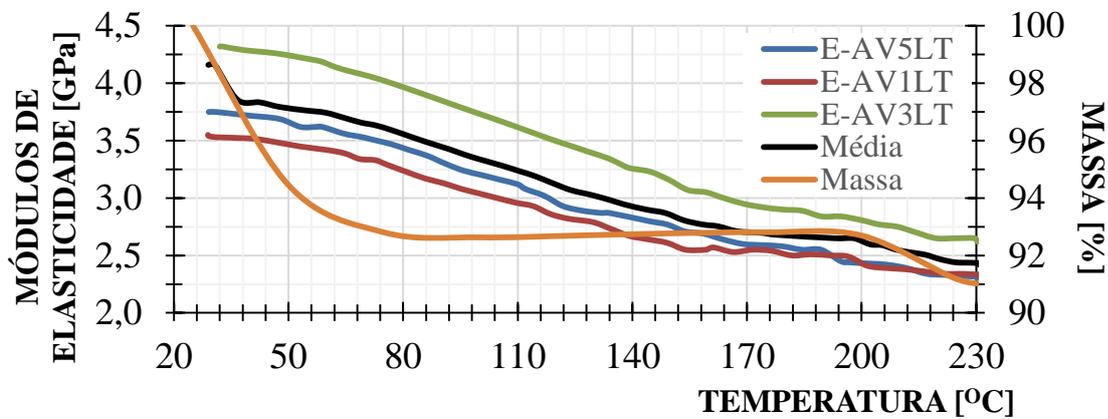
(a)



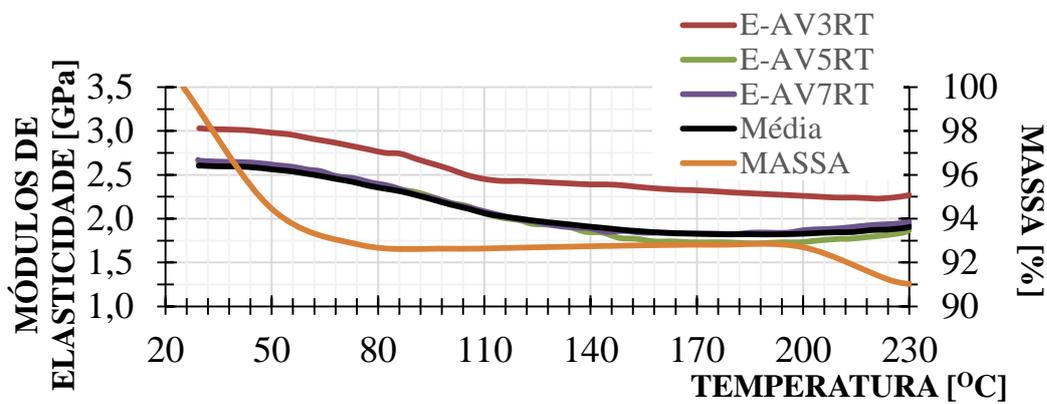
(b)



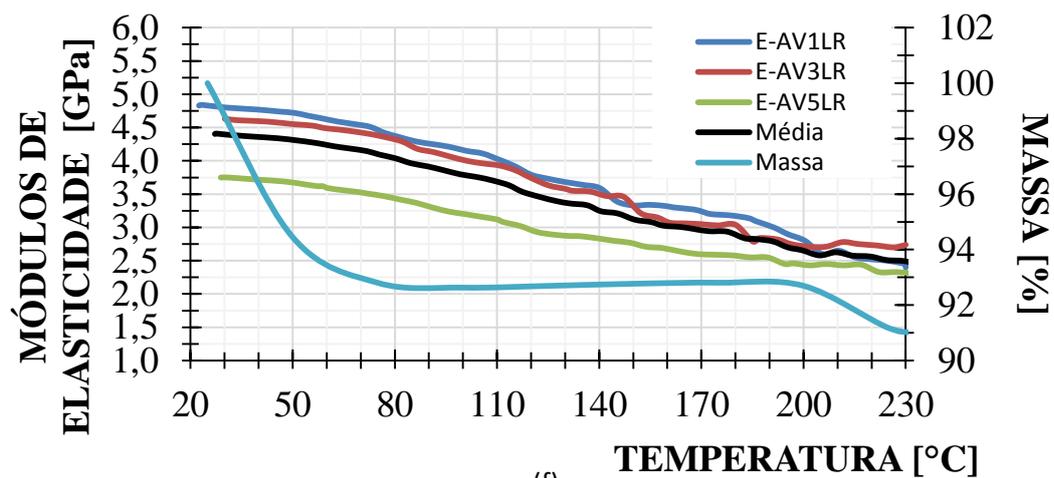
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.6 - Variação do módulo de elasticidade dinâmico e da massa do CP com o acréscimo de temperatura. (a) Direção tangencial; (b) Direção longitudinal às fibras, (c) Direção Radial; (d) Direção Longitudinal Tangencial; (e) Direção Radial Tangencial e (f) Direção Longitudinal Radial.

