

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**“ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS APLICADOS À MADEIRA SERRADA E  
ESTRUTURAS: TÉCNICAS POTENCIAIS PARA USO NO BRASIL”**

**VIVIANE DE SALLES CARDIN**

**São Carlos  
2011**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**“ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS APLICADOS À MADEIRA SERRADA E  
ESTRUTURAS: TÉCNICAS POTENCIAIS PARA USO NO BRASIL”**

**VIVIANE DE SALLES CARDIN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

**Área de Concentração:** Sistemas Construtivos de Edificações

**Orientador:** Prof. Dr. Almir Sales

**São Carlos**

**2011**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

C267en Cardin, Viviane de Salles.  
Ensaaios não destrutivos aplicados à madeira serrada e estruturas : técnicas potenciais para uso no Brasil / Viviane de Salles Cardin. -- São Carlos : UFSCar, 2012.  
116 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.

1. Construção civil. 2. Madeira. 3. Testes não-destrutivos. 4. Ultra-som. I. Título.

CDD: 690 (20<sup>a</sup>)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil  
Rod. Washington Luís, Km 235  
13565-905 – São Carlos – SP  
Fone: (16) 3351-8261 Fax (16) 3351-8262  
e-mail: [ppgciv@ufscar.br](mailto:ppgciv@ufscar.br) site: [www.ppgciv.ufscar.br](http://www.ppgciv.ufscar.br)

**“ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS APLICADOS À MADEIRA SERRADA E ESTRUTURAS:  
TÉCNICAS POTENCIAIS PARA USO NO BRASIL”**

**VIVIANE DE SALLES CARDIN**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em dezoito de novembro de 2011.

Banca Examinadora constituída pelos membros:

**Prof. Dr. Almir Sales**  
Departamento de Engenharia Civil/PPGCiv/UFSCar  
Orientador

**Prof. Dr. Antonio Alves Dias**  
Escola de Engenharia de São Carlos/Departamento de Estruturas/USP  
Examinador Externo

**Prof. Dr. Jasson Rodrigues de Figueiredo Filho**  
Departamento de Engenharia Civil/PPGCiv/UFSCar  
Examinador Interno

**Dedico**

A Deus e meus familiares.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por sua infinita bondade e por me auxiliar e guiar em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Plínio e Selma, pelo exemplo de vida, por serem tão companheiros e carinhosos ao longo de toda minha vida. Auxiliando-me em todos os percursos, mostrando-me sempre uma saída nas ocasiões mais difíceis. Serei eternamente grata.

Ao meu querido esposo, Roberto, pelo incentivo e amor dedicado em todos os momentos.

Aos meus filhos, Felipe e Bruna, por me ensinar o sentido do amor incondicional e verdadeiro. Sem eles, nada teria sentido.

Aos meus irmãos, Hélder e Ênio, pelo companheirismo e amizade. Em especial à minha irmã, Gesiane, pelo auxílio na parte estatística do trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Almir Sales, pelo apoio, dedicação e constante incentivo para a conclusão deste trabalho.

À amiga Marcela Candian Paduelli, pelo auxílio nos ensaios desenvolvidos.

Ao Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) pelo apoio e incentivo à pesquisa durante o desenrolar deste trabalho.

Aos funcionários do LAMEM (USP) por todo o auxílio prestado na realização dos ensaios e pesquisa bibliográfica.

A TODOS, MUITO OBRIGADA!!!

“Senhor, tu me sondas, e me conheces.

Tu conheces o meu sentar e o meu levantar; de longe entendes o meu pensamento.

Esquadrinhas o meu andar, e o meu deitar, e conheces todos os meus caminhos.

Sem que haja uma palavra na minha língua, eis que, ó Senhor, tudo conheces.

Tu me cercaste em volta, e puseste sobre mim a tua mão.

Tal conhecimento é maravilhoso demais para mim; elevado é, não o posso atingir....

Sonda-me, ó Deus, e conhece o meu coração; prova-me, e conhece os meus  
pensamentos;

vê se há em mim algum caminho perverso, e guia-me pelo caminho eterno.”

(Salmo 139)

## RESUMO

A madeira apresenta grande variabilidade em suas propriedades, o que é resultado, em parte, das condições de crescimento das árvores. As propriedades físicas da madeira também são influenciadas pela sua estrutura interna complexa, resultando em um comportamento anisotrópico. Devido essa variabilidade, sua melhor utilização e aplicação podem ser alcançadas por meio de métodos não destrutivos. A metodologia não destrutiva é realizada para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, sem alterar o seu uso posterior. Este trabalho teve por objetivo apresentar as técnicas não destrutivas em madeira com uso potencial no Brasil. Também o de aplicar a técnica de ultrassom em peças de madeira serrada de *Pinus sp* de dimensões estruturais, buscando-se verificar a acuracidade dessa técnica comparando-a a valores obtidos em ensaios destrutivos (ensaios de flexão estática). O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido a partir da reta de regressão entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico com o emprego do ultrassom foi de 0,66, permitindo afirmar que esta técnica possui acurácia para a avaliação mecânica de peças de madeira.

**Palavras-chave:** Madeira. Ensaios não destrutivos. Ultrassom.

## ABSTRACT

The wood has many different characteristics, resulting, in part, of the conditions in which the tree grows. The physical conditions of the wood are also influenced by its complex internal structure, resulting in an anisotropic behavior. Within this variability, its best use and application can be reached through non-destructive methods. The non-destructive methodology is performed to verify the existence or inexistence of discontinuities or defects, without changing its later use. This work aims at presenting the non-destructive techniques in wood with potential use in Brazil. It also aims at applying the ultrasound technique in lumber pieces of *Pinus sp* of structural dimensions, with the purpose of verifying the accuracy of such technique, comparing it to the values obtained in destructive tests (static bending tests). The coefficient of determination ( $R^2$ ) obtained from the regression line between the static modulus of elasticity and dynamic modulus of elasticity with the use of ultrasound was 0.66, that allows affirming that this technique has accuracy in the assessment of mechanical pieces of wood.

Keywords: Wood. Non-destructive tests. Ultrasound.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Eixos ortogonais da madeira em relação à direção das fibras .....	20
Figura 2 – Corte longitudinal de um tronco de árvore .....	21
Figura 3 – Anéis de crescimento em madeira de conífera .....	24
Figura 4 – Anéis de crescimento em madeira de folhosa.....	24
Figura 5 – Umidade na madeira .....	27
Figura 6 – Influência da umidade nos módulos de elasticidade de Sitka spruce.....	28
Figura 7 – Retração na madeira.....	29
Figura 8 – Tração paralela e tração normal às fibras da madeira .....	33
Figura 9 – Cisalhamento vertical (a), horizontal (b) e perpendicular (c), respectivamente em uma peça de madeira.....	33
Figura 10 – Flexão em uma peça de madeira .....	34
Figura 11 – Medição do encanoamento .....	36
Figura 12 – Medição do arqueamento.....	36
Figura 13 – Medição do encurvamento .....	36
Figura 14 – Medição do torcimento .....	37
Figura 15 – Igrejas medievais de madeira na Noruega.....	39
Figura 16 – Parlamento da Escócia. Edimburg, 2004 .....	40
Figura 17 – Utilização da madeira na construção civil .....	41
Figura 18 – Consumo de madeira serrada amazônica utilizada na construção civil, no estado de São Paulo em 2001 .....	41
Figura 19 – Sistema construtivo tipo viga-pilar.....	43
Figura 20 – Ossatura da vedação externa do sistema plataforma em madeira .....	43
Figura 21 – Utilização da madeira roliça em edificação .....	44
Figura 22 – Construção de tábuas e mata-juntas .....	44
Figura 23 – Nós em peça de madeira .....	51
Figura 24 – Inclinação das fibras em uma peça de madeira .....	51
Figura 25 – Racha anelar e fenda (respectivamente) em uma peça de madeira.....	52
Figura 26 – Formas de medir a densidade em peças de madeira .....	52
Figura 27 – Ensaio de ultrassom – técnica de transmissão .....	55
Figura 28 – Ensaio de ultrassom – técnica de imersão.....	55
Figura 29 – Equipamentos de ultrassom.....	56

Figura 30 – Variação da velocidade longitudinal de ultrassom (m/s) em função do teor de umidade (Curva U1) e a variação dos valores de atenuação das ondas ultrassônicas (em dB) em função do teor de umidade (Curva U2) para a espécie metasequóias .....	57
Figura 31 – Variação da velocidade de propagação de ondas longitudinais em função da relação de base/altura .....	59
Figura 32 – Barra elástica submetida a um impacto .....	63
Figura 33 – Equipamento de onda de tensão FAKOPP .....	64
Figura 34 – Sensores de emissão e recebimento da onda sonora .....	64
Figura 35 – Seção da peça estudada, antes e após a realização do furo .....	66
Figura 36 – Imagem tomográfica com a presença do furo .....	66
Figura 37 – Esquema de um equipamento para determinação do módulo elasticidade por meio da vibração transversal.....	69
Figura 38 – Ensaio com o emprego da técnica de vibração transversal .....	69
Figura 39 – Resistógrafo .....	72
Figura 40 – Resultado da resistência a penetração da agulha na peça analisada....	73
Figura 41 – Ensaio não-destrutivo com a utilização da máquina MSR .....	75
Figura 42 – Esquema de funcionamento da máquina MSR .....	76
Figura 43 – Elementos da máquina de classificação .....	77
Figura 44 – Dimensões do corpo de prova.....	96
Figura 45 – Componentes do aparelho sylvatest: a) sylvatest duo / b) sylvion (psion) / c) sondas.....	98
Figura 46 – Ensaio de ultrassom.....	99
Figura 47 – Ensaio de flexão estática .....	99
Figura 48 – Regressão linear entre o MOE e $E_{d,us}$ para a espécie de Pinus.....	106

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Técnicas não destrutivas empregadas em dissertações e teses até o ano de 2011 .....	93
Gráfico 2 – Técnicas não destrutivas publicadas em revistas, periódicos e congressos até o ano de 2011 .....	93
Gráfico 3 – Teste Kolmogorov-Smirnov para o ensaio de ultrassom .....	103
Gráfico 4 – Teste Kolmogorov-Smirnov para o ensaio de flexão estática .....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo energético de diversos materiais utilizados na construção civil .....	38
Tabela 2 – Classes de qualidade visual .....	50
Tabela 3 – Classes de densidade .....	52
Tabela 4 – Código de cores com os intervalos de MOE.....	77
Tabela 5 – Métodos não destrutivos abordados em teses de mestrados e doutorados .....	79
Tabela 6 – Publicações em revistas, congressos e periódicos .....	82
Tabela 7 – Valores obtidos no ensaio de ultrassom.....	101
Tabela 8 – Valores obtidos no ensaio de flexão estática.....	102
Tabela 9 – Estatística Descritiva para os dados obtidos .....	105
Tabela 10 – Análise da variância obtido para o ensaio de ultrassom e flexão estática .....	105

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas maiúsculas

E	Módulo de elasticidade
$E_d$	Módulo de elasticidade dinâmico
$E_{d,us}$	Módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de ultrassom
$E_L$	Módulo de elasticidade na direção longitudinal
$E_R$	Módulo de elasticidade na direção radial
$E_T$	Módulo de elasticidade na direção tangencial
$E_M$	Módulo de elasticidade na flexão
I	momento de inércia da seção transversal
L	comprimento da viga
MOE	Módulo de elasticidade estático
$MOE_{médio}$	Módulo de elasticidade estático médio
$R^2$	coeficiente de determinação
V	volume da madeira saturada
$V_{12}$	volume da madeira a 12% de umidade
W	peso da viga

### Letras romanas minúsculas

$f_{c0}$	resistência à compressão paralela às fibras
$f_{c90}$	resistência normal às fibras
fr	freqüência natural de vibração
g	aceleração da gravidade
$m_1$	massa úmida
$m_2$	massa seca
$m_s$	massa do corpo-de-prova seco
$m_{12}$	massa da madeira a 12% de umidade
r	coeficiente de correlação linear
w	teor de umidade

### **Letras gregas maiúsculas**

$\Delta F$	incremento de carga
$\Delta V$	incremento de deslocamento

### **Letras gregas minúsculas**

$\rho$	densidade da madeira
$\rho_{ap,12\%}$	densidade aparente da madeira
$\lambda$	comprimento de onda.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	18
2.1 OBJETIVO GERAL .....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3 MADEIRAS E SUAS PROPRIEDADES</b> .....	19
3.1 A MADEIRA .....	19
3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES DE ÁRVORES .....	20
3.3 FISIOLOGIA E CRESCIMENTO DAS ÁRVORES .....	21
3.4 ELEMENTOS ANATÔMICOS DA MADEIRA .....	21
3.5 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA .....	25
3.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA .....	30
<b>3.6.1 Propriedades Elásticas</b> .....	30
<b>3.6.2 Propriedades de Resistências</b> .....	32
3.7 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA .....	34
3.8 A MADEIRA E A SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	37
3.9 A MADEIRA E SUA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	39
<b>4 TÉCNICAS NÃO-DESTRUTIVAS</b> .....	47
4.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL .....	48
4.2 ULTRASSOM .....	53
4.3 ONDAS DE TENSÃO (STRESS WAVE) .....	62
4.4 VIBRAÇÃO TRANSVERSAL .....	67
4.5 MÉTODO DE PERFURAÇÃO CONTROLADA – RESISTÓGRAFO .....	71
4.6 MÁQUINA DE CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE MADEIRA SERRADA – MSR .....	74
4.7 LEVANTAMENTO DE TRABALHOS COM ESTUDO EM ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS .....	78
<b>5 ESTUDO DA VALIDAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRASSOM</b> .....	95
5.1 ESPÉCIE ESTUDADA .....	95
5.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	95
5.3 ENSAIOS REALIZADOS .....	97
<b>5.3.1 Ensaio de densidade aparente (<math>\rho_{ap,12\%}</math>)</b> .....	97
<b>5.3.2 Ensaio de ultrassom</b> .....	97

<b>5.3.3 Ensaio de flexão estática</b> .....	99
5.4 RESULTADOS .....	100
5.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO COM O USO DO ULTRASSOM... 101	
5.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO COM O ENSAIO DA FLEXÃO ESTÁTICA.....	101
5.7 TESTE DE NORMALIDADE PARA OS VALORES DE MÓDULOS DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ESTÁTICO .....	102
5.8 CORRELAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS DE ELASTICIDADES (ESTÁTICO E DINÂMICO) .....	104
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	107
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	108

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira não tem sido muito utilizada como material estrutural devido ao desconhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas por grande parte de engenheiros e arquitetos.

A madeira, independentemente da espécie e dimensão, apresenta grande variabilidade em suas propriedades mecânicas. Apresentando grandes diferenças de resistência de uma peça para outra de mesma espécie e dimensão. Dessa forma, a metodologia não destrutiva pode ser uma interessante ferramenta na classificação mecânica de peças de madeira, além da vantagem de não alterar as condições iniciais do material, de forma que se permita o posterior uso da peça.

Atualmente, existem diversas técnicas não-destrutivas que são empregadas na classificação da madeira, podendo-se destacar: classificação visual, ultrassom, ondas de tensão (stress wave), vibração transversal, resistógrafo e máquina de classificação estrutural de madeira serrada (MSR).

A classificação visual é uma técnica simples e consiste na inspeção das quatro faces e das duas extremidades de cada peça. Com o auxílio de regras de classificação, as características de crescimento são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade.

A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ultrassom é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade. Possibilitando verificar aspectos da qualidade da madeira, como nós, medulas, dentre outros.

A técnica com o emprego de ondas de tensão consiste na geração de ondas através de uma vibração produzida por um impacto na peça de estudo.

O método de vibração transversal foi um dos primeiros métodos não destrutivos investigados para a determinação do módulo de elasticidade da madeira. A técnica de vibração transversal é bem conhecida e utiliza a relação entre o módulo de elasticidade e a frequência de oscilação de uma viga apoiada.

O resistógrafo foi desenvolvido na Alemanha, sendo utilizado para analisar a qualidade da madeira, podendo-se verificar o estado de conservação da madeira, identificando podridão e ocosidade. O método é baseado na medida da resistência

da madeira à penetração de uma agulha inserida com movimentação constante em uma árvore.

A classificação não destrutiva através da máquina MSR é um processo rápido e totalmente automatizado. O método é baseado na correlação entre o módulo de elasticidade e resistência a flexão da madeira.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivos:

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar as principais técnicas não destrutivas que podem ser utilizadas em madeiras e derivados para estimativa de propriedades físicas e mecânicas no Brasil.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar as técnicas não destrutivas para madeiras com uso potencial no Brasil;
- Aplicar a técnica de ultrassom em peças (com dimensões estruturais) de madeira serrada de *Pinus sp*, para estimativa do Módulo de Elasticidade dinâmico.

Em função de um levantamento de estudos em ensaios não destrutivos realizados em peças de madeiras e derivados, verificou-se que a técnica mais empregada por parte dos pesquisadores é a de ultrassom. Assim, escolheu-se a técnica de ultrassom para a realização dos ensaios.

- Verificar a acuracidade da técnica de ultrassom, comparando-a a valores obtidos em ensaios de flexão estática.

### 3 MADEIRAS E SUAS PROPRIEDADES

Esta revisão apresenta um levantamento da bibliografia referente às características da madeira e ensaios não destrutivos utilizados em árvores, madeiras e derivados.

#### 3.1 A MADEIRA

A madeira pode ser considerada como o mais antigo material de construção utilizado pelo homem. Mesmo com os meios escassos existentes, a madeira era bastante empregada pela população primitiva, principalmente pela praticidade na sua obtenção e facilidade de aplicação.

Dentre as principais vantagens da madeira podem ser destacadas as seguintes: capaz de resistir tanto a esforços de compressão, como de tração; é um material leve em peso e que possui elevada resistência mecânica; permite fácil trabalhabilidade; não estilhaça quando golpeada; apresenta boas condições naturais de isolamento térmico e absorção acústica; apresenta no seu aspecto natural, grande diversidade de padrões (FURIATI, 1981).

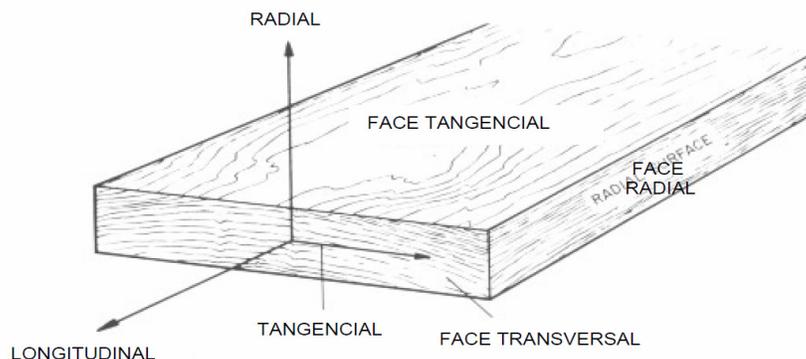
Dentre as principais desvantagens da madeira estão: trata-se de um material fundamentalmente heterogêneo; bastante vulnerável aos agentes externos e, sua durabilidade é limitada quando desprotegida; é sensível aos agentes ecológicos: podendo sofrer alterações nas suas dimensões quando ocorre variação de umidade (FURIATI, 1981).

A madeira é um material poroso, anisotrópico e com irregularidades estruturais.

O tronco da árvore é formado por camadas concêntricas que conferem uma simetria cilíndrica para a madeira. A madeira pode ser considerada como um sólido com três planos ortogonais de simetria, definidos em função da direção principal: direção radial, direção tangencial e direção longitudinal. A direção radial é do centro da árvore até seu perímetro, a tangencial é tangente aos anéis de crescimento e a longitudinal é paralela ao eixo da árvore (BUCUR, 1995).

Na Figura 1 está apresentado um esquema com os eixos ortogonais da madeira.

Figura 1 – Eixos ortogonais da madeira em relação à direção das fibras



Fonte: Wilcox, et. al. (apud SZUCS et al., 2007).

### 3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES DE ÁRVORES

Dentre as diversas classificações em que biólogos e botânicos agrupam as diferentes espécies e árvores, pode-se classificar as espécies em dois grandes grupos: o das angiospermas e o das gimnospermas.

Nas Gimnospermas, a classe mais importante é a das Coníferas, também conhecidas internacionalmente por softwoods, ou seja, madeira mole. São resinosas e típicas do clima temperado e frio. São denominadas também de não porosas devido à ausência de vasos ou poros.

As Angiospermas são as plantas mais completas e organizadas. Podem ser classificadas em monocotiledôneas e dicotiledôneas, sendo as dicotiledôneas (chamadas de Folhosas), os mais organizados vegetais, são usualmente conhecidas como hardwoods, ou seja, madeira dura. São árvores típicas de regiões quentes e úmidas e compõem quase a totalidade das espécies das florestas tropicais.

As Coníferas, geralmente, possuem menor densidade quando comparadas com as Dicotiledôneas. Destacam-se como exemplo de Coníferas, as seguintes espécies: Pinus, Pinheiro do Paraná (*Araucária angustifolia*). Nas Dicotiledôneas, podem ser citadas como exemplo, as seguintes espécies: Peroba Rosa, Aroeira, os Eucaliptus (*Grandis*, *Citriodora*, etc), Garapa, Ipê, Maçaramduba, Mogno, Jatobá, etc.