CONCLUSÃO

Para que a conclusão de uma pesquisa seja feita de maneira clara, para a autora parece necessário resgatar os caminhos traçados (objetivos específicos) para se alcançar o objetivo geral da investigação.

Esta tese apresentou como percurso a ser trilhado:

- Analisar a madeira de cada espécie escolhida quanto ao ângulo microfibrilar e grã. Estes foram caracterizados e são utilizados não apenas para entender o comportamento da propagação da onda, como também para aumentar o banco de dados sobre as madeiras tropicais;
- Desenvolver um medidor de deslocamento portátil para ser utilizado no ensaio de compressão e este foi feito, gerando economia de tempo, de aporte financeiro e, sobretudo, mostrando a eficiência desta inovação;
- Determinar a matriz das constantes elásticas de cada espécie selecionada, através de ensaios de compressão. Realizados os ensaios, foi possível afirmar, com base nos valores disponíveis para outras espécies, que os valores das constantes elásticas determinados pelo método de compressão e com a utilização do medidor portátil estão de acordo com a literatura. Ainda que, apesar de poucos trabalhos que caracterizam as três direções principais da madeira, os resultados dos módulos de elasticidade longitudinal para as sete espécies estão de acordo com os valores disponíveis na literatura;
- A norma estabelece a utilização de Módulo de elasticidade normal à fibra, não diferenciando os planos tangencial e radial. Foi possível constatar que a variação entre os dois planos é pouca, e o que justifica essa simplificação.
- Estimar a matriz das constantes elásticas de cada espécie que compõe o *corpus*, através de ensaios não destrutivos (por propagação de ondas ultrassônicas e de excitação) e assim foi possível observar que os valores de E e G, determinados por meio dos dois métodos de propagação da onda estão de acordo com a literatura. Sem dúvida há a necessidade de mais

estudos para determinar o coeficiente de Poisson, a partir da propagação de ondas ultrassônicas e de excitação;

- Estimar a matriz de constantes elásticas de espécies florestais brasileiras selecionadas, através de ensaios não destrutivos, sob elevadas temperaturas. Feito desta forma, é constatável que o módulo de elasticidade longitudinal da madeira angelim vermelho, determinado com a utilização do método de propagação da onda de excitação submetida a elevadas temperaturas se mostrou eficiente. Já para a estimativa do módulo de elasticidade transversal, G e Poisson, o método precisa de mais estudos;
- Correlacionar os valores das constantes elásticas determinadas através de ensaios não destrutivos e sob elevadas temperaturas com a análise termogravimétrica das madeiras selecionadas no *corpus*. Em decorrência dessa ação, é verossímil concluir que o comportamento das madeiras é semelhante quando estas são submetidas a elevadas temperaturas;

Como se vê, o caminho desbravado nesta tese permitiu a autora alcançar o objetivo geral desta pesquisa, isto é, foi possível determinar as constantes elásticas do material de espécies de madeira tropical, por meio de suas propriedades elásticas em temperaturas ambiente e elevada, realizando ensaios mecânicos e não destrutivos e considerando-as material ortotrópico.

Tendo como referência os estudos disponíveis na literatura, não foi difícil concluir que realmente são poucos os trabalhos que caracterizam as constantes elásticas das madeiras brasileiras e que, quando se especifica as madeiras referenciadas na tese, não há pesquisa que as caracterizem, com exceção da espécie garapa, que foi investigada tendo como base o princípio de propagação de ondas ultrassônicas.