### 3.3 FISILOGIA E CRESCIMENTO DAS ÁRVORES

As árvores são compostas por três macro-estruturas, podendo ser identificadas visualmente, sendo elas: as raízes, o tronco e a copa.

A raiz tem por função fixar a árvore ao solo e deste retira água contendo sais minerais dissolvidos (seiva bruta) imprescindíveis ao crescimento vegetal.

O tronco é a macro-estrutura que sustenta a copa com suas ramificações e conduz por capilaridade, tanto a seiva bruta (da raiz até a as folhas da copa), quanto a elaborada (das folhas para o lenho em crescimento).

A copa é composta por ramos, folhas e frutos, ocorrendo nas folhas o processo de transformação da água e sais minerais em compostos orgânicos (seiva elaborada).

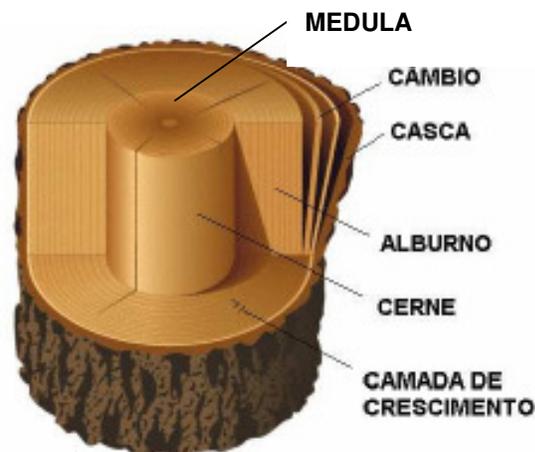
Destaca-se o tronco, por se tratar da parte que possui a maior porção de madeira utilizável. É através dele que se produzem as peças de madeira natural e material de construção.

A disposição da estrutura interna do tronco da árvore encontra-se descrita no tópico a seguir.

### 3.4 ELEMENTOS ANATÔMICOS DA MADEIRA

Analisando a Figura 2, corte longitudinal de um tronco de árvore, pode se observado seus elementos constituintes:

Figura 2 – Corte longitudinal de um tronco de árvore



Fonte: Adaptado de Costa, (2001).

- Casca: protege a árvores contra agentes externos: ataques biológicos, mecânicos e intempéries.

A casca é composta por duas camadas: uma externa morta (ritidoma) de espessura variável com a idade e espécie; uma fina camada interna (floema) de tecido vivo e macio, responsável por conduzir o alimento sintetizado nas folhas para as partes em crescimento.

O ritidoma protege os tecidos mais novos, do ambiente, dos excessos de evaporação, e dos agentes de destruição. Racha-se, cai e é renovado, pois sendo um tecido morto não tem crescimento. Não apresenta interesse como material de construção. Em algumas espécies, como o sobreiro, o ritidoma designado tem um desenvolvimento tão grande que permite a retirada de lâminas espessas e estas apresentam propriedades termoacústicas vantajosas, possuindo emprego adequado em processos de isolamento: revestimentos de paredes e forros, inertes para betão leve, etc. (COUTINHO, 1999).

O floema é a parte interna da casca da árvore, composta por células fisiologicamente ativas, exercendo a função da condução da seiva elaborada.

- Câmbio: constituído por uma camada de células meristemáticas que são responsáveis pela formação das novas células de xilema (lenho) e de floema. Tanto o câmbio quanto a casca não influenciam nas propriedades mecânicas da madeira limpa.

O lenho é o núcleo de sustentação e resistência da árvore. Constitui a seção útil do tronco para obtenção das peças estruturais de madeira natural ou madeira de obra (COUTINHO, 1999).

O lenho é dividido em duas partes: albarno e cerne.

- Albarno: é constituído por células vivas responsáveis pela condução da seiva bruta por ascensão capilar. Possui baixa resistência ao ataque de fungos e insetos, entretanto, é a região que permite a maior penetração dos líquidos para tratamento preservativo. De um modo geral, possui uma coloração mais clara do que o cerne.

- Cerne: tem função de sustentação. É a camada mais interna ao alburno, formada por células fisiologicamente mortas, que perderam a sua atividade fisiológica durante o crescimento da árvore. Na maior parte das espécies, possui coloração mais escura que o alburno.

Comparando o cerne com o alburno, o cerne possui maior densidade, compacidade, resistência mecânica, apresentando maior durabilidade, pois se trata de um tecido morto, não atraindo insetos ou outros agentes responsáveis por sua deterioração.

Contudo, é desaconselhável e antieconômica a prática rotineira de retirar todo o alburno e considerá-lo como impróprio para a construção. É desaconselhável não só do ponto de vista econômico, pois a porção de alburno varia conforme a espécie, de 25% a 50% de lenho, mas também do ponto de vista tecnológico, pois o alburno é a parte de maior absorção dos produtos anti-deteriorante nos processos de preservação da madeira, além de apresentar características mecânicas satisfatórias (COUTINHO, 1999).

- Medula: localizada na parte central do caule, estendendo-se desde a base da árvore até seu topo. Trata-se de uma região muito suscetível ao ataque de microorganismos e insetos, por isso encontram-se toras com a medula deteriorada. Possui como função armazenar nutrientes para a planta, durante a fase inicial de crescimento.
- Camada (anéis) de crescimento: são anéis que se iniciam no centro do tronco e vão até a casca. Na primavera e início do verão, o crescimento da árvore é intenso, formando células claras de paredes finas e de grandes lumens, no tronco. Sendo que no inverno, surgem células escuras de paredes grossas e pequenos lumens. Em espécies de clima tropical é difícil a visualização das camadas de crescimento, pois as árvores apresentam um desenvolvimento praticamente uniforme ao longo do ano (COSTA, 2001).

O Lenho que se desenvolve no período da primavera/verão, denomina-se lenho inicial ou lenho primaveril, enquanto que o lenho que se desenvolve no período do outono/inverno, denomina-se lenho tardio ou lenho outonal.

Os anéis de crescimento são importantes, pois permitem estimar a idade da árvore e servem de referência para a consideração e estudo da ortotropia da madeira.

As Figuras 3 e 4 apresentam os anéis de crescimento inicial e tardio em madeiras.

Figura 3 – Anéis de crescimento em madeira de conífera



Fonte: Bilesky, (2010).

Figura 4 – Anéis de crescimento em madeira de folhosa



Fonte: Bilesky, (2010).

### 3.5 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

Entre as propriedades físicas da madeira, podem ser destacadas as seguintes: anisotropia, densidade, umidade e retração.

- **ANISOTROPIA**

A madeira é um material anisotrópico, dessa forma, não possui as mesmas características nas três direções principais, podendo ser definidas três direções: radial, tangencial e longitudinal, conforme observado na Figura 01.

- **DENSIDADE**

Os valores de densidade variam de espécie para espécie e dependem de uma série de fatores, tais como solo, clima, tipo de tratamento, condução florestal, bem como com a quantidade de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no lenho.

Geralmente, à medida que aumenta a densidade, aumenta a resistência mecânica e durabilidade natural da madeira, em sentido inverso, diminuem a permeabilidade a soluções preservantes, acabamentos e trabalhabilidade. Assim, a densidade da madeira é considerada uma das propriedades mais importantes da madeira.

São caracterizadas duas densidades: básica e aparente.

A densidade básica é definida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado, conforme expressão 1:

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad (1)$$

onde:

$m_s$ : massa do corpo-de-prova seco, em quilogramas;

$V$ : volume da madeira saturada, em metros cúbicos.

Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), a densidade aparente é tomada a umidade padrão de referência (12%), conforme equação 2:

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (2)$$

onde:

$m_{12}$ : massa da madeira a 12% de umidade, em quilogramas;

$V_{12}$ : volume da madeira a 12% de umidade, em metros cúbicos.

- **UMIDADE**

A árvore quando é cortada apresenta grande quantidade de água na sua estrutura e a quantidade de água presente em sua estrutura varia segundo a época do ano, região de procedência e a espécie florestal. As madeiras leves são mais porosas apresentando maior quantidade de água que as madeiras mais pesadas. Da mesma forma que o alburno, por ser formada por células cuja função principal é a condução da água, apresenta um conteúdo de umidade maior que o cerne (KLITZKE, 2008).

As árvores recém cortadas podem apresentar teor de umidade entre 35 e 200%, dependendo da espécie (ESTUDO..., 2004).

A umidade da madeira é determinada pela expressão 3:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (3)$$

onde:

$m_1$ : massa úmida;

$m_2$ : massa seca;

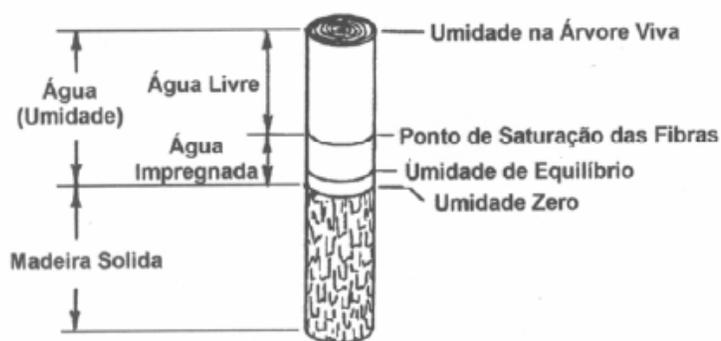
$w$ : umidade (%)

A madeira é um material higroscópico, assim sendo, interage com o meio ambiente absorvendo ou perdendo umidade para ele. Desta forma, as suas propriedades físicas e mecânicas são afetadas sensivelmente.

A água existente no interior de madeiras pode ser encontrada sob as seguintes formas (Figura 5):

- água livre ou de embebição: é a água contida nos espaços vazios entre as células, nos vasos e poros da madeira, circulando livremente por evaporação, sendo de fácil remoção. Durante esta fase de secagem, a madeira não sofre variação dimensional, nem alterações em suas propriedades mecânicas;
- água de constituição ou impregnação: é a água localizada no interior das células da madeira, que está quimicamente ligada por pontes de hidrogênio, às cadeias de celulose das paredes celulares. Durante a secagem, após a perda de água livre por evaporação, a perda da umidade torna-se mais lenta até atingir um equilíbrio de umidade da madeira com a umidade relativa do ambiente ao entorno.

Figura 5 – Umidade na madeira



Fonte: Calil (apud SZUCS et al., 2007).

A secagem da madeira está diretamente relacionada com a sua estrutura celular. O mecanismo de secagem envolve o ponto de saturação das fibras (PSF).

O PSF pode ser definido como o valor de umidade abaixo do qual as propriedades físicas e mecânicas da madeira são função do conteúdo de umidade.

Acima do PSF, o movimento da água livre segue as leis capilares, quanto menor o diâmetro dos capilares, maior será a força de tração da coluna de água nestes capilares. Abaixo do PSF, a secagem pode ser considerada como um processo de difusão: a água das camadas mais internas se difunde na forma de vapor preenchendo os espaços vazios deixados pela água livre, até atingir a superfície da madeira por capilaridade.

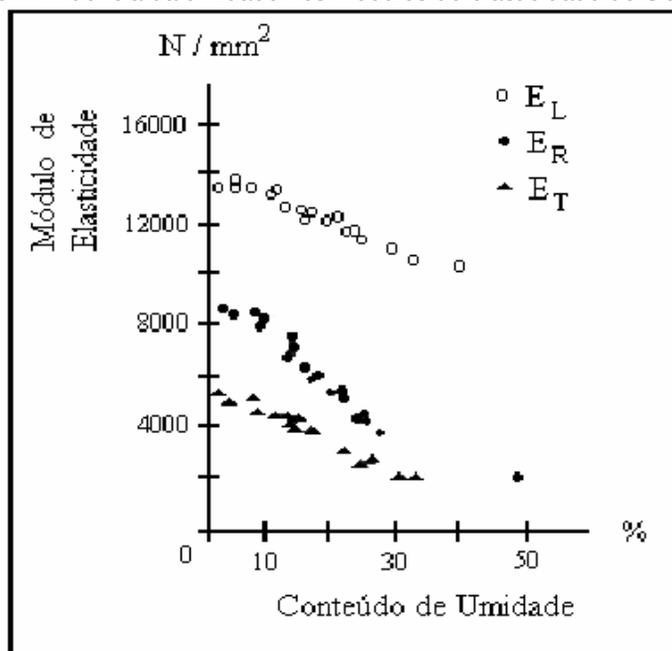
O conteúdo de umidade da madeira abaixo do PSF é influenciado pela umidade relativa do ar e pela temperatura ambiente. Entretanto, há um valor de umidade do ar em que a madeira, após um determinado tempo em contato com o ar

atmosférico, estabiliza-se, de forma a não ganhar, nem perder água para o meio ambiente. Este valor é definido como o ponto de equilíbrio da madeira.

Para maioria das espécies, o equilíbrio encontra-se entre 12 e 18% de conteúdo de umidade, dependendo do lugar de onde se realiza a secagem. Quando se deseja obter teores de umidade menores, deve-se recorrer à secagem artificial.

O primeiro a observar que as propriedades mecânicas da madeira são afetadas pela umidade foi (TIEMANN, 1906, apud CANDIAN, 2007). Ele verificou que as propriedades mecânicas são afetadas somente pela água de impregnação ou de constituição, de forma que apenas a parede celular contribui efetivamente para a resistência. É possível verificar na Figura 6, que, com o aumento da umidade, ocorre a redução da resistência e do módulo de elasticidade. As letras  $E_L$ ,  $E_R$  e  $E_T$  representam os módulos nas direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente.

Figura 6 – Influência da umidade nos módulos de elasticidade de Sitka spruce



Fonte: Bucur, (1995).

Os teores de umidade da madeira são (BUENO, 2000):

- No abate: cerca de 57% nas folhosas e 57% nas resinosas;
- madeira verde: cerca de 30% no ponto de saturação das fibras;
- madeira semi-seca: abaixo do PSF mas com umidade superior a 23%;

- madeira comercialmente seca: teor de umidade entre 18 e 23%;
- madeira seca ao ar: teor de umidade de 13% a 18%;
- madeira por secagem artificial (dessecada): teor de umidade entre 0 e 13%;
- madeira anidra: 0%.

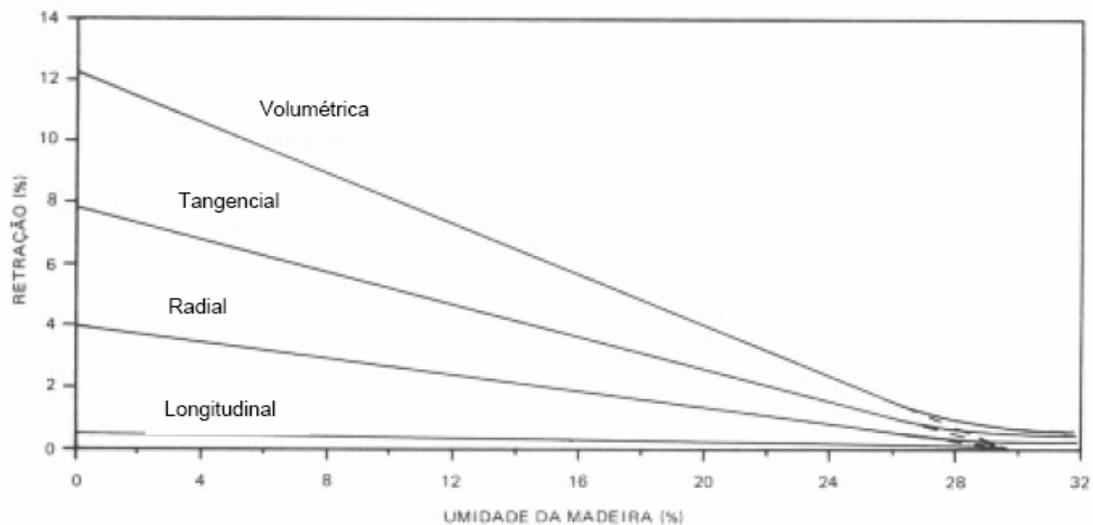
- **RETRAÇÃO**

A retração é a redução das dimensões pela perda de água de impregnação.

A madeira devido a sua anisotropia, não apresenta os mesmos valores de retração segundo as três direções principais, possuindo uma maior retração na direção tangencial, seguida pela radial e longitudinal (axial).

De um modo geral, a retração da madeira ocorre em porcentagens diferentes, pois ela possui comportamento diferente de acordo com a direção às fibras e aos anéis de crescimento (Figura 7).

Figura 7 – Retração na madeira



Fonte: Szucs et al., (2007).

A retração tangencial pode causar problemas de torção nas peças de madeira, a radial, por sua vez, pode causar rachaduras. Por fim, a retração longitudinal sendo em torno de 0,5% de variação dimensional.

### 3.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

A resposta da madeira quando ela é solicitada por forças externas depende de suas propriedades mecânicas.

As propriedades mecânicas são divididas em propriedades de elasticidade e de resistência, as quais são apresentadas a seguir.

#### 3.6.1 Propriedades Elásticas

A elasticidade é a capacidade que um material apresenta de retornar a sua forma inicial, logo após a retirada de uma ação externa que o estava solicitando, sem que ocorra deformação residual.

A madeira apresenta uma deformação residual após a solicitação, mas para a maioria das aplicações estruturais é considerada como um material elástico.

Para um material isotrópico, as propriedades elásticas podem ser descritas pelas seguintes constantes: o módulo de elasticidade longitudinal ( $E$ ), o módulo de elasticidade transversal ( $G$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Na madeira, as propriedades de elasticidade variam de acordo com a direção das fibras, pois a madeira é um material ortotrópico.

- **MÓDULO DE ELASTICIDADE ( $E$ )**

Para efeitos práticos, segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), há três tipos de módulo de elasticidade: o módulo de elasticidade longitudinal ( $E_0$ ), o módulo de elasticidade normal ( $E_{90}$ ), e o módulo de elasticidade na flexão ( $E_M$ ).

O módulo de elasticidade longitudinal ( $E_0$ ) é determinado através de ensaio de compressão paralela às fibras da madeira.

O módulo de elasticidade normal ( $E_{90}$ ) pode ser determinado através de ensaio de laboratório ou pode ser representado como uma fração do módulo de elasticidade longitudinal conforme a expressão (4) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997):

$$E_{90} = \frac{E_0}{20} \quad (4)$$

O módulo de elasticidade na flexão ( $E_M$ ) pode ser determinado através de ensaio apresentado na NBR 7190:1997, também podendo ser determinado através de relações com o módulo de elasticidade longitudinal, presentes na mesma norma, que são apresentadas a seguir:

Para coníferas:  $E_M = 0,85 E_0$

Para dicotiledôneas:  $E_M = 0,90 E_0$

- **MÓDULO DE ELASTICIDADE TRANSVERSAL (G)**

Segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), o módulo de elasticidade transversal é calculado de acordo com a equação 5.

$$G = \frac{E_{c0,ef}}{20} \quad (5)$$

Onde:

$E_{c0,ef}$  é o módulo de elasticidade paralelamente às fibras, tomado como o valor efetivo, sendo calculado conforme equação 6.

$$E_{c0,ef} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3} \cdot E_0 \quad (6)$$

Onde:

$k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3}$ , sendo que os coeficientes de modificação  $k_{mod}$  afetam os valores de cálculo das propriedades da madeira em função da classe de carregamento da estrutura ( $k_{mod,1}$ ), da classe de umidade admitida ( $k_{mod,2}$ ) e da utilização da madeira de segunda qualidade ( $k_{mod,3}$ ).

- **COEFICIENTE DE POISSON**

A NBR 7190:1997 não apresenta especificações a respeito de valores para o coeficiente de Poisson.

### 3.6.2 Propriedades de Resistências

As propriedades de resistência são as que descrevem as resistências de um material quando este se apresenta solicitado por uma força.

As propriedades de resistência da madeira também se diferem segundo os três eixos principais, apesar de apresentarem valores bem próximos nas direções tangencial e radial. Dessa forma, são analisadas segundo as direções paralela e normal às fibras.

A seguir são apresentadas as propriedades de resistência da madeira.

- **COMPRESSÃO**

A madeira pode ser solicitada à compressão paralela, normal ou inclinada em relação às fibras.

Quando uma peça é submetida à compressão paralela às fibras, devido às forças agirem na direção paralela ao comprimento das células, as células conferem grande resistência à madeira na compressão.

Em relação à solicitação normal às fibras, a madeira apresenta resistência menor que na compressão paralela às fibras.

Para as solicitações inclinadas em relação às fibras, adotam-se valores intermediários entre a compressão paralela e a normal, valores que são obtidos através da expressão de Hankinson, apresentada a seguir.

$$f_{c\theta} = \frac{f_{c0} \cdot f_{c90}}{f_{c0} \cdot \text{sen}^2 \theta + f_{c90} \cdot \text{cos}^2 \theta} \quad (7)$$

Onde:

$f_{c0}$  é a resistência à compressão paralela às fibras;

$f_{c90}$  é a resistência normal às fibras;

$\theta$  é a inclinação da solicitação em relação à direção das fibras.