Sendo assim, é possível afirmar que, apesar de a pesquisa ter abrangido um pequeno número de espécies de madeiras tropicais, sobretudo diante da exuberância da flora nacional, este trabalho já compõe um pequeno banco de dados. No entanto, o que se espera é que sirva de incentivo e de base para futuros trabalhos que objetivem determinar as constantes elásticas de madeiras tropicais.

Como propostas, a autora sugere que sejam feitas equações da velocidade de propagação e parâmetros influenciadores da propagação dessa onda, como porosidade, proporção de fibras, e até mesmo dos próprios AMF e desvio de grã. Para isso, é recomendável que se estude madeiras com densidades semelhantes, e desvios de grã e AMF bem diferentes.

REFERÊNCIAS

- AGUILERA, A.; VEJA, M.; MÉAUSOONE, P. J. Effects of grain angle on the amplitudes of acoustic emission and surface roughness in wood machining. *Wood Sci Technol* (2007) 41:373–381.
- ALVES, R. C.; MANTILLA, J. N. R.; BREMER, C. F.; CARRASCO, E. V. M. Application of Acoustic Tomography and Ultrasonic Waves to Estimate Stiffness Constants of Muiracatiara Brazilian Wood. *Bioresources* (Raleigh, N.C) **JCR**, v. 10, p. 1845-1856, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. ASTM designation E1876 – 09, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard test method of for specific gravity of wood based materials. ASTM designation D 2395, 1998.
- ANDO, K.; MIZUTANI, M.; TANIGUCHI, Y.; YAMAMOTO, H. Time dependence of Poisson's effect in wood III: asymmetry of three-dimensional viscoelastic compliance matrix of Japanese cypress. *J Wood Sci* (2013) 59:290–298. DOI 10.1007/s10086-013-1333-7.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Ensaio não destrutivo – Ultrassom: classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas (Projeto NBR 58 000 10001). Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL (ABTCP). Normas técnicas. São Paulo, 1974. 6p.
- ATHERTON, G.H. Preliminary study of proportional limit as a predictor of ultimate strength in bending. *Oregon. Forest. Prod. J.* v. 30, n. 1, p. 47-53. 1980.
- BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultrassom. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.
- BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Caracterização elástica da madeira de *Eucalyptus citriodora*. *CERNE* (UFL), Lavras, v. 09, n.n.1, p. 69-83, 2003.
- BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R.; BUCUR, V. Dispersão de ondas de ultra-som em peças de madeira serrada de *Eucalyptus* em função da geometria. *Scientia Forestalis*, n. 63, p. 235-240, jun. 2003.
- BINDZP, I.; SAMSON, M. New formula for influence of spiral grain on bending stiffness of wooden beams. *Journal of structural engineering*, 1995.

BLOMBERG, J.; PERSSON, P. Swelling pressure of semi-isostatically densified wood under different mechanical restraints. *Wood Sci Technol* (2007) 41:401–415. DOI 10.1007/s00226-006-0118-1.

BODIG J, JAYNE B. *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold; 1982.

BODIG J.; GODMANN, J. R. Prediction of elastic parameters for wood. *Wood Sci*. 5:249-264.1972.

BOLZA, E.; KLOOT, N. M. The mechanical properties of 174 Australian timbers. *Div. For. Prod. CSIRO Melbourne Tech. Paper*. n. 25. 1963.

BUCUR V, PERRIN JR (1989) Slope of grain ultrasonic measurements in living trees and timber. *Holz Roh Werkst* 47(2):75

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

BUCUR, V. An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. *Ultrasonics*, v. 21, p. 116-126. 1983.

BUCUR, V. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Sci. Technol*. 18:255-265. 1984.

BUCUR, V.; BOHNKE, I. Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. *Ultrasonics*, v. 32, n. 5, p. 385-390, 1994.

CABRERO, J.M.; HEIDUSCHKE, A.; HALLER, P. Analytical assessment of the load-carrying capacity of axially loaded wooden reinforced tubes. *Composite Structures* 92 (2010) 2955–2965.

CALEGARI, L.; STANGERLIN, D. M.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; CARMO, P. I. O.; DA SILVA FILHO, L. C. P. Avaliação de alguns fatores influentes na velocidade ultra-sônica na madeira. *FLORESTA*, Curitiba, PR, v. 38, n. 4, p. 607-615, out./dez. 2008.