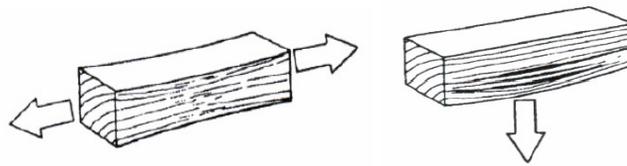
- **TRAÇÃO**

Podem ocorrer solicitações a tração paralela às fibras e a tração perpendicular às fibras, as quais se diferem consideravelmente.

Na tração paralela às fibras, a ruptura pode ocorrer de duas formas: por deslizamentos entre as células ou por ruptura das paredes das células, apresentando em ambos os modos de ruptura, baixos valores de deformação e elevados valores de resistência. A ruptura por tração normal às fibras, a madeira apresenta baixos valores de resistência.

A Figura 8 apresenta a tração paralela e normal às fibras na madeira, respectivamente.

Figura 8 – Tração paralela e tração normal às fibras da madeira

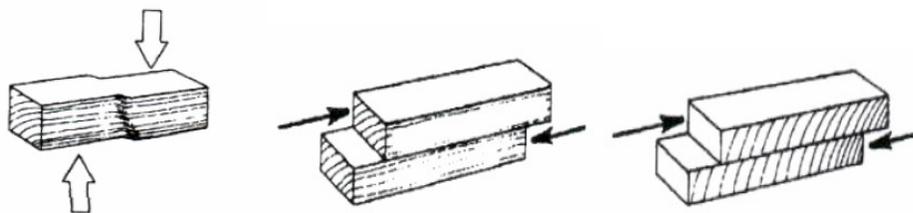


Fonte: Bremer, 2009 (apud CALIL JUNIOR, 2011).

#### • CISALHAMENTO

Há três tipos de cisalhamento que podem ocorrer em peças de madeira. O cisalhamento vertical ocorre quando a ação age no sentido perpendicular às fibras, não sendo crítico na madeira, pois antes de romper por cisalhamento a peça apresentará problemas de resistência na compressão normal, conforme Figura 9 – item a. O segundo tipo refere-se à força aplicada no sentido longitudinal às fibras, chamado de cisalhamento horizontal (Figura 9 – item b) e o terceiro refere-se à força aplicada perpendicularmente às linhas dos anéis de crescimento, conhecido como cisalhamento “rolling”. O mais crítico é o cisalhamento horizontal que leva à ruptura devido ao escorregamento entre as células de madeira.

Figura 9 – Cisalhamento vertical (a), horizontal (b) e perpendicular (c), respectivamente em uma peça de madeira

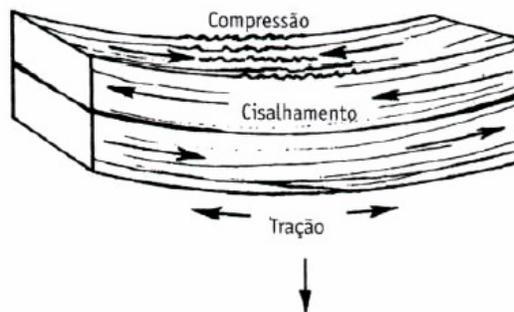


Fonte: Bremer, 2009 (apud CALIL JUNIOR, 2011).

- **FLEXÃO SIMPLES**

Quando uma peça de madeira é submetida à flexão simples, ocorrem os seguintes tipos de esforços: compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento horizontal e na região junto aos apoios ocorre compressão normal às fibras. A ruptura da madeira, quando esta está submetida à flexão ocorre devido à formação de minúsculas falhas de compressão, seguida pelo surgimento de enrugamentos de compressão macroscópico, o que acaba gerando um aumento da área comprimida na seção e a redução da área tracionada, podendo ocorrer o rompimento por tensão de tração (Figura 10).

Figura 10 – Flexão em uma peça de madeira



Fonte: Bremer, 2009 (apud CALIL JUNIOR, 2011).

- **TORÇÃO**

A madeira solicitada à torção é pouco conhecida, sendo que a NBR 7190:1997, recomenda evitar a torção de equilíbrio em peças de madeira, devido ao risco de a peça romper por tração normal às fibras devido ao estado múltiplo de tensões atuantes.

### 3.7 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

A madeira é um material que está sujeito a variações na sua estrutura, o que pode acarretar diversas mudanças em suas propriedades. Essas mudanças ocorrem devido a três fatores principais: anatômicos, ambientais (defeitos por ataques biológicos) e de utilização (defeitos de secagem e estocagem).

- **FATORES ANATÔMICOS**

Os fatores anatômicos correspondem à densidade, inclinação das fibras, nós, falhas naturais da madeira, a presença de medula e faixas de parênquimas.

Normalmente, quanto maior a densidade da madeira, maior a resistência. Entretanto deve se ter precaução em relação à presença de nós, resinas e extratos, pois estes podem contribuir para aumentar a densidade sem, contudo contribuir para a melhoria da resistência.

A inclinação das fibras a partir de um ângulo de 6° começa a influenciar significativamente as propriedades da madeira.

Os nós reduzem a resistência da madeira devido ao fato de interromper a continuidade e a direção do crescimento das fibras, além de poderem causar efeitos localizados de concentração de tensões.

As falhas naturais da madeira podem ser devido ao encurvamento do tronco e dos galhos durante o crescimento da árvore. A presença de medula reduz a resistência da peça, além de facilitar o ataque biológico. As faixas de parênquima, por apresentarem baixa densidade e pouca resistência mecânica, podem fazer os elementos submetidos à compressão entrar em ruína, devido à separação de anéis.

- **DEFEITOS POR ATAQUES BIOLÓGICOS**

Os fatores ambientais correspondem aos fungos e insetos que atacam a madeira causando sua degradação. As perfurações são causadas por insetos e as podridões claras ou pardas e as manchas azuladas são causadas por fungos.

- **DEFEITOS DE SECAGEM E ARMAZENAMENTO**

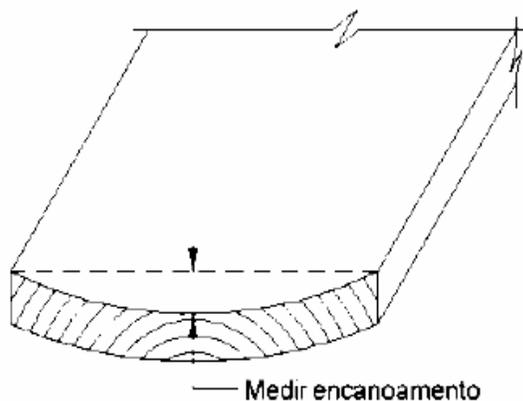
Entre os fatores de utilização destacam-se dois tipos de defeitos, os defeitos de secagem e os defeitos de processamento da madeira. O primeiro defeito tem origem nas deficiências de secagem e armazenamento das peças, podendo causar na peça encanoamento (Figura 11), arqueamento (Figura 12), encurvamento (Figura 13), torcimento (Figura 14) e rachaduras.

O encanoamento é o empenamento transversal da face. O arqueamento ocorre devido ao empenamento longitudinal das bordas. O encurvamento trata-se do

encanoamento longitudinal da face e o torcimento, o empenamento espiral no sentido do eixo da peça de madeira.

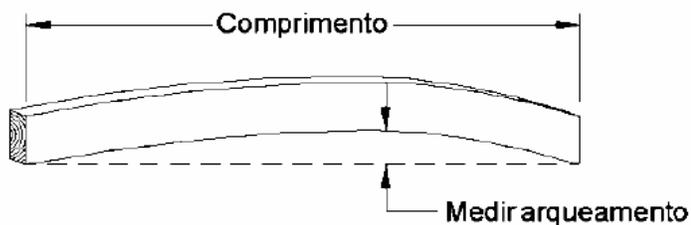
Os defeitos de processamento da madeira ocorrem devido a problemas durante a manipulação, transporte, armazenamento e desdobro da madeira, o que pode ocasionar arestas quebradas e variação da seção transversal.

Figura 11 – Medição do encanoamento



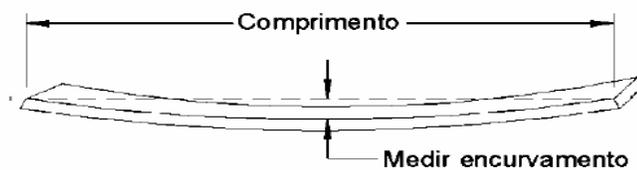
Fonte: Southern Pine Inspection Bureau, (1994).

Figura 12 – Medição do arqueamento



Fonte: Southern Pine Inspection Bureau, (1994).

Figura 13 – Medição do encurvamento



Fonte: Southern Pine Inspection Bureau, (1994).

Figura 14 – Medição do torcimento



Fonte: Southern Pine Inspection Bureau, (1994).

### 3.8 A MADEIRA E A SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O consumo de madeiras tropicais de procedência duvidosa tem sido atribuído a falta de critérios e de aplicação dos conhecimentos desenvolvidos na utilização da madeira, cabendo à região sudeste uma cota em torno de 70% da madeira extraída ilegalmente na Amazônia, destacando o estado de São Paulo. Com isso, o uso da madeira como um material ambientalmente sustentável acaba sendo denegrido, o que induz os leigos a considerarem o uso de outros materiais como substituto da madeira do ponto de vista ecológico (ZENID, 1998 apud STAMATO, 2006).

No fim da década de 80, estava ocorrendo um aumento no consumo de madeiras da Amazônia por parte das construtoras da cidade de São Paulo, resultando na escassez de espécies regionais nativas (STAMATO, 2006).

Entretanto, a madeira pode ser utilizada de forma sustentável, seguindo um manejo florestal. O aproveitamento das florestas naturais ou plantadas através de Projeto de Manejo Florestal aprovado pelo IBAMA, busca utilizar os recursos naturais a partir do princípio de sustentabilidade.

O desenvolvimento sustentável pode ser entendido como um processo integrado e equilibrado entre objetos econômicos, financeiros, ambientais e sociais. Tem-se por princípio fundamental a utilização de recursos existentes de forma a interferir o mínimo possível no equilíbrio entre o meio ambiente e o homem.

A madeira sempre foi utilizada como material de construção, seja em acabamento como em grandes estruturas, como por exemplo, pontes. Em países desenvolvidos como Noruega, Canadá, Suécia e Austrália, cerca 90% da construção habitacional é de madeira (MARQUES, 2008).

Comparando a madeira aos principais materiais utilizados na construção civil (aço, alumínio, concreto), ela é o único material de construção que é reciclável, renovável e biodegradável. Participa do equilíbrio ecológico: a madeira melhora a

qualidade do ar, seqüestrando gás carbônico do ambiente, liberando oxigênio através do processo de fotossíntese.

De acordo com Marques (2008), ao contrário do que possa parecer, a exploração da madeira não é causa de desflorestação. A indústria florestal, quando se preocupa com a sustentabilidade, conta com uma constante renovação da floresta após o abate das árvores, o que ambientalmente é mais benéfico, uma vez que as árvores mais jovens retêm maior quantidade de CO<sub>2</sub> que as árvores adultas. Quando uma árvore é cortada, o carbono que essa contém é retido em sua estrutura celular, permanecendo em um estado “dormente” por muitos anos, sendo liberado para a atmosfera quando a madeira arde ou quando se biodegrada. Dessa forma, a madeira usada na construção é importante, uma vez que armazena quantidades de carbono por um longo período de tempo.

A madeira é um material que pode ser reaproveitado das demolições de construções, através de um processo de tratamento, podendo ser utilizado para modelar pisos, móveis, esquadrias.

De um modo geral, os produtos de madeira utilizados na construção, sejam estruturais ou não, são pré-fabricados, diminuindo o desperdício e resíduos na obra.

A madeira é um material que possui um baixo consumo energético de produção, quando comparada aos demais materiais utilizados na construção civil. A Tabela 1 apresenta os valores de consumo energético para os diversos materiais.

Tabela 1 – Consumo energético de diversos materiais utilizados na construção civil

<b>MATERIAL</b>	<b>KWh/kg</b>	<b>KWh/m<sup>3</sup></b>	<b>kg/ carvão</b>
Madeira Serrada	0,7	350	0,8
Madeira Laminada-colada	2,4	1200	N.i.
Cimento	1,4	1750	260
Concreto	0,3	700	25
Tijolo	0,8	1360	140
Aço	5,9	46000	1000
Plástico/PVC	18	24700	1800
Alumínio	52	141500	4200

Fonte: Oliveira (1998 apud LAROCCA, 2002).

A construção de madeira é extremamente durável, desde que não esteja submetida a grandes variações de umidade e que se tenha um projeto adequado,

levando-se em consideração a durabilidade natural da madeira e suas possibilidades de preservação. Pode-se citar como exemplo, igrejas na Noruega que sobreviveram durante mais de mil anos sem necessidade de substituição de qualquer elemento (MARQUES, 2008).

Por todas as questões aqui mencionadas, a madeira pode ser considerada um excelente material cuja utilização e aplicação em estruturas deve ser incentivada.

### 3.9 A MADEIRA E SUA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A madeira, quando aplicada na construção civil, possui como vantagem o alívio das fundações, uma vez que as estruturas em madeira são mais leves quando comparadas às estruturas de concreto, usualmente empregadas na construção. Trata-se de um excelente isolante térmico, possuindo um ótimo desempenho estrutural. Possui como vantagem também a rapidez da construção, uma vez que os componentes podem ser pré-cortados ou mesmo pré-fabricados, reduzindo o tempo de execução da obra. Quando se tem a utilização de pré-fabricados, destaca-se também a questão do baixo desperdício no canteiro de obras.

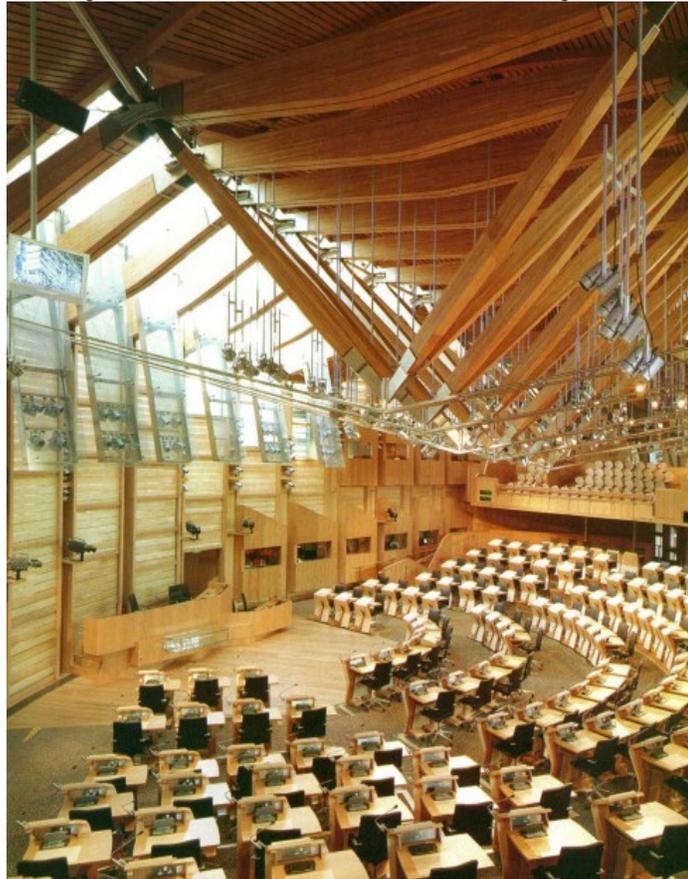
As Figuras 15 e 16 apresentam respectivamente, estruturas em madeira em igrejas medievais na Noruega e no Parlamento da Escócia.

Figura 15 – Igrejas medievais de madeira na Noruega



Fonte: Wikipédia (apud COLIN, 2011).

Figura 16 – Parlamento da Escócia. Edimburg, 2004



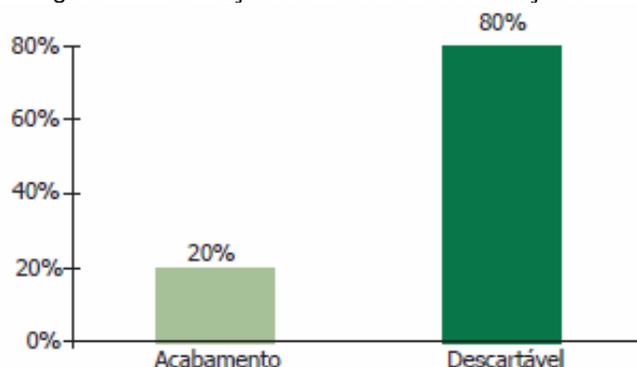
Fonte: Colin, (2011).

A madeira é considerada um material versátil utilizada na construção civil, podendo ser aplicada em estruturas, vedações, telhados, móveis, esquadrias. A sua utilização também pode ser de caráter temporário, como por exemplo, fôrmas, andaimes, escoramentos, dentre outros.

Em uma edificação de alvenaria, aproximadamente 30% desta é feita de madeira, envolvendo a estrutura do telhado, aberturas, portas e janelas, forro, etc (LAROCA, 2001).

A grande maioria (80%) da aplicação da madeira na construção civil acaba sendo descartada, através de sua utilização em fôrmas, escoramentos, marcação e nivelamento do terreno, dentre outros. Apenas 20% são utilizados na etapa de acabamento, como portas, batentes, painéis dentre outros, conforme pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Utilização da madeira na construção civil



Fonte: Imazon, (2001 apud DUARTE; GONÇALVES; MULFARTH, 200-?).

O uso em coberturas representa metade da madeira consumida no Estado de São Paulo, sendo empregadas como peças simplesmente serradas, como vigas, caibros, tábuas e pranchas. A madeira utilizada em andaimes e fôrmas para estruturas de concreto representa 33% da madeira consumida no estado de São Paulo, conforme Figura 18.

Figura 18 – Consumo de madeira serrada amazônica utilizada na construção civil, no estado de São Paulo em 2001

Usos na Construção Civil	Consumo 1000 m <sup>3</sup> %	
Estrutura de Cobertura	891,7	50
Andaimes e formas para concreto	594,4	33
Forros, pisos e esquadrias	233,5	13
Casas pré-fabricadas	63,7	4
<b>Total</b>	<b>1783,3</b>	<b>100</b>

Fonte: Sobral et. al, (2002 apud ZENID, 2009).

Os produtos utilizados na construção podem ser peças com nenhum ou pouco processamento, como é o caso da madeira roliça, ou peças com vários graus de beneficiamento, como a madeira serrada e beneficiada, lâminas e painéis de madeira.

A madeira roliça é o produto com menor grau de processamento da madeira, obtido por cortes transversais ou mesmo sem cortes. É bastante empregada de forma temporária na construção civil. A madeira roliça (tratada com produtos preservativos de madeira) pode ser utilizada também em postes de distribuição de energia elétrica.

Em sua utilização como postes, comparando a madeira com outros materiais, como o aço e o concreto, ela possui as seguintes vantagens (REMADE, 2001 apud PELIZAN, 2004): são ecológicos, pois para a fabricação de um poste de madeira (renovável) consome 2.400 Kcal de energia, contra 550.000 Kcal para o poste de concreto, que utiliza material não renovável, ferro e cimento; em função da baixa condutividade térmica que a madeira possui, os postes apresentam desempenho elétrico e nível de isolamento superiores; apresentam menor peso específico, reduzindo os custos de transporte, facilitando o manuseio e instalação.

Da madeira serrada é possível obter diversos produtos como pranchas, pranchões, tábuas, caibros, vigas, sarrafo, pontaletes, dentre outros.

A madeira beneficiada é obtida através da usinagem das peças serradas, agregando valor a elas. Envolvem operações de aplainamento, molduramento, torneamento, despeno, dentre outros. No aplainamento, retiram-se as sobremedidas e irregularidades; o molduramento é responsável pela confecção de cortes de encaixes tipo macho-fêmea no comprimento das peças destinadas a forros, lambris, etc; no torneamento, as peças tomam forma arredondada.

As lâminas de madeira podem ser obtidas por meio de dois métodos de torneamento e faqueamento. No torneamento, a tora (descascada e cozida) é colocada no torno rotativo, obtendo as lâminas destinadas à produção de compensados. No faqueamento, a lâmina é obtida da tora presa pelas laterais, de forma que uma faca é passada produzindo fatias únicas.

Os painéis de madeira surgiram a fim de amenizar as variações dimensionais da madeira maciça, diminuindo seu peso.

Abordados os produtos de madeira utilizados na construção, é apresentado a seguir alguns tipos de sistemas construtivos em madeira, podendo-se destacar:

- Sistema construtivo tipo viga-pilar: neste sistema a estrutura é independente da vedação.