CALEGARI, L.; STANGERLIN, D.M.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; LONGHI, S. J.; CARMO, P. I. O.; SILVA FILHO, L. C. P.; GATTO, D. A. Monitoramento do teor de umidade de madeiras de *Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* W. Hill exMaiden, sob diferentes temperaturas de secagem, através do ultra-som. *Ciência Florestal*, v. 17, n. 4, p. 399-408, 2007.

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

CAO, Y.; JIANG, J.H.; LU, J.X. Huang RF (2012) Effect of steam-heat treatment on mechanical properties of Chinese fir. *Bioresources* 7:1123–1133.

CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, R. C. , CASTRO, R. V. O.; CASTRO, A. F. N. M.; PIMENTA, A. S.; PINTO, E. M.; ALVES, I. C. N. Estudo da decomposição térmica da madeira de oito espécies da região do Seridó, Rio Grande do Norte. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.37, n.6, p.1153-1163, 2013.

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

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

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

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

COMMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS – COPANT. Descripción de características generales, macroscópicas de las maderas angiospermas dicotiledoneas. v.30. p.1-19. 1974.

CURRY, W. T.; TORY, J. R. The relation between the modulus of rupture and modulus of plasticity of timber. Aylesbury, Bucks Building Research Establishment, Princess Risborough Laboratory, Current paper. n. 30. 1976.

DAHMEN, S.; KETATA, H.; GHOZLE, M. H. B.; HOSTEN, B. Elastic constants measurement of anisotropic Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave. *Ultrasonics* 50 (2010) 502–507.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. R.; SOUZA, M. R. Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. *Acta Amazônica*. Manaus, v. 40 n. 2, 2010.

DIAZ, C. A.; AFRIFAH, K. A.; JIN, S.; MATUANA, L. M. Estimation of modulus of elasticity of plastics and wood plastic composites using a Taber stiffness tester. *Composites Science and Technology* 71 (2011) 67–70.

DRAKE, G.; BERRY, M.; SCHROEDER, D. Effect of cold temperatures on the shear behavior of glued laminated beams. *Cold Regions Science and Technology* 112 (2015) 45–50.

FEIO, A. O.; LOURENÇO, P. B. Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos. 2005. In: Encontro sobre a madeira e suas aplicações nobres. Bem Utilizar a Madeira. 2005.

FEIO, A. O.; MACHADO, J. S.; LOURENÇO, P. B. Caracterização de propriedades da madeira de castanheira na direção perpendicular ao fio – recurso a técnicas destrutivas e não destrutivas de ensaio. 2004.

FRANCOIS, M. (1995) Identification des symmetries matérielles de matériaux anisotropes. (Identification of the material symmetries of anisotropic materials), PhD Thesis, Université Paris 6, LMT, Cahen, p 137.

GALLINA, R. *Os extensômetros elétricos resistivos: evolução, aplicação e tendências*. Pós graduação Lato Sensu em Mecatrônica. Universidade São Judas Tadeu. 2003.

GARAB, J.; KEUNECKE, D.; HERING, S.; SZALAI, J.; NIEMZ, P. Measurement of standard and off-axis elastic moduli and Poisson's ratios of spruce and yew wood in the transverse plane. *Wood Sci Technol* (2010) 44:451–464. DOI 10.1007/s00226-010-0362-2.

GARRIDO, N., “Caracterização do comportamento ao corte da madeira através do ensaio offaxis”, Tese de Mestrado, UTAD, 2003.

GERHARDS, C.C. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. *Wood Fiber*, 14(1), (1982):4–36.

GOMIDE, J.L.; DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. *O Papel*. São Paulo, v.47, n.8, p.36-38, 1986.

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

GONÇALVES, R.; BARTHOLOMEU, A. Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira de *Eucalyptus citriodora* E *Pinus elliottii*. *Construções rurais e ambiência*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.2, p.269-274, 2000.

GONÇALVES, R.; DA COSTA, O. L. Aplicação de ultra-som no acompanhamento da secagem de peças de madeira. 6ª Conferência sobre tecnologia de equipamento. 2002.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. T. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood Sci Technol* (2014) 48:269–287. DOI 10.1007/s00226-013-0598-8.