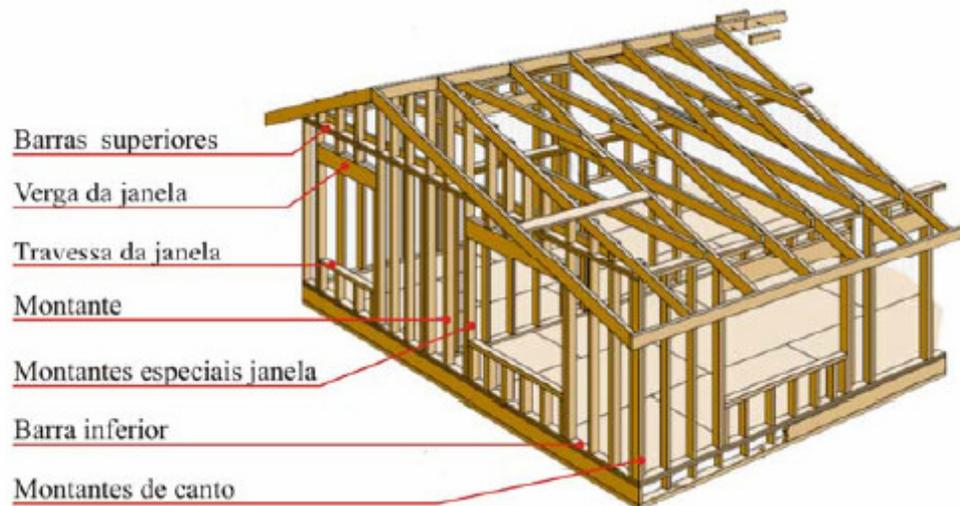
Figura 19 – Sistema construtivo tipo viga-pilar



Fonte: Laroca, (2002).

- Sistema construtivo tipo plataforma: as paredes e plataformas de piso possuem função estrutural. Aproximadamente 70% das construções residenciais nos EUA e Canadá utilizam este método de construção (LAROCA, 2002);

Figura 20 – Ossatura da vedação externa do sistema plataforma em madeira



Fonte: Adaptado de APA, (1997 apud ESPÍNDOLA; MORAES, 200-?).

- Sistema construtivo com madeira roliça: este sistema construtivo utiliza a madeira roliça com encaixe entre as toras;

Figura 21 – Utilização da madeira roliça em edificação



Fonte: Foto retirada do site Casabella, ([2011?]).

- Sistema construtivo de tábuas e mata-juntas: Para a vedação, utilizam-se tábuas com altura variável, colocadas lado a lado e vedadas com mata-juntas (sarrafo). Trata-se de um sistema muito utilizado para a construção de casas populares.

Figura 22 – Construção de tábua e mata-juntas



Fonte: Barnabé, (2010).

A utilização em estruturas de madeira serrada advindas de florestas plantadas no Brasil apresenta um considerável potencial para expansão, uma vez que a exploração de florestas nativas encontra-se cada vez mais limitada.

Como uso de madeira de reflorestamento, pode-se destacar o pínus como uma opção promissora. Entretanto, a carência de conhecimento e tradição no uso da madeira aliada a falta de especificações técnicas e informações sobre o comportamento em serviço têm restringido sua aplicação.

Um fator importante na utilização da madeira de pínus é que ela não deve ser utilizada sem tratamento, sendo que a norma NBR 7190/97 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) apresenta em seus anexos, indicações sobre a preservação da madeira para aplicação estrutural.

A madeira de pínus sem tratamento preservante, em contato direto com o solo tem durabilidade inferior a um ano. Entretanto, quando submetida a um tratamento adequado, pode ficar em contato com o solo por 20 anos ou mais, sem apresentar apodrecimento ou ataques de insetos (BARILLARI, FREITAS, 2002).

O Brasil possui atualmente uma área reflorestada de mais de 6,29 milhões de hectares, sendo 1,862 milhão da espécie de pínus, contanto com 3,231 milhões da espécie de eucaliptos e 1,2 milhão de hectares com outras espécies (SIQUEIRA, 1995 apud CALIL JUNIOR, 2011).

Para exemplificar o potencial do uso da madeira de pínus na construção civil, podem-se destacar (CALIL JUNIOR, 2011):

- ✓ Pontes de madeira laminada e tabuleiro protendido: têm sido bastante executadas na Europa, Estados Unidos e Canadá, utilizando pínus tratado;
- ✓ Montanha russa do parque temático Hopi Hari, em Vinhedo, São Paulo: é quinta maior montanha-russa de madeira do mundo, construída com a espécie de madeira yellow pine, equivalente ao pínus taeda. A montanha russa, de origem norte-americana, tem 1.024 m de extensão, apresentando estrutura em pórticos de madeira com dimensões de até 40 m de altura apoiados em 1.235 blocos de concreto armado;
- ✓ Barreiras de som: utilizadas para diminuir o ruído do trânsito em rodovias. Atualmente, na Europa e Estados Unidos, elas são feitas com pínus tratado sob pressão, podendo ser construídas como biombos, painéis eu paliçadas.

- ✓ Silos de madeira: trata-se de uma boa alternativa e está sendo utilizado em vários países, como Suíça por exemplo.

Dessa forma, a madeira do gênero pínus tem um grande potencial para o seu uso em construção civil. Entretanto, sua correta utilização depende do conhecimento do material, devendo-se utilizar peças classificadas visualmente e mecanicamente, apenas peças tratadas e a madeira seca (CALIL JUNIOR, 2011).

## 4 TÉCNICAS NÃO-DESTRUTIVAS

A madeira serrada, independentemente da espécie e dimensão, apresenta grande variabilidade em suas propriedades mecânicas. É comum encontrar diferenças de resistência acima de trezentos por cento de uma peça para outra de mesma espécie e dimensão. Este fator deve-se à forte correlação entre a resistência e a densidade da madeira, ocorrendo grande variação entre as árvores de uma mesma espécie, também devido às características naturais de crescimento, como presença de nós, que interfere na resistência, bem como a localização e dimensão deles diferem em cada peça de madeira (CURRY, 1969 apud CARREIRA; DIAS, 2006).

Devido essa grande variabilidade, um corpo de prova pode não ser representativo para um lote de madeira. Dessa forma, uma melhor avaliação pode ser obtida utilizando-se de métodos não-destrutivos.

Os ensaios não-destrutivos são realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, através de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais, de forma a não interferir em seu uso posterior (ABENDE, 2006 apud CANDIAN, 2007).

O uso de técnicas não destrutivas pode ter uma aplicação potencial na avaliação de madeira em estruturas, pois se tem buscado cada vez mais o reparo e reabilitação de estruturas existentes, aumentando a ênfase em avaliações de estruturas *in-situ*, o que por sua vez, requer técnicas não destrutivas precisas e rentáveis (ROSS; PELLERIN, 1994 apud PELIZAN, 2004).

A maioria dos métodos não destrutivos desenvolvidos têm por objetivo: melhorar a caracterização do material, sem o destruir, garantir segurança na atribuição da resistência mecânica e possibilitar a sua utilização em novas situações como a avaliação do comportamento estrutural de produtos derivados de madeira. (MACHADO, 2000 apud PELIZAN, 2004).

A pesquisa sobre ensaios não-destrutivos em madeira e derivados de madeira foi incentivada nos EUA por um simpósio em Pullman, Washington, em 1980, abordando a medição de propriedades físicas e mecânicas, classificação de

materiais, e monitoramento de defeitos em árvores, toras, madeira sólida, madeira serrada e derivados (KAWAMOTO; WILLIAMS, 2002 apud MORALES, 2006).

Jayne (1959) foi quem iniciou a hipótese fundamental para a avaliação não destrutiva da madeira. Propôs que a armazenagem de energia e as propriedades de dissipação da madeira, são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento estático deste material, podem ser medidas de forma não destrutiva. Microscopicamente, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores contribuintes para a rigidez e resistência. Tais propriedades são observáveis como frequência de oscilação na vibração ou transmissão da velocidade do som, assim, as taxas de deterioração de vibrações livres ou atenuação de ondas acústicas são usadas para observar a propriedade de dissipação de energia na madeira.

Segundo Bucur (1995), em materiais homogêneos e isotrópicos como aço, plásticos e cerâmicas, a avaliação não destrutiva detecta falhas oriundas do processo de fabricação. Já na madeira, essas irregularidades ocorrem naturalmente e a sua influência sobre as propriedades mecânicas, pode ser avaliada através de métodos não destrutivos.

Existem diversas técnicas de avaliação não-destrutiva que são empregadas para a classificação da madeira, dentre as quais podem se destacar a classificação visual, a técnica de ultrassom, ondas de tensão, vibração transversal, resistógrafo e classificação pela máquina MSR.

#### 4.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL

A classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça estrutural diferem das propriedades mecânicas de corpos-de-prova isentos de defeitos, isto ocorre devido às características de crescimento, sendo que estas podem ser vistas e julgadas pelo olho humano. Com o auxílio de regras de classificação, as características de crescimento são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade (CARREIRA; DIAS, 2006).

A classificação visual é um dos mais simples, antigo e mais utilizado método não destrutivo para classificação de madeiras, possibilitando identificar características como a cor, presença de defeitos, podridão e nós, levando em consideração o tamanho, número e localização deles. Embora considerada bastante

importante, a classificação visual apresenta algumas limitações, pois identifica apenas valores qualitativos, de forma que as condições reais do material podem não ser detectadas, uma vez que a avaliação fica limitada às faces externas da madeira, não garantindo sua performance durante o uso (SHIMOYAMA, 2005). Dessa forma, não é aconselhável empregar somente esta técnica na avaliação da qualidade estrutural, visto que não tem como examinar a integridade interna das peças estudadas.

De acordo com (MADSEN, 1992 apud CARREIRA; DIAS, 2006), de toda a madeira produzida na América do Norte, cerca de 95 a 98% é classificada apenas visualmente, algo em torno de 235.000.000 m<sup>3</sup>/ano, correspondendo a aproximadamente 10 bilhões de dólares. Entretanto, o volume de madeira classificada mecanicamente juntamente com a classificação visual vem aumentando progressivamente na América do Norte.

Na América do Norte, a maioria das espécies é distribuída em grupos, e a madeira obtida a partir de espécies de um mesmo grupo, é considerada equivalente. Elas são agrupadas quando possuem as mesmas propriedades mecânicas, ou quando a madeira de duas ou mais espécies possuem semelhança anatômica ou por conveniência de comercialização (GREEN; KRETSCHMANN, 1999 apud, CARREIRA; DIAS, 2006).

O SPIB (Southern Pine Inspection Bureau) é uma organização sem fins lucrativos, que se dedica à manutenção de normas de qualidade para a indústria Southern Pine. Tem por função formular e publicar regras de classificação para a madeira serrada da Southern Pine, bem como manter uma equipe de supervisores de qualidade que inspeciona as práticas de classificação nas serrarias associadas, dando treinamento de classificação para estas, buscando um alto grau de eficiência na classificação de todas as mercadorias.

Em 1970, a norma PS 20-70 (American Softwood Lumber Standard) foi editada, incorporando várias características aos critérios vigentes até o momento, incluindo as dimensões verde e seca para a determinação da retração da madeira.

A norma National Grading Rule, nos EUA, fixa as condições para elaboração de regras de classificação visual de coníferas, determinando que todas as regras de classificação visual em vigor nos EUA (inclusive SPIB), deveriam ser fundamentadas na norma ASTM D245 de 1993, para determinação de seus critérios de classificação. Sendo que os princípios básicos desta norma permitem a avaliação de

qualquer peça de madeira em termos de uma razão de resistência a flexão, e esta razão de resistência é uma relação hipotética entre a resistência de uma peça de madeira (que apresenta características visíveis de crescimento, reduzindo sua resistência) e a resistência de um corpo-de-prova isento de defeitos da mesma madeira.

A tabela 2 apresenta as classes visuais descritas na norma National Grading Rule, abordando a razão da resistência a flexão mínima associada a cada classe, a fim de se obter um índice comparativo de qualidade.

Tabela 2 – Classes de qualidade visual

<b>Dimensões</b>	<b>Classe</b>	<b>Razão de resistência a flexão (%)</b>
Caibros e pranchas	Select Structural	67
	Nº 1	55
	Nº 2	45
	Nº 3	26
Postes	Select Structural	65
	Nº 1	55
	Nº 2	45
	Nº 3	26

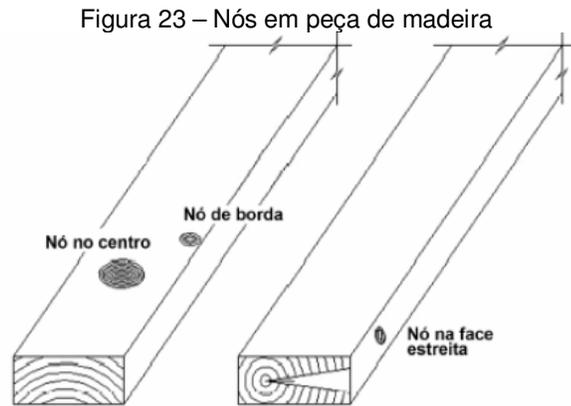
Fonte: National Grading Rule (apud CARREIRA; DIAS, 2006).

A classificação visual consiste na inspeção visual das faces, lados e das extremidades de cada peça, examinando-se em todo o comprimento das peças, a localização e a natureza dos nós e outros defeitos presentes na superfície. Verifica-se também a inclinação das fibras, empenamentos (encurvamento, encanoamento, arqueamento e torcimento) e fendas.

Nas extremidades das peças (seção transversal) verifica-se a quantidade de anéis. A densidade de anéis de crescimento é relacionada com a idade da madeira, pode ser medida pela quantidade de anéis de inverno presente em 25 mm medidos em uma linha radial representativa.

Nas peças são medidos os três maiores nós posicionados no centro da face larga, na borda da face larga e na face estreita, conforme Figura 23. Devem ser avaliados em termos de proporção de área que ocupam na seção transversal da peça. Quando se tem um conjunto de nós, mede-se como um nó individual, adotando um diâmetro equivalente de um conjunto de nós como a soma de seus

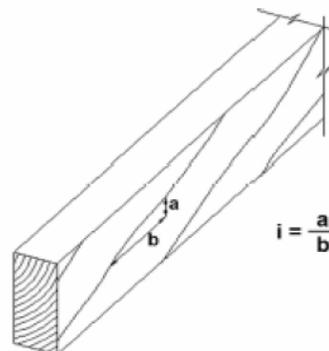
respectivos diâmetros. Entretanto, no caso de se ter dois ou mais nós próximos, apresentando fibras inclinadas em torno de cada nó individualmente, não se deve considerar um conjunto de nós.



Fonte: Southern Pine Inspection Bureau, (1994).

A inclinação das fibras é medida nas quatro faces, a máxima inclinação observada, sendo obtida pelo ângulo de inclinação em relação à extremidade da peça (Figura 24).

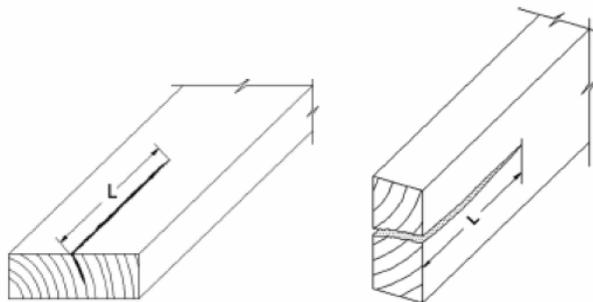
Figura 24 – Inclinação das fibras em uma peça de madeira



Fonte: Southern Pine Inspection Bureau, (1994).

De acordo com Southern Pine Inspection Bureau (1994), as rachas e fendas devem ser medidas pelo seu comprimento paralelo ao comprimento da peça, conforme Figura 25.

Figura 25 – Racha anelar e fenda (respectivamente) em uma peça de madeira



Fonte: Southern Pine Inspection Bureau, (1994).

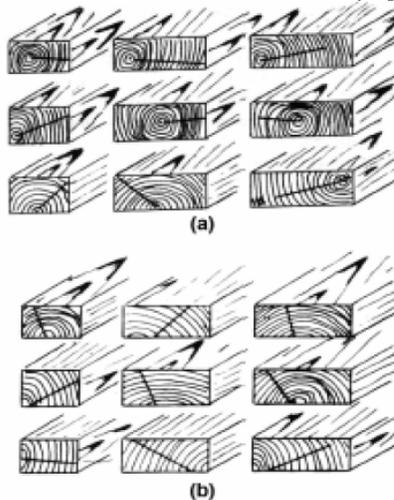
Pelo método norte-americano de classificação visual tem-se três classes de densidade: *dense*, *médium*, *coarse*. Decorrentes a quantidade de madeira de inverno e o número de anéis de crescimento existentes em uma extensão de 2,5 cm medida na direção radial, conforme Tabela 3 e Figura 26.

Tabela 3 – Classes de densidade

Classe	Anéis / 2,5cm	Quantidade de madeira de inverno
Dense	$\geq 6$	$> 1/3$
	$\geq 4$	$> 1/2$
Medium	$\geq 4$	
Coarse	$< 4$	

Fonte: National Grading Rule (apud CARREIRA; DIAS, 2006).

Figura 26 – Formas de medir a densidade em peças de madeira



Fonte: Southern Pine Inspection Bureau, (1994).

As classes *médium* e *coarse* são agrupadas e recebem o nome de *non-dense* conhecidas como “ND”, enquanto que as classes *dense* são conhecidas como “D”.

Carreira e Dias (2005) realizaram um estudo de classificação visual de 600 peças do gênero *Pinus*, a fim de verificar a adequação das regras de classificação visual do Southern Pine Inspection Bureau (SPIB). Concluíram que o método de classificação visual descrito nas regras do SPIB mostrou-se adequado para ser aplicado na madeira proveniente de *Pinus sp* plantadas no Brasil.

## 4.2 ULTRASSOM

O ultrassom é utilizado em vários lugares do mundo, para a estimativa de propriedades de muitas espécies de madeira. Seu emprego tem sido realizado em avaliações da qualidade de peças industrializadas, na estimativa de propriedades físicas e mecânicas, tanto em madeira serrada, quanto em produtos à base de madeira, sendo utilizada até mesmo em árvores em pé.

A técnica do ultrassom apresenta diversas vantagens, como por exemplo: baixo custo de aquisição do equipamento, quando comparado ao custo de máquinas de classificação automática, facilidade de treinamento e utilização, podendo ser usado pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos a fim de se buscar uma maior uniformidade da madeira e seus derivados.

A aplicação do ultrassom na engenharia civil iniciou-se na década de 50 na Europa, sendo inicialmente empregado em investigações de concreto, para posteriormente iniciar-se os estudos para sua aplicação em madeira, onde se encontraram diversas dificuldades devido às peculiaridades anatômicas da madeira.

Os primeiros resultados experimentais com a aplicação do ultrassom foram obtidos por Waubke, em 1983, na Alemanha (SANDOZ, 1989 apud CANDIAN, 2007).

Vários autores vêm estudando esse método para estimativa de constantes elásticas de madeira. Bucur (1984 apud BARTHOLOMEU, 2001), além de propor a base teórica de utilização do ultrassom para determinação de constantes elásticas da madeira, por meio de pequenos corpos-de-prova cilíndricos, citou Lee (1958), Burmester (1965) e Mc Donald (1978), como pesquisadores que utilizaram o ultrassom na madeira para determinação de constantes elásticas.

A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ultrassom é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade (OLIVEIRA, 2001).

De acordo com a faixa ou espectro de frequência, as vibrações mecânicas e conseqüentemente, as ondas associadas a essas vibrações, podem ser classificadas em três grupos: infrassons – que apresenta frequência abaixo da audiodfrequência, ou seja, inferiores a 20 Hz; sons – constituídos por frequências situadas entre 20 Hz e 20 kHz, conhecida como áudio frequência, refere-se ao intervalo de frequências capaz de sensibilizar o ouvido humano; e os ultrassons – produzidos por frequências acima de 20kHz.

De acordo com Azevedo Júnior (2002), existem algumas vantagens na utilização de frequências ultrassônicas, ao invés dos infrassons e audiodfrequências, que são:

- ✓ Quanto maior a frequência, menor será o comprimento de onda. O que permite que se consigam, com maior facilidade, as condições necessárias à propagação de ondas planas no material, o que é essencialmente importante quando se tem pequenos corpos;
- ✓ Os coeficientes de absorção são usualmente mais altos e, conseqüentemente, muito mais fáceis de serem mensurados em altas frequências;
- ✓ Os ultrassons são inaudíveis;
- ✓ As ondas associadas às altas frequências são mais facilmente direcionadas.

A análise da propagação de ondas sonoras pode ser realizada por métodos distintos: método de eco pulsado, de ressonância, de transmissão e de imersão.

a) O método de eco pulsado analisa a reflexão das ondas ultrassônicas devido a descontinuidade ou à interface da peça. Geralmente é utilizada apenas uma sonda (emissora e receptora) ou duas na mesma superfície, assim, é necessário que apenas uma das superfícies esteja acessível. Mostra-se pouco eficaz na inspeção de materiais heterogêneos, como a madeira, devido a grande dispersão das ondas que o atravessam.

b) O método de ressonância baseia-se na frequência fundamental de vibração da amostra. Mediante a ação do emissor sobre a madeira, ocasionando um aumento

brusco da amplitude de oscilação, pelo fenômeno de ressonância. Através da frequência de ressonância, densidade e dimensões da madeira, é possível estimar o seu módulo de elasticidade. É na maior parte dos casos, utilizado na inspeção de chapas metálicas.

c) O Método de transmissão consiste na propagação de ondas ultrassônicas de frequência mais baixa que no método de eco, assim, é a mais adequada para materiais heterogêneos, possuindo maior alcance e capacidade de tornar os defeitos. Esta é a técnica mais utilizada em ensaios de madeira, e utiliza duas sondas (uma transmissora e outra receptora) em faces opostas da peça, conforme Figura 27. Esta foi a técnica não destrutiva utilizada neste trabalho.