GUO, F.; HUANG, R.; LU, J.; CHEN, Z.; CAO, Y. Evaluating the effect of heat treating temperature and duration on selected wood properties using comprehensive cluster analysis. *J Wood Sci* (2014) 60:255–262. DOI 10.1007/s10086-014-1403-5.

HERING, S.; KEUNECKE, D.; NIEMZ, P. (2012) Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood. *Wood Sci Technol* 46:927–938.

IAWA COMMITTEE. List of microscopic features for hardwood identification, with an appendix on non-anatomical information. *IAWA Bulletin*, Leiden, v.10, n.3, p. 219-332. 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS IBAMA. Madeiras Tropicais Brasileiras. Brasília: IBAMA-LPF, 1997. 152p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT Fichas de Características das Madeiras Brasileiras. 2a ed. São Paulo: IPT, 1989a. 418p. (publicação IPT No 1791).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT Sistema de Informações de Madeiras Brasileiras. São Paulo: IPT, 1989b. 291p. (Relatório No 27 078).

ISO 3130. Wood determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Switzerland. 1975.

JAKIELA, S.; BRATASZ, L.; KOZŁOWSKI, R. Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions. *Wood Sci Technol*, v. 42, p. 21-37. 2008.

KENNEDY, E. I. Strength and related properties of wood grown in Canada. Dept. of Forestry Publications. n. 1104, Ottawa. 1965.

KEUNECKE, D.; SONDEREGGER, W.; PERETEANU, K.; LUTHI, T.; NIEMZ, P. Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood Sci Technol* (2007) 41:309–327. DOI 10.1007/s00226-006-0107-4.

KEUNECKE, D.; STEFAN HERING, S.; NIEMZ, P. Three-dimensional elastic behaviour of common yew and Norway spruce. *Wood Sci Technol* (2008) 42:633–647. DOI 10.1007/s00226-008-0192-7.

KOHLHAUSER, C.; HELLMICH, C. Determination of Poisson's ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of combined ultrasonic-mechanical testing of normal stiffnesses: Application to metals and wood. *European Journal of Mechanics A/Solids* 33 (2012), 82 - 98.

KRETSCHMANN, D.E.; GREEN, D.W. (1996) Modeling moisture content mechanical property relationships for clear southern pine. *Wood Fiber Sci* 28:320–337.

LARTIGAU, J.; COUREAU, J.; MOREL, S.; GALIMARD, P.; MAURIN, E. Effect of temperature on the mechanical performance of glued-in rods in timber structures. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 57 (2015) 79–84.

LATORRACA, J. V. F. *et al.* Efeito da umidade da madeira na propagação de ondas mecânicas. *Floresta e Ambiente*. v. 4, n. 18, out.-dez., p. 451-459. 2011.

LEE IDG (1958) A nondestructive method for measuring the elastic anisotropy of wood using an ultrasonic pulse technique. *J Int Wood Sci* 1(1):43–57

LG STEEL. Em Aço de Médio e Alto carbono - F - 436 - aço 1045 / temp. 38/45 hrc. 2015. Disponível em: <http://lgsteel.com.br/arruela-lisa-em-aco-medio-alto-carbono/436-aco.htm>. Acesso em 02/06/2015.

LIMA, J. T. Clonal variation in the solid wood properties of Eucalyptus. Bangor, 1999. 276f. University of Wales. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira).

LIMA, J. T.; BREESE, M. C.; CAHALAN, C. M. Variation in microfibril angle in *Eucalyptus* clones. *Holzforschung*, Berlin, v. 58, p. 160-166, 2004.

LONGO, R.; DELAUNAY, T.; LAUX, D.; EL MOURIDI, M.; ARNOULD, O.; LE CLÉZIO, E. (2012) Wood elastic characterization from a single sample by resonant ultrasound spectroscopy. *Ultrasonics* 52:971–974.

LUIKOV, A.V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies, *Int. J. Heat Mass Transfer* 8 (1975) 1–14.

MASCIA, N. T.; LAHR, F. A. R. Remarks on Orthotropic Elastic Models Applied to Wood. *Materials Research*. Vol. 9, No 3, 2006.

MASCIA, N. T.; NICOLAS, E. A. Determination of Poisson's ratios in relation to fiber angle of a tropical wood species. *Construction & Building Materials*, v. 41, p. 691-696, 2013.