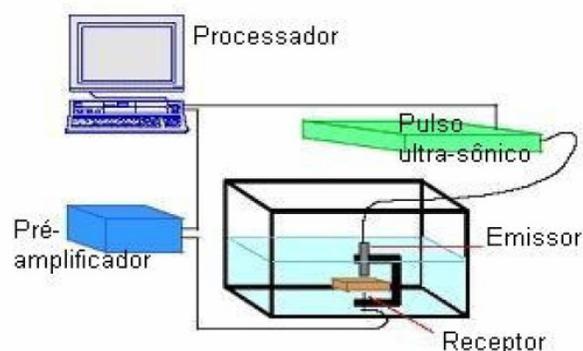
Figura 27 – Ensaio de ultrassom – técnica de transmissão



Fonte: Ross e Pellerin (1994 apud PELIZAN, 2004).

d) O método de imersão é semelhante ao método eco pulsado ou de transmissão, o que diferencia é que tanto a sonda como a amostra são imersas em água, conforme Figura 28.

Figura 28 – Ensaio de ultrassom – técnica de imersão



Fonte: Ross e Pellerin (1994 apud PELIZAN, 2004).

Para o presente trabalho, utilizou-se a aplicação e medição de ondas ultrassônicas que consiste no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. A onda é introduzida no material por um dos transdutores e captada pelo outro transdutor, sendo a contagem de tempo em microssegundos, realizada pelo próprio instrumento de ultrassom.

Para determinar o módulo de elasticidade, utiliza-se o tempo registrado pelo equipamento (para o cálculo da velocidade) com a densidade da madeira, na equação (8):

$$E_d = \rho x V^2 \quad (8)$$

Onde:

$E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico ( $10^{-6}$  MPa);

$\rho$  é a densidade da madeira ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ );

$V$  é a velocidade da onda longitudinal (m/s).

Na Figura 29 são apresentados dois equipamentos de ultrassom, o Sylvatest e o V-Meter, respectivamente.

Figura 29 – Equipamentos de ultrassom



Fonte: Candian, (2007).

Existem diversos fatores que influenciam a propagação da onda ultrassônica na madeira, podendo citar: teor de umidade, geometria da peça, frequência e densidade aparente (BARTHOLOMEU, 2001).

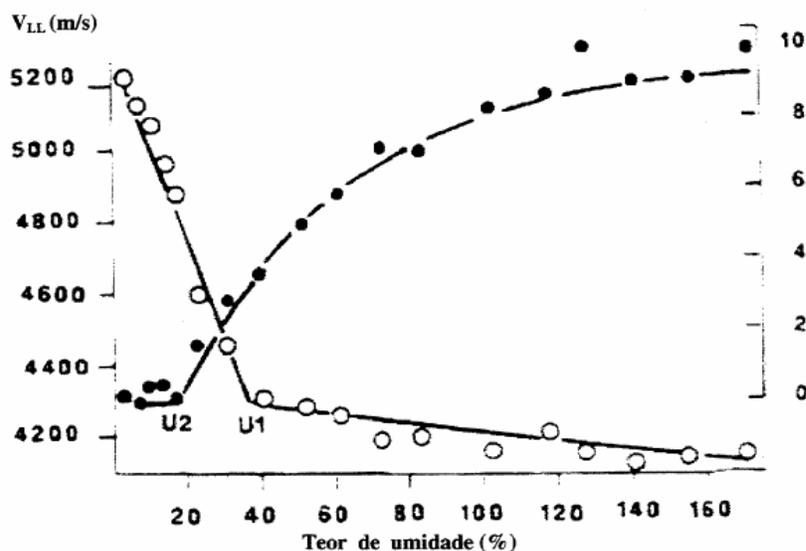
- Teor de umidade

A falta de homogeneidade da madeira influencia a velocidade de propagação. O pulso ultrassônico será atenuado por difusão nas interfaces em uma amostra que apresenta fissuras internas. Entretanto, se a dimensão da descontinuidade for muito menor que o comprimento de onda, a alteração do pulso será pequena. A intensidade de uma onda ultrassônica diminui à medida que se afasta da fonte, sendo a diminuição da amplitude da onda no material, denominada atenuação ou decréscimo acústico.

A atenuação provocada pela falta de homogeneidade da madeira trata-se de um parâmetro sensível às condições higroscópicas e implica na estimativa da porosidade do material.

Sakai et al. (apud BARTHOLOMEU, 2001), estudaram a variação da velocidade longitudinal do ultrassom em função de vários teores de umidade, originando a Figura 30:

Figura 30 – Variação da velocidade longitudinal de ultrassom (m/s) em função do teor de umidade (Curva U1) e a variação dos valores de atenuação das ondas ultra-sônicas (em dB) em função do teor de umidade (Curva U2) para a espécie metasequóias



Fonte: Sakai et al., (apud BARTHOLOMEU, 2001).

Analisando a Figura 30, pode ser verificado que a velocidade da onda ultrassônica diminui à medida que o teor de umidade aumenta, enquanto que a

atenuação aumento com o aumento da umidade. Assim, tem-se a velocidade máxima e o mínimo valor de atenuação quando a madeira está seca.

A variação da velocidade em função do teor de umidade apresenta um ponto crítico (U1), que corresponde ao PSF (Ponto de Saturação das Fibras), onde se tem o maior decréscimo de velocidade do ultrassom. A partir desse ponto, as células da madeira preenchem-se com água livre, e a velocidade da onda tende a se estabilizar, pois a presença de água em excesso aumenta a atenuação das ondas ultrassônicas.

A variação da atenuação em função do teor de umidade apresenta um ponto crítico (U2). Verifica-se que a atenuação é praticamente constante para pequenos valores de umidade, mas aumenta sensivelmente a partir de U2.

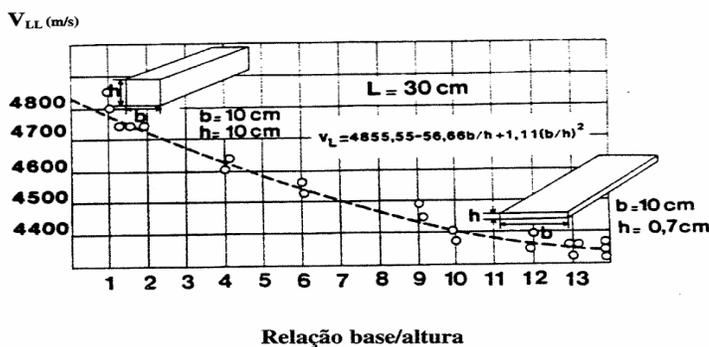
Estudo realizado por Costa (2001), sobre o comportamento da velocidade de propagação de ondas na madeira em função da umidade, observou que a velocidade de propagação das ondas de ultrassom, na direção longitudinal, radial e tangencial, tendem a aumentar com a diminuição da umidade, e que a variação da velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal é mais significativa e possui um comportamento mais estável do que as direções radial e tangencial (nestas direções, o padrão de comportamento das velocidades em função da umidade variou conforme a espécie). No mesmo estudo, verificou também que as maiores variações de velocidade de propagação das ondas com a variação da umidade ocorrem na direção longitudinal, seguida da radial e posteriormente a tangencial. Constatou que abaixo do PSF, o efeito da umidade na velocidade de propagação da onda é mais significativo que acima deste ponto.

Estudo realizado por Oliveira e Sales (2005) sobre o efeito do teor de umidade na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na direção longitudinal das espécies pinus caribea, pinus elliotti, eucalipto citriodora, eucalipto grandis, cupiúba e jatobá, concluiu que a velocidade ultrassônica demonstrou-se sensível à variação da umidade da madeira, apresentando uma tendência de diminuição da velocidade com o aumento do teor de umidade para todas as espécies estudadas. A influência do teor de umidade ocorreu de forma diferente acima e abaixo do PSF, sendo mais significativo abaixo do PSF. Concluíram que os resultados obtidos por meio da técnica devem ser ajustados antes da estimativa de propriedades físicas e mecânicas da madeira quando o teor de umidade estiver acima de 12%.

- Geometria da peça

Bucur (1984 apud BARTHOLOMEU, 2001) estudou a variação da velocidade de propagação de ultrassom, em função da variação da seção transversal, em corpos de prova de *Sapin Douglas*, de 30 cm de comprimento, com relação base/altura da seção transversal variando entre 1 e 14. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 31.

Figura 31 – Variação da velocidade de propagação de ondas longitudinais em função da relação de base/altura



Fonte: Bucur (1984 apud, BARTHOLOMEU, 2001).

Nota-se, com a Figura 31, que a velocidade longitudinal decresceu significativamente entre a relação de  $b/h=1$  e a relação  $b/h=14$ .

Oliveira et al. (2005) estudaram a variação da velocidade do ultrassom na direção longitudinal em função da variação da seção transversal de peças de *Eucalyptus citriodora*. Concluíram que a velocidade da onda longitudinal mostrou-se sensível à variação das dimensões da seção transversal do corpo de prova. Apresentando uma tendência de diminuição da velocidade em função da redução das dimensões da seção transversal entre as razões  $b/h$  de 1 até 12.

Um fator preponderante para essa variação da velocidade longitudinal é a relação  $L/\lambda$ , onde:

$L$  = comprimento do corpo de prova;

$\lambda$  = comprimento de onda.

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) é função da velocidade de propagação da onda no meio considerado e da frequência do transdutor ( $\lambda = V / f$ ), onde  $V$  = velocidade de propagação da onda de ultrassom;  $f$  = frequência da onda de ultrassom. Assim,

corpos de prova podem afetar as condições de propagação das ondas. Dessa forma, é desejável que o corpo de prova tenha dimensões algumas vezes maiores do que o comprimento de onda. Bucur (1995) verificou através de ensaios da espécie Spruce que as velocidades de propagação das ondas não eram mais afetadas pelo comprimento de onda quando o comprimento de percurso da onda era maior que  $2 \lambda$ . Assim, quanto menor o corpo de prova, maior deve ser a frequência do transdutor, uma vez que haverá redução do comprimento de onda. Entretanto, é importante ressaltar, que para a madeira, frequências maiores que 1 MHz não devem ser utilizadas, pois a atenuação torna-se muito elevada.

- Frequência

A influência da frequência na propagação de ondas ultrassônicas em peças de madeira é dependente das dimensões dos corpos de prova.

De acordo com Bucur (1995), quando uma onda longitudinal se propaga ao longo da direção das fibras da madeira, os comprimentos de onda e o comprimento das células são da mesma ordem de grandeza, esta propagação ocorre no regime de dispersão estocástico. Por outro lado, quando a propagação é ao longo das direções radial e tangencial, os comprimentos de onda são consideravelmente maiores que as dimensões médias das células e a propagação ocorre dentro de um regime de dispersão conhecido como dispersão de Rayleigh. Estas duas condições de propagação estão diretamente relacionadas à frequência da onda utilizada.

Bartholomeu (2001) através de estudo realizado com as espécies *Goupia glabra*, *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliotti*, tanto em corpo de prova de dimensões normatizadas, quanto em vigas de dimensões estruturais, ensaiando em dois teores de umidade: saturadas e secas ao ar (aproximadamente 12%), constatou que o teor de umidade apresenta influência considerável na propagação do ultrassom em peças de madeira. A velocidade da onda foi maior nos corpos de prova do que nas vigas estruturais, ressaltando a influência da geometria da seção na propagação da onda de ultrassom. Conclui também que o equipamento mostrou-se eficiente para o uso em peças estruturais, já nos corpos de prova, na frequência utilizada no estudo (45 Hz), não foi o mais indicado, já que o número reduzido de ondas que se propaga no interior da peça, interfere na medição exata da velocidade. Neste caso, a utilização do ultrassom seria ideal, em função do tamanho do corpo de prova estudado, com frequência igual ou superior a 150 Hz.

- Densidade

De modo geral, para uma mesma espécie de madeira e com teor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade propicia uma maior velocidade de propagação em qualquer das três direções de propagação. Assim, para uma melhor confiabilidade tornam-se importante a utilização de amostras com menores teores de umidade e com maiores densidades (OLIVEIRA, 2001).

Estudo realizado por Waubke (1981 apud BARTHOLOMEU, 2001), concluiu que a classificação de peças estruturais por ultrassom é rápida e segura, sendo possível utilizar este método quando se tem teores de umidade diferentes e podem-se fazer correlações entre os resultados dinâmicos e estáticos. Ressalta que a tecnologia do uso do ultrassom na classificação da madeira ainda pode ser muito desenvolvida, pois se trata de um fenômeno físico. Sendo possível a seleção de toras, até mesmo antes do abate, o que é economicamente viável. Dessa forma, o método de classificação por ultrassom pode ser uma alternativa aos métodos de classificação tradicionais.

Diversas pesquisas nacionais e internacionais demonstram a viabilidade desta técnica, através de correlações entre os módulos de elasticidade obtidos em ensaios não destrutivos com emprego da técnica de ultrassom e obtidos em ensaios destrutivos (compressão paralela às fibras e flexão estática). Os valores encontrados na literatura indicam valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre 0,57 e 0,89 (BARTHOLOMEU, 2001; NOGUEIRA, 2003; OLIVEIRA, 2005; ROSS; PELLERIN, 1991, 1994 apud CANDIAN; SALES, 2009).

Candian e Sales (2009) realizaram testes de ultrassom em 30 peças com dimensões estruturais da espécie de *Eucalyptus citriodora*, obtendo um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,76 a partir da reta de regressão entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico. Comprovando a eficiência da técnica na aferição do módulo de elasticidade.

Nogueira e Ballarin (2007) mostraram a sensibilidade do método de ultrassom na avaliação do módulo de elasticidade estático da madeira de *P. taeda* L. nos eixos de simetria longitudinal, obtendo um coeficiente de determinação das regressões lineares ( $R^2$  de 89%), na direção radial da madeira ( $R^2$  de 62%). Na direção tangencial, o coeficiente de determinação da regressão linear foi relativamente inferior, apresentando um  $R^2$  de 31%, não indicando sensibilidade do método do

ultrassom na avaliação do módulo de elasticidade estático nessa direção, nos condicionantes do estudo em questão.

Oliveira et al. (2003) em um estudo da avaliação de propriedades mecânicas da madeira, por meio do ultrassom, analisando 600 peças com dimensões estruturais das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliotii*, obtiveram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,83, sendo altamente significativo.

Carreira et al. (2006) realizaram teste com ultrassom seguido de ensaio de flexão estática em 600 peças com dimensões estruturais *Pinus sp*, obtendo um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,90.

Gonçalves e Bartholomeu (2000) estudaram a utilização deste método nas espécies de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliotii* seguido de ensaio de flexão estática em 50 corpos de prova para cada espécie apresentando dimensões de 6 cm x 12 cm x 250 cm. Obtiveram coeficiente de correlação entre o módulo de elasticidade à flexão e o módulo de elasticidade dinâmico de 0,85 para a espécie de *Eucalyptus citriodora* e de 0,88 para a espécie de *Pinus elliotii*, indicando que há possibilidade de se estudar a classificação de peças de madeira em serraria.

Miná et al. (2004) realizaram estudo a fim de investigar o uso da técnica para avaliar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) por meio da comparação com ensaio de flexão estática (MOE) em 50 postes de eucalipto com comprimentos de 7,5 m e 9 m, obtiveram resultado com boa correlação entre as propriedades determinadas pelo método de ultrassom e o de flexão estática, indicando que esta técnica pode ser usada para avaliar o módulo de flexão estática de peças de madeira.

Analisando as correlações citadas, nota-se a eficiência da técnica de ultrassom, demonstrando que esta técnica possui confiabilidade para a avaliação mecânica de peças de madeira.

#### 4.3 ONDAS DE TENSÃO (STRESS WAVE)

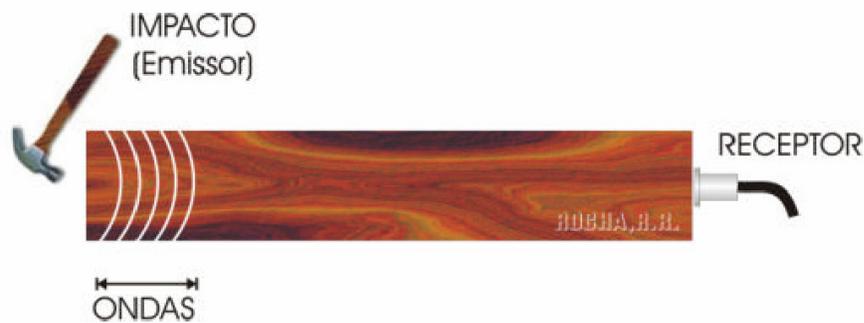
Esta técnica é similar a de ultrassom, entretanto possui a diferença de que as ondas são geradas por impacto e não induzidas por transdutores como na técnica de ultrassom e também na frequência das emissões (BODIG, 2001 apud MORALES, 2006).

A técnica de stress wave, conhecida como ondas de tensão, vem sendo investigada há mais de 30 anos e tem tido diversas aplicações na indústria de

produtos florestais. O método consiste na aplicação de uma onda de tensão (impacto) no material e a análise do fenômeno de propagação desse estímulo, sendo que os principais parâmetros analisados são a velocidade de propagação dessa onda de tensão induzida e sua atenuação no material (TARGA et al., 2005 apud CUNHA, 2007).

Para explicar o método é possível utilizar a teoria de propagação de ondas unidirecionais em uma barra homogênea elástica. Dessa forma, ao aplicar um impacto em uma das extremidades dessa barra (Figura 32), gera-se uma onda que se movimenta ao longo da barra, de modo a excitar as partículas da extremidade que recebeu o impacto, sendo que as partículas da extremidade livre encontram-se em repouso. A onda caminha a uma velocidade constante ao longo a barra e após percorrer toda a extensão da barra, a onda é refletida pela extremidade livre da barra retornando ao seu ponto de origem.

Figura 32 – Barra elástica submetida a um impacto



Fonte: Rocha, (2003).

Mesmo que a velocidade de deslocamento da onda continue sempre constante, o movimento das partículas da barra vai diminuindo a cada passagem da onda pela barra, e após um determinado tempo, as partículas da barra retornam à condição inicial de repouso.

A técnica de ondas de tensão pode ser utilizada como uma ferramenta para o manejo florestal, fornecendo dados sobre a qualidade das árvores, possibilitando a verificação de presença de defeitos e também na estimativa de propriedades mecânicas da peça em função da velocidade de propagação da onda de tensão.

Sendo uma técnica não destrutiva, a propagação da onda de tensão apresenta como principal vantagem, a possibilidade do estudo do interior de árvores vivas ou peças de madeira, sem alterar suas condições iniciais.

A figura a seguir apresenta o equipamento de ondas de tensão da marca FAKOPP 2D:

Figura 33 – Equipamento de onda de tensão FAKOPP



Fonte: Sales et al., (2008).

O equipamento apresenta a opção de até oito canais de emissão e recebimento da onda (Figura 34).

Figura 34 – Sensores de emissão e recebimento da onda sonora



Fonte: Sales et al., (2008).

A técnica de ondas de tensão permite a distinção entre a estrutura natural da madeira e patologias inerentes. Para uma maior acuracidade do método, deve-se considerar fatores como: velocidade e atenuação em diferentes direções, as propriedades de reflexão nos contornos dos elementos anatômicos, e a dispersão devido às heterogeneidades (BERNDT; SCHNIEWIND; JOHNSON, 2000).

Por meio dos valores de propagação na direção radial é possível detectar a deterioração da madeira, detectando singularidades como presença e magnitude da medula e de defeitos internos. As medições longitudinais são utilizadas para a

estimativa de propriedades mecânicas tais como o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ).

A madeira sadia e de maior rigidez apresenta, em geral, uma velocidade da propagação da onda de tensão mais rápida quando comparada à madeira deteriorada e com módulo de elasticidade inferior. A presença de degradação na linha entre os dois transdutores resulta numa diminuição da velocidade de propagação da onda de tensão, quando comparada com uma velocidade de referência (CANDIAN; SALES, 2009).

Para um material dispersivo como a madeira, a velocidade da onda de tensão é dependente da frequência, e por isso, deve-se ter atenção especial com as dimensões da amostra, o tipo de transdutor e a largura da banda, considerando-se também o fenômeno de propagação e a anisotropia do material (BLITZ; SIMPSON, 1996).

A técnica de propagação de ondas de tensão apresenta algumas vantagens sobre os outros métodos acústicos na avaliação das propriedades da madeira, pois o equipamento utilizado nas avaliações é bem mais simples e portátil, de modo a facilitar a avaliação em qualquer local, inclusive no campo. Como apresenta baixo custo, possibilita a aquisição do mesmo por pequenas indústrias para avaliação não destrutiva de vários produtos de madeira. Pode ser empregado para diferentes situações, desde a árvore em pé até os produtos finais obtidos (WANG et al., 2001 apud CUNHA, 2007).

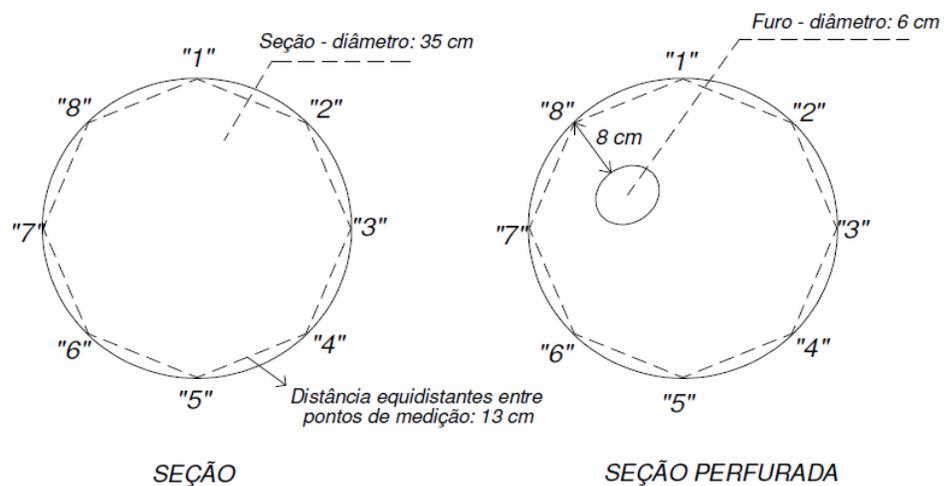
Com avanço do uso das técnicas não destrutivas, tornou-se possível o desenvolvimento de tecnologias para obtenção de imagem tomográfica da madeira, a qual permite a reconstrução de seções transversais da árvore.

Gabriel e Ballarin (2000) utilizaram corpos de prova de *Pinus taeda* com dimensões de 2cm x 2cm x 42cm em ensaio não destrutivo de ondas de tensão (módulo de elasticidade dinâmico) seguidos de ensaio convencional de flexão (módulo de elasticidade estático). A análise comparativa dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade entre os dois métodos (destrutivo e não destrutivo) revelou a potencialidade do método de ondas de tensão como ferramenta na classificação da madeira serrada desta espécie.

Estudo realizado por Candian e Sales (2009), a fim de se analisar a seção (Figura 35) de madeira da espécie *Eucalyptus citriodora* por meio da obtenção de imagem tomográfica (Figura 36), utilizando o equipamento Fakopp 2D. Os autores

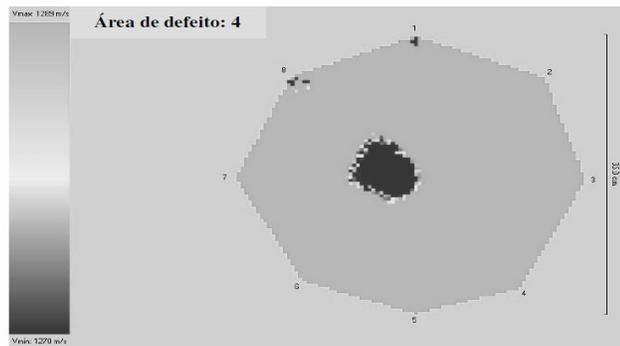
concluíram que a imagem tomográfica retratou de forma adequada a presença de defeitos na seção da peça estudada, com indicação de porcentagem de defeitos muito próxima ao real, comprovando que esta técnica pode ser usada como uma ferramenta importante na avaliação de defeitos internos em peças de madeira.

Figura 35 – Seção da peça estudada, antes e após a realização do furo



Fonte: Candian e Sales, (2009).

Figura 36 – Imagem tomográfica com a presença do furo



Fonte: Candian e Sales, (2009).

Ross e Pellerin (1994 apud NOGUEIRA et al., 2008), utilizaram o método de propagação de ondas de tensão visando detectar indiretamente, a presença de organismos xilófagos na madeira. Para algumas das espécies ensaiadas, obtiveram resultados bastante satisfatórios, conseguindo identificar a presença de organismos xilófagos em 93% dos casos, em que elas efetivamente existiam.

Estudo realizado por Gabriel e Ballarin (2000) com a madeira de *Pinus taeda* verificou por meio de uma análise comparativa dos resultados obtidos do ensaio de

flexão estática e do ensaio não destrutivo de ondas de tensão, que este método tem grande potencialidade e revela-se como uma ferramenta na classificação estrutural da madeira serrada da espécie estudada.

Ross et al. (1999 apud CANDIAN, 2007), apresentaram a possibilidade de inspeção de pontes de madeira utilizando a técnica de propagação de ondas de tensão.

Paduelli (2011) em estudo para verificar a acuracidade da técnica de ondas de tensão na avaliação interna de árvores urbanas (espécie *Caesalpinea peotophoroides*) obteve os seguintes resultados: 86% das seções analisadas possuíram um coeficiente de determinação que se enquadrou em níveis de alta e muito alta significância ( $R^2$  entre 0,66 e 0,80, e  $R^2$  superior a 0,80, respectivamente); e 14% das seções analisadas enquadraram-se em níveis de média significância ( $R^2$  entre 0,56 e 0,65). Concluiu que o nível de confiabilidade obtido nos ensaios permite a utilização desta técnica na avaliação da parte interna do lenho de árvores urbanas.

#### 4.4 VIBRAÇÃO TRANSVERSAL

O método de vibração transversal foi um dos primeiros métodos não destrutivos investigados para a determinação do módulo de elasticidade da madeira. Apesar da sua concepção simples, e mesmo com grandes avanços obtidos com outros métodos, por exemplo, o ultrassom, revela-se com grande potencial de aplicação, sobretudo pela precisão do modelo matemático a ele associado e pela possibilidade de sua aplicação a peças estruturais (BALLARIN; GONÇALVES, 2001).

A relação entre o módulo de elasticidade e a frequência de vibração de um teste não destrutivo já é conhecida há quase 150 anos.

O primeiro ensaio utilizando a técnica de vibração transversal foi realizado por um físico francês, na primeira metade do século XIX, para determinação do módulo de elasticidade de uma barra de ferro. Algum tempo depois, esses resultados foram comparados com ensaios de tração em barra de ferro. Acredita-se que esta foi a primeira tentativa de comparar valores de constantes elásticas obtidos através de ensaios dinâmicos com valores encontrados por meio de ensaios estáticos (CALIL JUNIOR; MINÁ, 2003).

O ensaio de vibração transversal é considerado uma técnica que apresenta valores confiáveis para o módulo de elasticidade podendo ser usado em qualquer tipo de madeira, com qualquer seção transversal e, também, em madeira laminada colada ou, ainda, em painéis de madeira (MURPHY, 2000).

A técnica de vibração transversal utiliza a relação entre o módulo de elasticidade e a frequência de oscilação de uma viga simplesmente apoiada.

Uma vibração mecânica é produzida quando um sistema é deslocado de sua situação de equilíbrio estável. O sistema tende a retornar a esta posição sob ação de forças restauradoras, mas geralmente, atinge a posição original com certa velocidade, o levando além desta posição. Em um sistema ideal e sem a presença de forças dissipativas, o sistema tenderia a permanecer indefinidamente em movimento oscilatório em torno de sua posição de equilíbrio.

O período de vibração é o intervalo de tempo necessário para completar um ciclo inteiro do movimento, sendo que o número de ciclos por unidade de tempo define a frequência e a amplitude é o máximo deslocamento do sistema em relação à sua posição de equilíbrio.

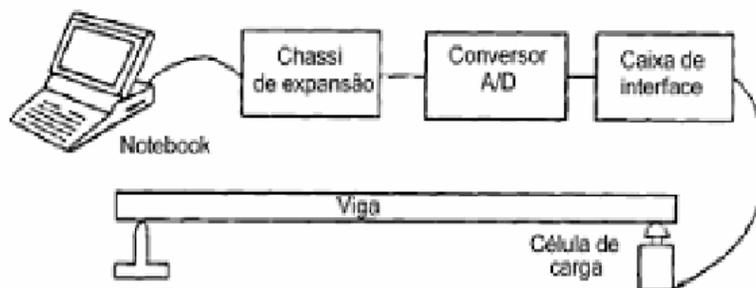
Tem-se uma vibração livre quando o movimento é mantido apenas por forças restauradoras. Aplicando uma força periódica ao sistema, o movimento resultante é descrito como vibração forçada e, quando o efeito do atrito pode ser desprezado, diz-se que a vibração é não-amortecida; caso contrário, tem-se a vibração amortecida. Mesmo toda vibração sendo amortecida, na maioria das estruturas reais, a frequência de vibração observada é essencialmente igual à frequência natural de um sistema não amortecido, sendo que o grau de amortecimento é determinado pelo coeficiente ou razão de amortecimento. Na maioria das estruturas este coeficiente está entre 2 e 20% (CALIL JUNIOR; MINÁ, 2003).

A avaliação não destrutiva com o emprego de vibração transversal consiste em aplicar um impacto em uma peça de madeira bi-apoiada, tendo um apoio em forma de lâmina em uma das extremidades e uma célula de carga na outra. A peça vibra na sua frequência natural até que cesse em função do amortecimento.

A frequência em que a peça de madeira vibra, depende do módulo de elasticidade da madeira, do vão, da densidade e do tipo de apoio. A célula de carga é responsável por captar a vibração da viga e transferir o sinal a um circuito condicionador que irá amplificar e filtrar o mesmo. O sinal amplificado é digitalizado e enviado a um microcomputador que determina a frequência do sinal oscilante. A

Figura 37 apresenta um esquema de um equipamento para a determinação do módulo de elasticidade por meio da vibração transversal. A Figura 38 apresenta a realização de um ensaio utilizando a técnica de vibração transversal.

Figura 37 – Esquema de um equipamento para determinação do módulo elasticidade por meio da vibração transversal



Fonte: Ross et al., (1996 apud CUNHA, 2007).

Figura 38 – Ensaio com o emprego da técnica de vibração transversal



Fonte: Sales, Candian e Cardin, (2008).

De acordo com Paz (1984 apud CALIL JUNIOR; MINÁ, 2003), a Equação 9 é usada para determinação do módulo de elasticidade, a partir do conhecimento da frequência natural de vibração " $f$ " (número de ciclos vibracionais por unidade de tempo), de uma viga simplesmente apoiada nas extremidades, submetida a vibração transversal livre.

$$E = \frac{fr^2 \cdot L^4}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot I} \cdot \frac{W}{g \cdot L} \quad (9)$$

Onde:

E – Módulo de elasticidade;

fr - frequência natural de vibração (Hz);

W – peso da viga (N);

L – comprimento da viga (m);

I – momento de inércia (m<sup>4</sup>);

g – aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

Essa técnica tem se destacado, sobretudo pela grande aderência entre o modelo físico do fenômeno e o correspondente modelo matemático teórico. Além disso, a dificuldade de mensuração das altas frequências observadas em outros métodos não destrutivos, como por exemplo, o ultrassom, faz com que o método de ressonância se torne ainda mais interessante (BALLARIN; PALMA, 2001).

Diversas pesquisas têm demonstrado a viabilidade do método de vibração transversal na avaliação do módulo de elasticidade da madeira, através de correlações entre os módulos de elasticidade obtidos em ensaios não destrutivos e em ensaios destrutivos com o emprego da técnica de vibração transversal. Os valores encontrados na literatura indicam valores de coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) entre 0,53 e 0,99 (BALLARIN; TARGA; PALMA, 2002; BARTHOLOMEU et al., 2004; BURDZIK; NKWERA, 2002; CALIL JÚNIOR; MINÁ, 2003; CARREIRA et al., 2004; ROSS; PELLERIN, 1991, apud CANDIAN; SALES, 2009).

Calil Junior e Miná (2003) ensaiaram 326 peças estruturais da espécie Southern Pine, realizando testes de vibração transversal e de flexão estática. Obtiveram um coeficiente de correlação linear (r), entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade estático, de 0,98, mostrando uma forte correlação linear entre essas duas grandezas.

Candian e Sales (2009) realizaram testes de ultrassom em 30 peças com dimensões estruturais da espécie de *Eucalyptus citriodora*, obtendo um coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de 0,80 a partir da reta de regressão entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico. O valor apresenta-se

como significativo, demonstrando que a técnica pode ser uma importante ferramenta para a inferência do módulo de elasticidade da madeira.

Estudo realizado por Ballarin e Palma (2001) na avaliação do módulo de elasticidade em corpos de prova de *Pinus taeda* L., *E. grandis*, *E. saligna* e *C. citriodora*, encontrou um coeficiente de determinação das regressões realizadas entre os módulos dinâmicos e estáticos, sempre superiores a 76% nas espécies estudadas.

Carreira, Segundinho e Dias (2011) ensaiaram 10 toras de *Eucalyptus citriodora* com aproximadamente 4,5 m de comprimento e diâmetro médio de 16 cm, à flexão estática e vibração transversal livre. As toras possuíam um teor de umidade na superfície acima de 12% e algumas apresentavam teor de umidade próximo do PSF. Obtiveram uma boa correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático de  $R^2 = 0,89$ . Concluíram que a técnica de vibração transversal é útil para estimar a rigidez à flexão de postes de madeira com boa exatidão, destacando vantagens na utilização deste método não destrutivo em relação ao ensaio de flexão estática, como o menor tempo necessário na execução dos ensaios e o fato de dispensar dispositivos de apoio para engastamento da extremidade das toras. Apenas ressaltaram que devido às dimensões das toras, os efeitos do esforço cortante nas frequências naturais foram desprezíveis, sendo necessário realizar testes em toras com relação L/D inferior a 20, para uma melhor apreciação desta técnica.

Estudo realizado por Carreira et al. (2006) em 54 vigas de madeira laminada colada (MLC) com dimensões de 9cm x 9cm x 200cm foram submetidas a ensaios de vibração transversal livre e de flexão estática, obteve uma correlação  $R^2$  de 0,9671. Os autores concluíram que o ensaio de vibração transversal livre é prático para avaliação do módulo de elasticidade à flexão de elementos estruturais de MLC, possibilitando o controle da qualidade dos produtos acabados.

#### 4.5 MÉTODO DE PERFURAÇÃO CONTROLADA – RESISTÓGRAFO

O resistógrafo foi desenvolvido na Alemanha, com a finalidade de executar análises em condições de campo do lenho das árvores, postes e estruturas de madeira.

É utilizado para analisar a qualidade da madeira, podendo-se verificar o estado de conservação da madeira, identificando podridão e ocosidade. Desse modo, tem por finalidade detectar defeitos internos na madeira.

Segundo o Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (1999), o Resistógrafo é um equipamento que permite a avaliação, através de método não destrutivo, do real estado interno da sanidade da madeira ou da árvore, que pode estar afetada por fungos e/ou insetos que não apresentam sintomas ou sinais externos.

Na Figura 39 é apresentado um modelo de resistógrafo.

Figura 39 – Resistógrafo



Fonte: Instrument Mechanic Lab, (2008).

O equipamento tem sido aplicado em diversos países, na avaliação do estado de sanidade de árvores em parques, jardins e ruas, postes, pontes, estruturas de construção históricas, programas de seleção de árvores com base na densidade e dureza de suas madeiras (INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS, 1999).

Trata-se de um método de inspeção não destrutivo bastante interessante para aplicação em estruturas em serviço, ressaltando as que têm interesse patrimonial, pois as perfurações são praticamente imperceptíveis, não alterando a resistência mecânica das peças analisadas, possibilitando detectar defeitos internos, variações de densidade e seções dos elementos estruturais.

O método é baseado na medida da resistência da madeira à penetração de uma agulha inserida com movimentação constante na peça estudada.

O Resistógrafo relaciona-se com a densidade, permitindo obter um perfil de variação radial desta ao longo da perfuração, verificando diferenças de densidade entre o lenho inicial (ou de primavera) e o lenho final (ou de outono), assim como

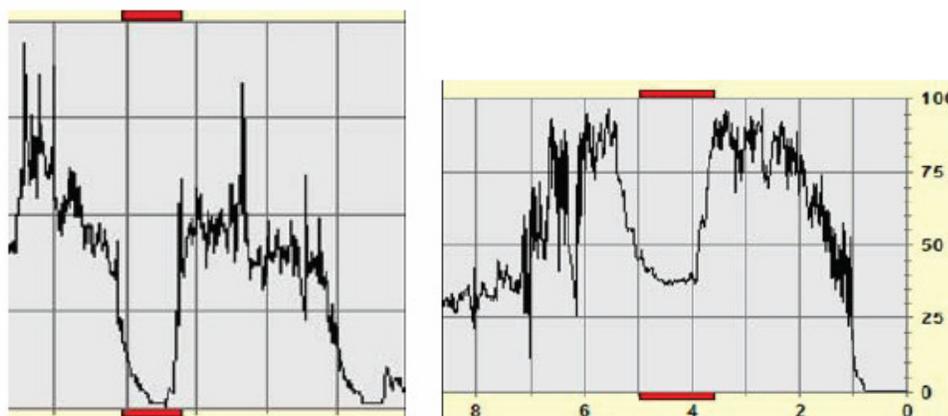
perdas de densidade devido a vazios presentes. O aparelho não fornece informação sobre a resistência mecânica da madeira.

O equipamento efetua medições radiais e tangenciais (em relação ao tronco da árvore que originou a peça), pois perfura a peça de madeira no sentido transversal. Na inspeção em estruturas em serviço, não é possível distinguir qual o tipo de medição efetuada, porque a seção transversal, normalmente, encontra-se oculta, neste caso, deve-se considerar um valor médio. Estudos realizados por Capuz (2003 apud BOTELHO JUNIOR, 2006), concluem que não existe uma diferença relevante entre os valores nas direções radiais e tangenciais, assim, esta consideração, não é errada.

Dentre as vantagens do equipamento estão a possibilidade de efetuar a análise sem o corte ou qualquer dano às árvores, provocando apenas um pequeno orifício no tronco; é portátil e utiliza bateria recarregável como fonte de energia.

A Figura 40 apresenta gráficos obtidos pelo software que acompanha o resistógrafo, no estudo realizado por Molina et al. (2011), na avaliação de deterioração de postes roliços de madeira. Nestas figuras, os eixos das abscissas representam as profundidades de perfuração dos postes (cm), e os eixos das ordenadas representam as amplitudes de resistência da madeira (%).

Figura 40 – Resultado da resistência a penetração da agulha na peça analisada



Fonte: Molina et al., (2011).

A Figura 40 apresenta um trecho com uma queda de resistência devido à presença de uma fenda. Nota-se que não afetou consideravelmente a resistência do poste nas demais regiões analisadas.

Verifica-se na Figura 40 que entre as profundidades 3,6 e 5,0 cm, os autores observaram, na região em destaque, uma queda abrupta de resistência, associando à variabilidade natural da madeira, pois o trecho apresentou resistência à perfuração da broca.

Neste mesmo estudo, Molina et al. (2011), utilizando o resitógrafo na avaliação de deterioração de postes roliços de madeira, concluíram que o equipamento demonstrou-se um instrumento eficiente e de fácil manuseio, podendo ser utilizado para a análise interna da resistência de elementos de madeira roliça. Entretanto, a utilização do equipamento se limita na interpretação visual das informações fornecidas pelo equipamento, e este não quantifica numericamente o valor da resistência do poste ao longo da seção transversal, apresentando apenas regiões mais ou menos resistentes, identificando possíveis defeitos, como ocos, podridão, dentre outros. Concluíram que há a necessidade de relacionar os gráficos fornecidos pelo equipamento com um valor numérico de resistência.

#### 4.6 MÁQUINA DE CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE MADEIRA SERRADA – MSR

A classificação mecânica por tensões, também conhecida como MSR (Machine Stress Rate), embora bem acolhida em seu início, há mais de 40 anos, teve seu uso restringido devido ao desconhecimento, à má utilização da máquina e à falta de procedimentos de controle (GALLIGAN; MCDONALD, 2000 apud FREITAS; GÓES, 2005). Assim, foi necessária a criação de agências de classificação que se tornaram responsáveis pelo controle de qualidade das peças classificadas. Dessa forma, tais problemas foram superados.

O primeiro estudo realizado no Brasil foi por Melo em 1984, utilizando-se de seis espécies de madeiras tropicais (andiroba, copaíba, mururé, pau-jacaré, tachi-preto e tauari), obtendo altos coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de ruptura à flexão.

As vantagens da classificação pela MSR são (FREITAS; GÓES, 2005):

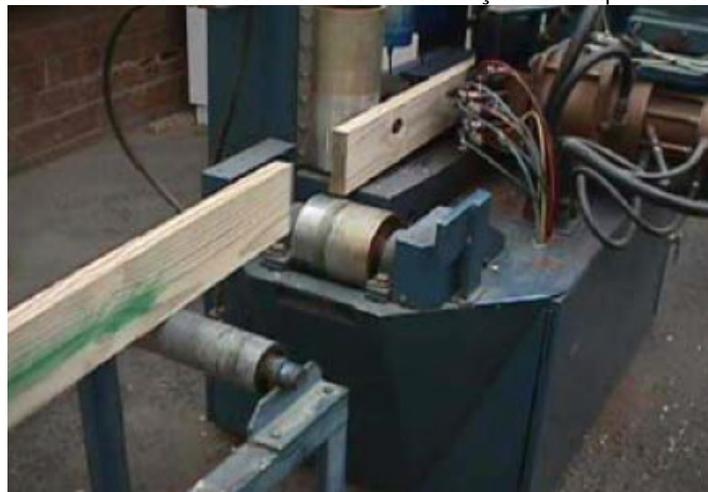
- Não destrói as peças, pois se trata de um ensaio não destrutivo;
- Alta produtividade de classificação, em função da máquina utilizada;

- Obtenção da real variabilidade das peças estruturais, pois os defeitos existentes nas peças são avaliados indiretamente;
- No momento da execução, posicionamento adequado das peças estruturais em função da resistência do esforço solicitante.