MASCIA, N.; VANALLI, L. Evaluation of the coefficients of mutual influence of wood through off-axis compression tests. *Construction & Building Materials*, v. 30, p. 522-528, 2012.

MASCIA, N.T. Concerning wood anisotropy (Considerações a respeito da anisotropia na madeira). Ph.D. thesis, Engineering School of São Carlos–USP, Brazil (In portuguese); 1991.

MINÁ, A. J. S. *et al.* Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 65, p. 188-196, jun. 2004.

MIZUTANI, M.; ANDO, K. Influence of a wide range of moisture contents on the Poisson's ratio of Wood. *J Wood Sci* (2015) 61:81–85. DOI 10.1007/s10086-014-1438-7.

MORAIS, J.J. Comportamento Mecânico Não-Linear da Madeira. ICETA/UTAD. Universidade de Trás os Montes e Alto Douro. 2000.

MOURIDI, M.; LAURENT, T.; BRANCHERIAU, L.; ARNOULD, O.; FAMIRI, A.; HAKAM, A.; JOSEPH GRIL, J. Searching for material symmetries in the burr wood of thuja by a direct contact ultrasonic method on spherical samples. *Maderas.Ciencia y tecnología* 13(3): 285-296, 2011. DOI 10.4067/S0718-221X2011000300004.

NARUSE, K. Estimation of shear moduli of wood by quasi-simple shear tests. *J Wood Sci* (2003) 49:479–484.

NICOLAS, E. A. ; MASCIA, N. T.; TODESCHINI, R. Ensaios uniaxiais e biaxiais para avaliação de critério de resistência (Tsai-Wu) de materiais anisotrópicos para a madeira. Revista Minerva, v. 6, p. 107-116, 2009.

NOCETTI, M.; BRUNETTI, M.; BACHER, M. Effect of moisture content on the flexural properties and dynamic modulus of elasticity of dimension chestnut timber. Eur. J. Wood Prod. (2015) 73:51–60. DOI 10.1007/s00107-014-0861-1.

OLIVEIRAI; F. G. R.; MILLERII, 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, p. 141-145, 2006.

OLIVEIRA, Nisar Rocha de. Supressão do ruído de rolamento superficial utilizando a transformada Curvelet. 2009. 82 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

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

OZYHAR, T.; HERING, S.; SANABRIA, S.J.; NIEMZ, P. (2013) Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. Wood Sci Technol 47:329–341.

PANG, S. Moisture content gradient in softwood board during drying: simulation from a 2-D model and measurement, Wood Sci. Technol. 30 (1996) 165–178.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.567-576, 2013.

PINTO, E. M.; Carlito Calil Jr. . Estudo Teorico e experimental sobre a degradação termica da madeira de *Eucalyptus* de uso estrutural exposta ao fogo. Revista Minerva, v. 3, p. 131-140, 2006.

QING, H.; MISHNAEVSKY, L. JR. (2010) 3D multiscale micromechanical model of wood: from annual rings to microfibrils. Int J Solids Struct 47:1253–1267.

RAMALHO, R.S. O uso de macerado no estudo anatômico de madeiras. Viçosa, MG: UFV, 4p, 1987.

REITERER, A.; STANZL-TSCHEGG, S.E. (2001) Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain. Mech Mater 33:705–715.

RIGGIO, R.; ANTHONY, R. M.; AUGELLI, F.; KASAL, B.; LECHNER, T.; MULLER, W.; TANNERT, T. In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques. Materials and Structures (2014) 47:749–766.

ROSS, R.J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. *Forest Products Journal*, Madison, US, v. 48, n. 1, p. 14-19, 1998.

SANDOZ, J. L. Triage et fiabilité de bois de construction. 186p. Tese (Doutorado em Sciences Techniques) – Departamento de Génie Civil, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Suisse. 1989.

SANTANA, M. A. E.; OKINO, E.Y. A. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species. *Holzforschung*, Vol. 61, pp. 469–477, 2007.

SASAKI, Y.; HASEGAWA, M. Effect of anisotropy on acoustoelastic birefringence in wood. *Ultrasonics* 46 (2007) 184–190. doi:10.1016/j.ultras.2007.01.009.