A classificação não destrutiva através da máquina MSR é um processo rápido e automatizado, requerendo pouco tempo durante o processo. A madeira entra na máquina e passa por uma série de rolos, sendo que neste processo é aplicada uma força perpendicular ao eixo de menor inércia da seção transversal da peça, ocasionando flexão, medindo-se assim, o módulo de elasticidade da peça.

A figura 41 apresenta um ensaio utilizando a classificação mecânica com o emprego da MSR.

Figura 41 – Ensaio não-destrutivo com a utilização da máquina MSR

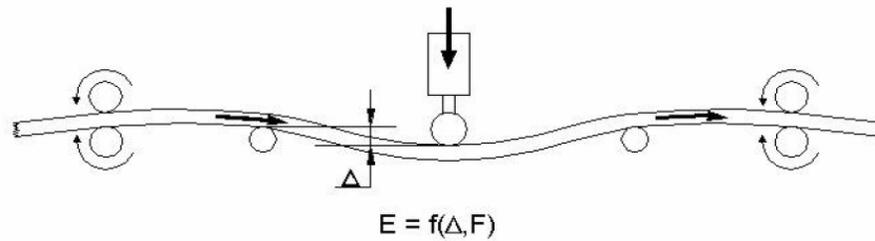


Fonte: Freitas e Calil Júnior, (2004).

Esta máquina limita-se a classificação de materiais finos, da ordem de 38 mm. Sendo que o método é baseado na correlação entre o módulo de elasticidade e resistência a flexão da madeira.

A figura 42 apresenta um esquema de funcionamento da máquina MSR.

Figura 42 – Esquema de funcionamento da máquina MSR

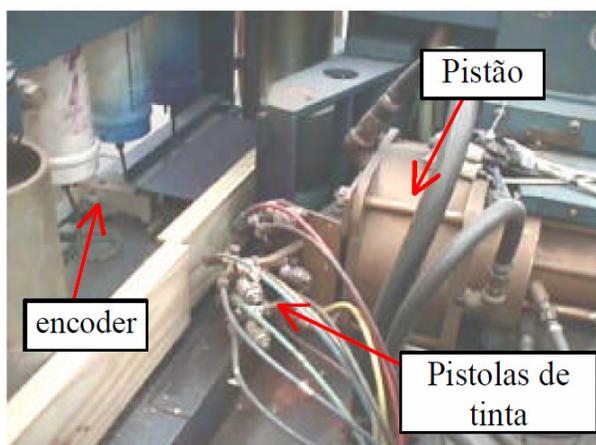


Fonte: Carreira, (2003).

Alguns dispositivos medem o MOE e classificam a madeira, baseados no deslocamento vertical que ocorre para um pequeno vão, inferior ao comprimento da peça de madeira; outros medem em relação a um pequeno vão, mas consideram a média dos resultados obtidos em todo o comprimento da peça. Como consequência, a maneira em que os dados são obtidos e o modo com que eles são analisados e informados pelo dispositivo, influencia a especificação da classe de resistência. Por esta razão, a saída do dispositivo deve ser sempre calibrada com testes estáticos (GALLIGAN; MACDONALD, 2000 apud CUNHA, 2007).

As peças de madeira são introduzidas na máquina e interrompem um feixe de luz ativando um sensor responsável pelo acionamento do pistão a ar comprimido, flexionando as peças em relação ao eixo de menor inércia. Um encoder mede o deslocamento provocado pela força a cada 15 cm de comprimento da peça. Com isso, a máquina envia os dados para um computador, onde é determinado o módulo de elasticidade (MOE) de cada seção de 15 cm, o qual envia dados para a máquina pintar um código de cores em cada seção analisada. No fim, a máquina imprime uma faixa correspondente ao  $MOE_{\text{médio}}$  da peça de madeira. A Figura 43 mostra os elementos da máquina de classificação. Os códigos de cores da máquina com os intervalos referentes a cada cor são apresentados na Tabela 4.

Figura 43 – Elementos da máquina de classificação



Fonte: Carreira, (2003).

Tabela 4 – Código de cores com os intervalos de MOE

Código de cores	Intervalo de MOE (MPa)
Azul	$\leq 5.000$
Verde	5.001 a 6.000
Amarelo	6.001 a 8.000
Roxo	8.001 a 10.000
Vermelho	$\geq 10.001$

Fonte: Carreira e Dias, (2006).

Carreira (2003) estudou 600 peças com dimensões de 3,5cm x 12,5cm x 2,60 m de madeira da espécie *Pinus taeda* e *Pinus ellittottii* misturadas no lote para a análise. Estas peças foram classificadas utilizando a máquina MSR e foram realizados ensaios de flexão estática, obtendo um coeficiente de determinação entre o módulo de elasticidade obtido pela MSR e o módulo de elasticidade estático de  $R^2$  0,925.

Estudos realizados por Freitas e Góes (2005) em peças estruturais do gênero *Pinus* spp classificadas mecanicamente pela máquina MSR, concluíram que a MSR é uma ótima alternativa para a classificação estrutural.

#### 4.7 LEVANTAMENTO DE TRABALHOS COM ESTUDO EM ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Foram verificadas as técnicas não destrutivas com uso potencial no Brasil. Para isso, estudaram-se cada uma das técnicas mais utilizadas, buscando os trabalhos publicados no assunto.

A seguir, encontram-se por ordem cronológica, as dissertações e teses encontradas onde foram aplicados ensaios não destrutivos em madeiras e derivados (Tabela 5). Seguido de um levantamento de publicações abordando o assunto em revistas, congressos e periódicos (Tabela 6).

Tabela 5 – Métodos não destrutivos abordados em teses de mestrados e doutorados

Autor	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
BARTHOLOMEU, A.	Doutorado	Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som.	Ultrassom	2001
AZEVEDO JÚNIOR, A.P.	Mestrado	Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de Madeiras através da técnica de ultra-som: fundamentos físicos e resultados experimentais.	Ultrassom	2002
NOGUEIRA, M.	Mestrado	Determinação de módulos de elasticidade à compressão da madeira pinus taeda I com o uso de ultra-som.	Ultrassom	2003
RIVERO, L. A.	Mestrado	Laminado colado e contraplacado de bambu.	Ultrassom	2003
ROCHA, R.R.	Mestrado	Avaliação não-destrutiva de madeiras para dormentes ferroviários.	Ondas de tensão e ultrassom	2003
PELIZAN, T.R.	Mestrado	Estudo de propriedades mecânicas de peças roliças de eucalipto citriodora utilizando a técnica de ultra-som.	Ultrassom	2004
COSTA, O.A.L.	Doutorado	Velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira para diferentes condições de umidade.	Ultrassom	2005
MORALES, E.A.M.	Doutorado	Técnicas de propagação de ondas na estimativa de propriedades mecânicas de painéis OSB.	Ultrassom e ondas de tensão	2006

Autor	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
TRINCA, A.J.	Mestrado	Influência da dimensão do corpo-de-prova no ensaio destrutivo de compressão paralela às fibras e no ensaio não-destrutivo utilizando ultrassom.	Ultrassom	2006
GABRIEL, M.S.C.	Doutorado	Desempenho físico-mecânico de painéis LVL de pinus tropicais da região de São Paulo.	Ultrassom e ondas de tensão	2007
NOGUEIRA, M.	Doutorado	Classificação de peças de madeira serrada de dimensões estruturais de <i>Eucalyptus sp.</i> Com uso de ensaios não-destrutivos.	Ultrassom, ondas de tensão e vibração transversal	2007
CUNHA, A.B.	Doutorado	Produção de vigas estruturais de madeira avaliadas por meio de ensaios estáticos e dinâmicos.	Ondas de tensão	2007
CASTELO, P.A.R.	Doutorado	Avaliação da qualidade da madeira <i>Pinus taeda</i> em diferentes sítios de crescimento e espaçamentos, através do método não destrutivo de emissão de ondas de tensão.	Ondas de tensão	2007
CANDIAN, M.	Mestrado	Estudo da classificação não-destrutiva de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas.	Ultrassom e vibração transversal	2007

Autor	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
RIBEIRO, P.G.	Mestrado	Utilização de técnicas não destrutivas para caracterização de madeiras de <i>Pinus caribea</i> var. <i>hondurensis</i> e de <i>Eucalyptus grandis</i> .	Análise de imagem, colorimetria, espectroscopia no infravermelho próximo, ultrassom.	2009
SOUZA, F.	Mestrado	Propriedades mecânicas físicas, biológicas e avaliação não destrutiva de painéis de lâminas paralelas (LVL) com madeira de <i>Pinus oocarpa</i> e <i>P. Kesiya</i> .	Ondas de tensão	2009
ZAMBRANO FIGUEROA, F.M.	Mestrado	Avaliação de madeira peroborosa por método não destrutivo utilizando emissão de ondas de ultrassom para peças estruturais do patrimônio histórico	ultrassom	2010
MASSAK, M.V.	Mestrado	Influência da idade da árvore na velocidade de propagação de ondas de ultrassom em peças estruturais de madeira de reflorestamento.	ultrassom	2010
PEDROSO, C.B.	Mestrado	Estimativa de propriedades de rigidez da madeira a partir de avaliação acústica na árvore e em toras recém abatidas.	ultrassom	2011
TRINCA, A.J.	Doutorado	Metodologia para determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom.	ultrassom	2011

Fonte: A autora, (2011).

Tabela 6 – Publicações em revistas, congressos e periódicos

Autores	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
GONÇALVES, R. BARTHOLOMEU, A.	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental	Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira de <i>Eucalyptus citriodora</i> e <i>Pinus elliottii</i> .	Ultrassom	2000
GABRIEL, M.S.C. BALLARIN, A. W.	VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM 2000	Determinação do módulo de elasticidade da madeira de <i>P. taeda</i> com uso do método não-destrutivo das ondas de tensão ( <i>stress wave method</i> ).	Ondas de tensão	2000
TELES, C. D. M. VALLE, A.	VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM 2002	Panorama dos ensaios não destrutivos para estruturas de madeira em serviço.	Raios-X, propagação de ondas, emissão acústica por insetos, termografia, buscas com cães, penetração ao impacto e métodos de medição de umidade.	2002
OLIVEIRA, F.G.R. CANDIAN, M. LUCCHETTE, F.F. CALIL JR., C. SALES, A.	3 ° PANNDT	Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de ultra-som.	Ultrassom	2003

Autores	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
CARREIRA, M.R. CHEUNG, A.B. OLIVEIRA, F.G.R. DIAS, A.A. CALIL JR., C. SALES, A. STAMATO, G.C.	3 ° PANNDT	Avaliação de técnicas não-destrutivas aplicadas à madeira de <i>Pinus sp.</i>	Ultrassom	2003
CALIL JUNIOR, C. MINÁ, A.J.S.	Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental	Vibração transversal: Um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira.	Vibração Transversal	2003
MINÁ, A.J.S. OLIVEIRA, F.G.R. CALIL JR., C. DIAS, A.A. SALES, A.	Scientia Forestalis	Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som.	Ultrassom	2004
VALLE, A. TEREZO, R.F. TELES, C.D.M.	Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil.	Uso de técnicas não destrutivas no diagnóstico de patologias em estruturas de madeiras.	Raios-X, perfuração controlada, propagação de ondas, emissão acústica, termografia, busca com cães e penetração ao impacto	2004
FREITAS, R.R. GÓES, J.L.N.	Revista Minerva	Classificação de peças estruturais de <i>Pinus spp.</i> pela MSR (machine stress rate).	MSR	2005

Autores	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
BALLARIN, W. NOGUEIRA, M.	Revista de Engenharia Agrícola	Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de <i>pinus taeda</i> por ultrassom.	Ultrassom	2005
OLIVEIRA, F.G.R. SALES, A.	Revista Minerva	Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira.	Ultrassom	2005
OLIVEIRA, F.G.R. MILLER, K.P. CANDIAN, M. SALES, A.	Cerne	Influência da seção transversal na velocidade ultra-sônica na madeira de <i>Eucalyptus citriodora</i> .	Ultrassom	2005
CARREIRA, M.R. CHEUNG, A. B. OLIVEIRA, F. G. R. DIAS, A. A CALIL JÚNIOR. C. SALES, A. CANDIAN, M.	17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais	Classificação de peças estruturais de <i>Pinus sp</i> por ultra-som.	Ultrassom	2006
VALLE, A. BRITES, R. D. LOURENÇO, P.B.	Anais do 10º Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM 2006	Uso da perfuração controlada na avaliação de degradação da madeira em edificações antigas – estudo de caso.	Perfuração controlada	2006
TRUGILHO, P.F. ROSADO, S.C.S. BOTREL, M.C.G. SORAGI, L.C.	Anais do 10º Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM 2006	Utilização de métodos não destrutivos na avaliação de clones de <i>Eucalyptus spp.</i>	Ondas de tensão, resistógrafo (resistência a penetração) e extensômetro	2006

Autores	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
TRUGILHO, P.F. ROSADO, S.C.S. BOTREL, M.C.G. SORAGI, L.C.	Anais do 10º Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM 2006	Avaliação de árvores matrizes de <i>Eucalyptus urophylla</i> e <i>Eucalyptus citriodora</i> por métodos não destrutivos.	Ondas de tensão, resistógrafo e extensômetro	2006
LIMA, T.L. SARTÓRIO, R.C. TRUGILHO, P.F. CRUZ, C.R. VIEIRA, R.S.	Scientia Forestalis	Uso do resistógrafo para estimar a densidade básica e a resistência à peruração da madeira de <i>Eucalyptus</i> .	Resistógrafo	2007
NOGUEIRA, M. BALLARIN, A.W.	Revista Energia na Agricultura	Determinação dos módulos de elasticidade da madeira de pinus taeda L. com ensaios não-destrutivos.	Ultrassom	2007
ANDRADE, C.R. TRUGILHO, P.F. ROSADO, S.C.S. SORAGI, L.C. OLIVEIRA, A.C.	XI Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira - EBRAMEM 2008	Relação entre a densidade básica da madeira de clones de <i>Eucalyptus</i> e os ensaios não-destrutivos.	Ondas de tensão, resistógrafo (resistência a penetração) e extensômetro	2008
NOGUEIRA, M. BALLARIN, A.W. PALMA, H.A.L. LIMA, J.T.	XI Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira - EBRAMEM 2008	Classificação de peças de madeira serrada de dimensões estruturais de <i>Eucalyptus</i> sp. com uso de ensaios não-destrutivos.	Ultrassom, de ondas de tensão e de vibração transversal	2008
DERNER, L.A. TEREZO, R.F. SZÜCS, C.A.	XI Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira - EBRAMEM 2008	Avaliação do módulo de elasticidade da espécie Paricá através de ensaio não destrutivo	Ultrassom	2008

Autores	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
NOGUEIRA, M. BALLARIN, A.W.	Revista Energia na Agricultura	Efeito da idade na qualificação mecânica da madeira serrada de eucalyptus sp. com uso de ensaios não-destrutivos.	Ondas de tensão, ultrassom e vibração transversal	2008
FERRAZ, J.M. CLÁUDIO H. S. DEL MENEZZI, C.H.S.D. FAUSTINO, R.	XI Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira - EBRAMEM 2008	Avaliação do módulo de elasticidade de painel de partículas laminadas paralelas (OSL/LSL) com uso de método não-destrutivo de ondas de tensão (stress wave).	Ondas de tensão	2008
CANDIAN, M. SALES, A. CARDIN, V.S.	XI Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira - EBRAMEM 2008	Proposição de valores de coeficiente de modificação para a revisão da norma brasileira: NBR 7190: 1997 – projeto de estruturas de madeira	Ultrassom e vibração transversal	2008
CANDIAN, M. SALES, A. CARDIN, V.S.	XI Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira - EBRAMEM 2008	Determinação do módulo de elasticidade de peças estruturais da espécie <i>Goupia glabra</i> com emprego de técnicas não-destrutivas	Ultrassom e vibração transversal	2008
SALES, A. CANDIAN, M. OLIVEIRA, F.G.R. CARDIN, V.S.	X Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira - EBRAMEM 2006	Classificação mecânica de peças estruturais de madeira serrada com emprego das técnicas de ultra-som e vibração transversal.	Ultrassom e vibração transversal	2006

Autores	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
SALES, A. OLIVEIRA, F.G.R. CANDIAN, M. CARDIN, V.S	XXXIII Jornadas Sudamericanas de Engenharia Estrutural	Obtenção de imagens tomográficas a partir do emprego de ondas de tensão em peças roliças de eucalipto.	Ondas de tensão	2008
SALES, A. CANDIAN, M. CARDIN, V.S	XXXIII Jornadas Sudamericanas de Engenharia Estrutural	Revisão da NBR 7190: 1997 – projeto de estruturas de madeira: proposição de coeficiente de modificação para ensaios não destrutivos.	Ultrassom e vibração transversal	2008
TRINCA, A.J. GONÇALVES, R.	REVISTA ÁRVORE	Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira.	Ultrassom	2009
CANDIAN, M. SALES, A.	Ambiente Construído	Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultrassom, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira	Ultrassom, vibração Transversal e ondas de tensão	2009
RESENDE, K.C. LIMA, J.T. ROSADO, A.M.	XII Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira - EBRAMEM 2010	Aplicação de métodos não-destrutivos para estimativa da densidade básica da madeira de clones de Eucalyptus.	Pilodyn (resistência a penetração)	2010

Autores	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
BARTHOLOMEU, A.	Revista da Madeira	Ultrassom, uma ferramenta para a classificação de madeira estrutural.	Ultrassom	2010
CUNHA, A.B. MATOS, J.L.M.	Revista Árvore	Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo (“stress wave timer”).	Ondas de tensão	2010
BALLARIN, A.W. PALMA, H.A.L.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento com uso do método não destrutivo de vibração transversal.	Vibração transversal	2011
BALLARIN, A.W. PALMA, H.A.L. HELLMEISTER, L.A.V.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Ensaio não destrutivo da propagação de ondas de tensão em toras e madeira serrada de <i>Pinus taeda</i> L.	Ondas de tensão	2011
BATISTA, F.A.F GONÇALVES, R. CERRI, D.G.P. SECCO, C.B.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Reprodução da condição interna de peças de madeira através de imagens representativas da propagação de ondas.	Ultrassom	2011

Autores	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
BELINI, U.L. TOMAZELLO FILHO, M. LASSO, P.R.O. MUNIZ, G.I.B.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Potencialidade da microtomografia de raios x (microct) para a caracterização anatômica da madeira de folhosas tropicais.	Raios X	2011
BERTOLDO, C. GONÇALVES, R. BATISTA, A.F. SECCO, C.B.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Avaliação da sensibilidade do ultrassom na detecção de variações de propriedades da madeira em função da posição de retirada da tora.	Ultrassom	2011
BERTOLDO, C. GONÇALVES, R. MASSAK, M.V. BATISTA, A.F. SECCO, C.B.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Predição de propriedades da madeira utilizando ensaio de ultrassom na tora recém abatida.	Ultrassom	2011
CARREIRA, M.R. SEGUNDINHO, P.G.A. DIAS, A.A.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Estimativa do módulo de elasticidade à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal livre.	Vibração transversal livre	2011
CARREIRA, M.R. SEGUNDINHO, P.G.A. CALIL NETO, C. DIAS, A.A. CALIL JR, C. SANTOS, C.J.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Aplicação do ensaio de vibração transversal livre na avaliação não destrutiva de vigas de madeira laminada colada (MLC).	Vibração transversal livre	2011

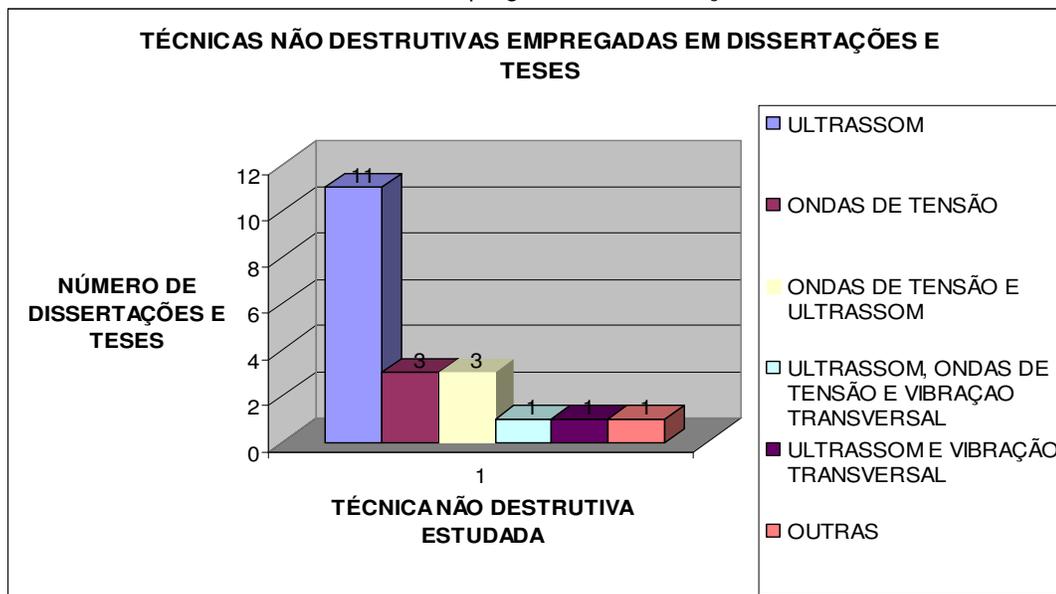
Autores	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
<p>CONCEIÇÃO, F.F. YOJO, T.</p>	<p>III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira</p>	<p>Análise do posicionamento dos transdutores sobre o período de propagação de ondas geradas por ultrassom.</p>	<p>Ultrassom</p>	<p>2011</p>
<p>CONCEIÇÃO, F.F. YOJO, T.</p>	<p>III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira</p>	<p>Análise da influência do tipo de transdutor utilizado para gerar ondas ultra- sônicas sobre a velocidade de propagação de ondas através da madeira.</p>	<p>Ultrassom</p>	<p>2011</p>
<p>COSSOLINHO, L.C. PEREIRA, A.H.A. ICIMOTO, F.H. FERRO, F.S. SEGUNDINHO, P.G.A. CALIL JR, C.</p>	<p>III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira</p>	<p>Avaliação da coerência entre três métodos de determinação do módulo de elasticidade da madeira de <i>Pinus oocarpa</i>.</p>	<p>Vibração Transversal</p>	<p>2011</p>
<p>TOMAZELLO FILHO, M. BELINI, U.L. OLIVEIRA, J.T.S. GONÇALVES, F.G.</p>	<p>III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira</p>	<p>Avaliação tecnológica da madeira e de painéis MDF de eucalipto por densitometria de raios x.</p>	<p>Raios X</p>	<p>2011</p>

Autores	Tipo	Título	Método Não Destrutivo Estudado	Ano da publicação
MOLINA, J.C. CALIL JR, C. FREITAS, R.R. FERRO, F.S.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Avaliação não destrutiva da deterioração de postes roliços de madeira através da utilização do resistógrafo.	Resistógrafo	2011
MORALES, E.A.M. LAHR, F.A.R. NASCIMENTO, M.F. GONÇALVES, R.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Propagação de ondas ultrassônicas através da espessura de chapas OSB e correlação com suas propriedades físicos- mecânicas.	Ultrassom	2011
PIGOZZO, R.J.B.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Aplicabilidade do infravermelho-próximo (NIR) na identificação e estimativa de propriedade da madeira	Infravermelho-próximo	2011
SECCO, C.B. GONÇALVES, R. CERRI, D.G.P. BATISTA, F.A.F	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Avaliação de dois tipos de medição na detecção da condição interna da madeira por ultrassom.	Ultrassom	2011
SORIANO, J. GONÇALVES, R. TRINCA, A.J. BERTOLDO, C.	III EREMEM – Encontro regional e madeiras em estruturas de madeira	Método de ensaio por impacto esclerométrico aplicado à madeira	Esclerométrico e ultrassom	2011

Fonte: A autora, (2011).