SCHNIEWIND, A. P.; BARRETT, J. D. Wood as a linear orthotropic viscoelastic material, *Wood Sci. Technol.* 6(1), 43–57 (1972).

SEBERA, V.; TIPPNER, J.; SIMEK, M.; SRAJER, J.; DECKY, D.; KLIMOVA, H. Poisson's ratio of the MDF in respect to vertical density profile. *Eur. J. Wood Prod.* (2014) 72:407–410. DOI 10.1007/s00107-014-0780-1.

SHAMOV, I. V. Long-time study of Poisson's ratio for polyethylene stressed in the small strains range, *Mech. Compos. Mater.* 1(3), 36–38 (1965).

SLIKER, A. Measuring Poisson's ratios in wood. *Experimental Mechanics* 12(5), 1972:239-42.

SOMA T, SHIDA S, ARIMA T (2002) Calculation of grain angle and verification with spherical wood specimens using ultrasonic waves. *Mokuzai Gakkaishi* 48:407–412

SOTANDE, O.A.; OLUYEGE, A.O.; ADEOGUN, P.F.; MAINA, S.B. 2010. Variation in wood density, grain orientation and anisotropic shrinkage of plantation grown *Azadirachta Indica*. *J. Applied Sci. Res.*, 6: 1855-1861.

STANGERLIN, D. M. *et al.* Avaliação de tipos de ondas geradas por dois modelos de transdutores para determinação do módulo de elasticidade dinâmico. *Floresta*, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 691-700, out.-dez. 2010a.

STANGERLIN, D. M. *et al.* Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não-destrutivo. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 3, n. 2, p. 145-150, 2008.

STANGERLIN, D. M. *et al.* Estimativa do módulo de elasticidade em painéis aglomerados por meio de emissão de ondas ultra-sonoras. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 53, p. 17-22. 2010.

STEIGER, R. Sortierung von Rund-und Schnittholz mittels Ultraschall. *Holzforschung und Holzverwertung*, v. 49, n. 2, p. 28-35, 1997.

TANIGUCHI, Y.; ANDO, K.; YAMAMOTO, H. Determination of three-dimensional viscoelastic compliance in wood by tensile creep test. *J Wood Sci* (2010) 56:82–84. DOI 10.1007/s10086-009-1069-6.

TEDER, M.; PILT, K.; MILJAN, M.; PALLAV, V.; MILJAN, J. Investigation of the physical-mechanical properties of timber using ultrasound examination. *Journal of civil engineering and management*. Vol 18(6): 795-801. 2012.

TRCALA, M. A 3D transient nonlinear modelling of coupled heat, mass and deformation fields in anisotropic material. *M. Trcala / International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 4588–4596.

TURNER, I. W.; FERGUSON, W. J. An unstructured mesh cell-centered control volume method for simulating heat and mass transfer in porous media: Application to softwood drying -Part II: The anisotropic model. *Appl. Math. Modelling*, 1995, Vol. 19, p. 1-7.

VÁZQUEZ, C.; GONÇALVES, R.; BERTOLDO, C.; BAÑO, V.; VEGA, A.; CRESPO, J.; GUAITA, M. Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods. *Wood Sci Technol*, 2015. DOI 10.1007/s00226-015-0719-7

WARREN, W. G. A critical examination of the statistical techniques available for estimating exclusion limits from in-grade tests. Technical Report, Western Forest Prod. Lab., Vancouver, B. C. 1979.

WARREN, W. G. A critical examination of the statistical techniques available for estimating exclusion limits from in-grade tests. Technical Report, Western Forest Prod. Lab., Vancouver, B. C. 1979.

WIDMANN, R.; FERNANDEZ-CABO, J.L.; STEIGER, R. (2012) Mechanical properties of thermally modified beech timber for structural purposes. *Eur J Wood Wood Prod* 70:775–784.

YAMAMOTO, H.; KOJIMA, Y. (2002) Properties of cell wall constituents in relation to longitudinal elasticity of wood. Part 1. Formulation of the longitudinal elasticity of an isolated wood fiber. *Wood Sci Technol* 36:55–74.

ZIHERL, S.; BAJC, J.; URANKAR, B.; CEPIC, M. Anisotropy of wood in the microwave. *Region. Eur. J. Phys.* 31 (2010) 531–542.