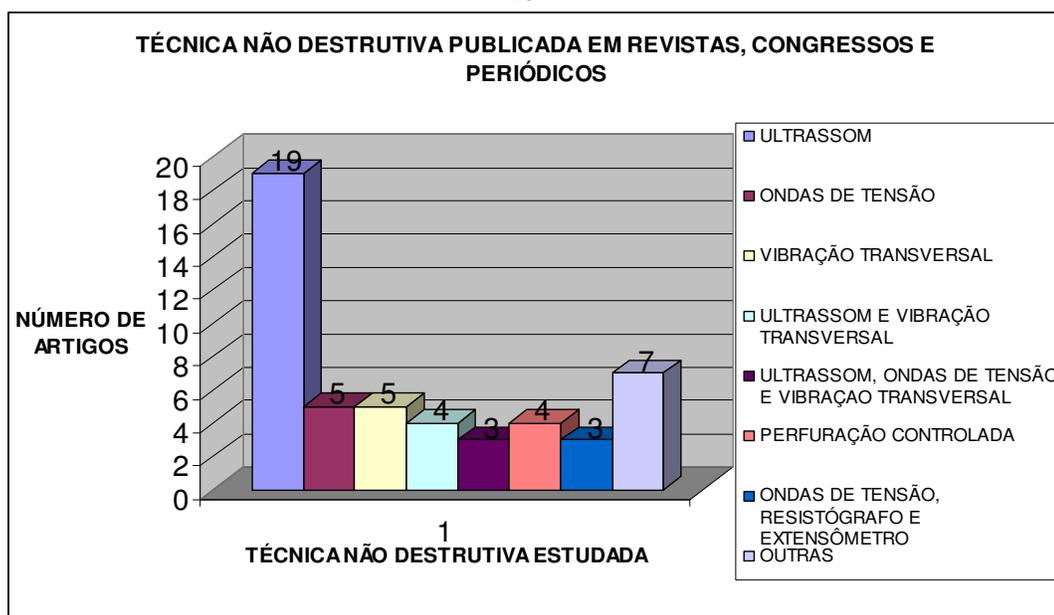
Com o levantamento das publicações das dissertações e teses encontradas que utilizaram o emprego de técnicas não destrutivas, buscou-se verificar a técnica mais estudada. Esta análise pode ser encontrada no gráfico 1. Foi realizada a mesma comparação para publicações em revistas, congressos e periódicos, conforme pode ser observado no gráfico 2:

Gráfico 1 – Técnicas não destrutivas empregadas em dissertações e teses até o ano de 2011



Fonte: A autora, (2011).

Gráfico 2 – Técnicas não destrutivas publicadas em revistas, periódicos e congressos até o ano de 2011



Fonte: A autora, (2011).

Analisando os gráficos 1 e 2, pode-se verificar um maior emprego da técnica de ultrassom dentre as técnicas não destrutivas mais estudadas.

## 5 ESTUDO DA VALIDAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRASSOM

Toda a metodologia aqui citada refere-se a ensaios realizados no ano de 2007 para a confecção do artigo apresentado no XIX Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas de Madeira (EBRAMEM) – Proposição de valores de coeficiente de modificação para a revisão da norma brasileira: NBR 7190: 1997 – projeto de estruturas de madeira; onde a mestranda participou como co-autora e esses dados serviram também de base para a dissertação de Mestrado da aluna Marcela Candian (2007).

### 5.1 ESPÉCIE ESTUDADA

A espécie estudada foi a *Pinus sp.*

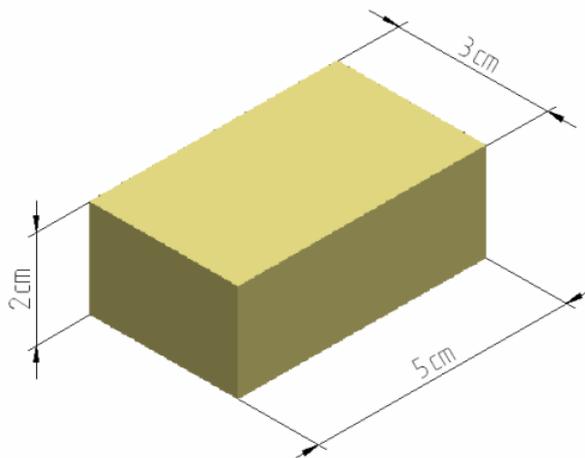
Esta espécie foi escolhida por se tratar de uma madeira de reflorestamento que tem sido muito utilizada na fabricação de Madeira Laminada Colada (MLC) e apresenta grande potencial na sua utilização estrutural conforme mencionado no item 3.9.

### 5.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As vigas de pinus ao chegarem ao laboratório foram armazenadas em local coberto, apresentando apenas uma abertura frontal, para que fossem secas naturalmente. Ficaram assim dispostas por um período de 6 meses.

A fim de se obter o controle de umidade, foram utilizadas pequenas amostras retiradas das vigas. Elas possuíam dimensões de 2,0 cm x 3,0 cm x 5,0 cm (ao longo das fibras), conforme Figura 44.

Figura 44 – Dimensões do corpo de prova



Fonte: A autora, (2011).

Determinou-se a massa inicial da amostra. Posteriormente, a amostra foi colocada na estufa, e durante a secagem a massa do corpo de prova foi medida a cada 6 horas, até que obtivesse uma variação entre medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última massa medida, considerando esta massa como a massa seca ( $m_s$ ). Assim, com o valor da massa seca, determinou-se o teor de umidade inicial da madeira, conforme especificado pela NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), Equação 10.

$$U\% = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

U – teor de umidade;

$m_i$  – massa inicial da madeira (g);

$m_s$  – massa da madeira seca (g).

Novas amostras foram retiradas das vigas para a estimativa do teor de umidade, a cada quinze dias. O controle de umidade foi realizado até que as peças atingissem um teor de umidade de aproximadamente 12%, que é a umidade de equilíbrio para a região de São Carlos. Este valor foi utilizado na experimentação para que não fosse necessário fazer correções nos resultados obtidos em função da umidade.

Quando as vigas atingiram o teor de umidade em torno de 12%, elas foram confeccionadas com dimensões aproximadas de 5 cm x 11 cm x 300 cm.

Para os ensaios foram utilizadas 30 vigas a fim de que se garantisse um elevado nível de confiança para os resultados.

### 5.3 ENSAIOS REALIZADOS

Para a experimentação foram realizados os seguintes ensaios:

- Ensaio de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ );
- Ensaio de ultrassom ( $E_{d,us}$ );
- Ensaio de flexão estática (MOE).

#### 5.3.1 Ensaio de densidade aparente ( $\rho_{ap,12\%}$ )

A densidade aparente, segundo a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), é uma massa específica convencional, definida pela razão entre massa e volume de corpos de prova apresentando um teor de umidade de 12%. Assim, foi determinada a densidade aparente conforme abordado na equação 2.

Além da densidade aparente dos corpos de prova, determinou-se também a densidade aparente das 30 vigas utilizadas na experimentação. Para isto, elas foram pesadas individualmente e submetidas a medições de dimensões, para determinação do seu volume.

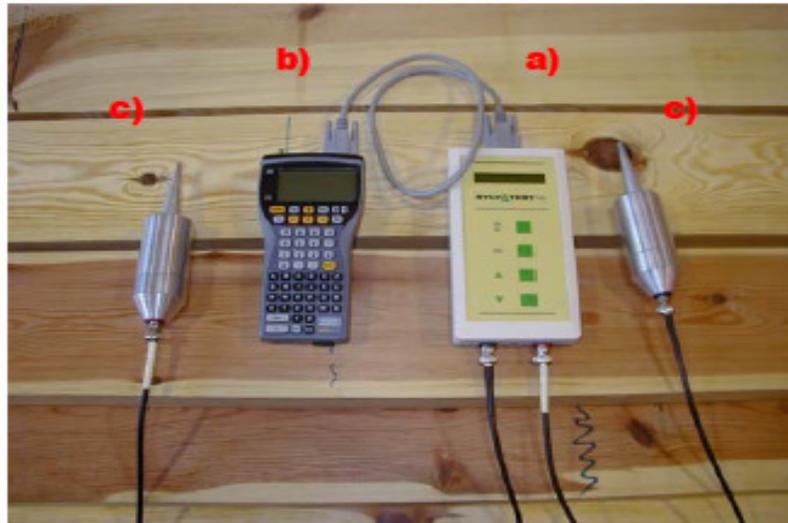
Os valores empregados na experimentação foram os obtidos pela densidade aparente das vigas e não dos corpos de prova, uma vez que os resultados obtidos para os corpos de provas podem não ser representativos para a densidade da viga, uma vez que as vigas podem apresentar descontinuidades não presentes nos corpos de prova.

#### 5.3.2 Ensaio de ultrassom

Para o ensaio de ultrassom, o equipamento utilizado foi o SYLVATEST® com transdutores de 22 kHz. Ele é constituído pelos seguintes elementos: sylvatest Duo;

sylvion (psion); 2 sondas cônicas, sendo uma emissora e a outra receptora e cabos de conexão, conforme Figura 45.

Figura 45 – Componentes do aparelho sylvatest: a) sylvatest duo / b) sylvion (psion) / c) sondas



Fonte: Capuz, (2003 apud BOTELHO JUNIOR, 2006).

O equipamento possui entrada e saída de dados que possibilita o armazenamento dos dados em um notebook. Conforme a Figura 42, item c, ele possui dois transdutores piezo-eletrônicos. Esses transdutores são colocados em contato com a madeira; um deles é responsável por gerar a onda (transmissor) e o outro em receber a onda (receptor). Com isso, o equipamento registra o tempo necessário, em microssegundos, de passagem da onda entre os transdutores, possibilitando o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico.

Para os ensaios foram realizados três leituras de tempo em cada peça analisada (extremidades e meio). A partir da média dessas três leituras, determinou-se a velocidade ( $v = \Delta S / \Delta t$ ), onde  $\Delta S$  é o comprimento da peça (distância entre os transdutores) e  $\Delta t$ , o tempo registrado pelo equipamento. Conhecida a velocidade e a densidade, calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico a partir da equação 7 do item 3.10.2.

A Figura 46 apresenta um ensaio de ultrassom.

Figura 46 – Ensaio de ultrassom



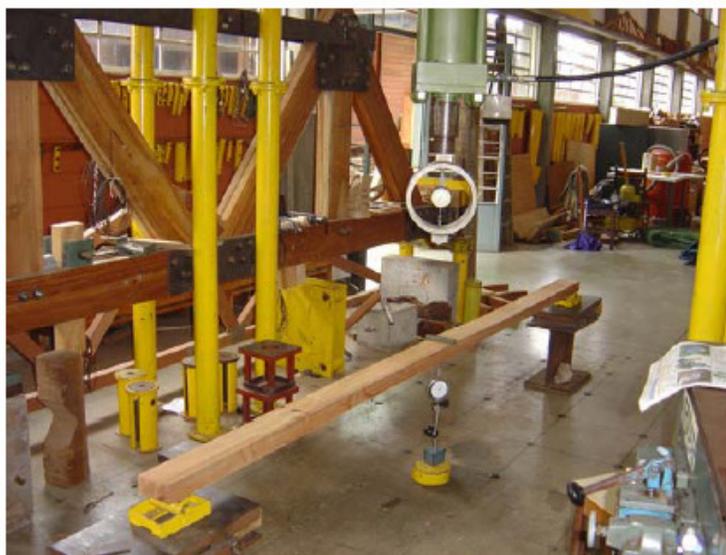
Fonte: Candian, Sales e Cardin, (2008).

### 5.3.3 Ensaio de flexão estática

De acordo com a NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), a resistência da madeira à flexão é um valor convencional, dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo de prova no ensaio da flexão simples, calculado com a hipótese que a madeira é um material elástico.

A Figura 47 apresenta um ensaio de flexão estática.

Figura 47 – Ensaio de flexão estática



Fonte: Candian, Sales e Cardin, (2008).

A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) especifica que os corpos de prova para o ensaio devem ter forma prismática, com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lados e comprimento de 1,15 m na direção paralela às fibras. Entretanto, para os ensaios, os corpos de prova possuíam dimensões estruturais superiores aos especificados pela norma, apresentando dimensões de 5 cm x 11 cm x 300 cm (fato que não implica em grandes variações).

O ensaio de flexão estática foi realizado para obter correlações com o módulo de elasticidade dinâmico obtido no ensaio de ultrassom.

Para o ensaio, as peças foram dispostas na posição de menor inércia e foram submetidas a um carregamento central, registrando cinco leituras de deslocamento.

O cálculo do MOE foi determinado a partir da equação 11:

$$MOE = \frac{\Delta F x L^3}{48 x \Delta V x I} \quad (11)$$

Onde:

MOE – Módulo de elasticidade estático (MPa);

$\Delta F$  – incremento de carga (N);

L – vão da peça (mm);

$\Delta V$  – incremento de deslocamento (mm);

I – momento de inércia da seção transversal (mm<sup>4</sup>).

#### 5.4 RESULTADOS

Este item apresenta os resultados obtidos nos ensaios descritos anteriormente.

Com os resultados obtidos foram realizados testes de normalidade, regressão e análise de variância.

O teste de normalidade foi realizado a fim de verificar se os dados experimentais de cada amostra (ultrassom e ensaio de flexão estática) podem ser enquadrados em uma distribuição normal. Para este teste empregou-se o método Kolmogorov-Smirnov.

As análises de regressão e de variância foram realizadas para a comparação dos valores obtidos entre os módulos de elasticidade estático (MOE) e dinâmico ( $E_d, u_s$ ), visando a validação desses coeficientes.

## 5.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO COM O USO DO ULTRASSOM

A Tabela 7 apresenta os valores da velocidade do ultrassom na direção longitudinal e o módulo de elasticidade dinâmico para a espécie estudada.

Tabela 7 – Valores obtidos no ensaio de ultrassom

Viga	Largura (m)	Espessura (m)	Comprimento (m)	$t_{\text{medio}}(\text{s})$	$V_{\text{us}} (\text{m/s})$	densidade média (kg/m <sup>3</sup> )	Ed,us (MPa)
1	0,11	0,05	3	0,000721667	4157,04	641,0	11077,6
2	0,11	0,05	3	0,000764333	3924,99	624,8	9625,4
3	0,11	0,052	3	0,000661667	4534,01	592,9	12188,1
4	0,11	0,05	3	0,000628	4777,07	554,9	12663,8
5	0,11	0,05	3	0,000638667	4697,29	589,6	13009,6
6	0,113	0,05	3	0,000669	4484,30	597,8	12020,8
7	0,112	0,05	3	0,000610333	4915,35	602,8	14563,0
8	0,11	0,052	3	0,000642667	4668,05	648,6	14133,5
9	0,11	0,052	3	0,000764	3926,70	751,7	11590,0
10	0,11	0,05	3	0,000636333	4714,51	641,0	14247,8
11	0,114	0,053	3	0,000710667	4221,39	666,4	11876,0
12	0,11	0,05	3	0,000655667	4575,50	559,7	11717,4
13	0,11	0,05	3	0,000631667	4749,34	649,4	14646,9
14	0,11	0,05	3	0,000634667	4726,89	604,6	13508,2
15	0,112	0,05	3	0,000615333	4875,41	622,0	14784,7
16	0,114	0,05	3	0,000706	4249,29	524,4	9469,1
17	0,11	0,05	3	0,000646333	4641,57	546,1	11766,1
18	0,11	0,05	3	0,000662667	4527,16	553,4	11341,2
19	0,112	0,05	3	0,000649	4622,50	573,5	12255,3
20	0,112	0,05	3	0,000736333	4074,24	641,5	10649,2
21	0,11	0,05	3	0,000628333	4774,54	596,4	13595,2
22	0,11	0,05	3	0,000629333	4766,95	585,4	13301,6
23	0,112	0,052	3	0,000710667	4221,39	638,2	11372,2
24	0,11	0,05	3	0,000765	3921,57	636,7	9791,1
25	0,11	0,05	3	0,000635333	4721,93	618,0	13778,3
26	0,112	0,05	3	0,000782667	3833,05	706,7	10382,5
27	0,112	0,054	3	0,000654667	4582,48	589,1	12370,2
28	0,11	0,053	3	0,000583333	5142,86	682,6	18054,8
29	0,11	0,05	3	0,000663333	4522,61	742,9	15194,4
30	0,112	0,05	3	0,000701333	4277,57	511,8	9364,4

Fonte: Adaptado de Candian, (2007).

## 5.6 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO COM O ENSAIO DA FLEXÃO ESTÁTICA

A Tabela 8 - apresenta os valores obtidos para o Módulo de Elasticidade no ensaio de flexão estática.

Tabela 8 – Valores obtidos no ensaio de flexão estática

Viga	Vão	b (m)	h (m)	I (mm <sup>4</sup> )	$\Delta F$ (N)	$\Delta V$ (mm)	MOE (MPa)
1	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	14,66	12813,07
2	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	17,65	10642,47
3	2,9	0,11	0,052	1288906,67	423,6	13,9	12013,58
4	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	13,8	13611,57
5	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	12,9	14561,21
6	2,9	0,113	0,05	1177083,33	423,6	14,95	12230,95
7	2,9	0,112	0,05	1166666,67	423,6	11,95	15438,11
8	2,9	0,11	0,052	1288906,67	423,6	11,4	14648,14
9	2,9	0,11	0,052	1288906,67	423,6	14,35	11636,85
10	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	11,65	16123,57
11	2,9	0,114	0,053	1414331,5	423,6	12,75	11935,68
12	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	13,57	13842,27
13	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	11,8	15918,61
14	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	10,9	17232,99
15	2,9	0,112	0,05	1166666,67	423,6	11,62	15876,54
16	2,9	0,114	0,05	1187500	423,6	15,75	11507,86
17	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	13,28	14144,55
18	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	12,83	14640,66
19	2,9	0,112	0,05	1166666,67	423,6	13,4	13767,56
20	2,9	0,112	0,05	1166666,67	423,6	14,81	12456,81
21	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	12	15653,30
22	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	11,67	16095,94
23	2,9	0,112	0,052	1312341,33	423,6	15,25	10754,55
24	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	16,1	11667,06
25	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	12,05	15588,35
26	2,9	0,112	0,05	1166666,67	423,6	17,15	10757,16
27	2,9	0,112	0,054	1469664	423,6	13,7	10689,81
28	2,9	0,11	0,053	1364705,83	423,6	9,58	16462,82
29	2,9	0,11	0,05	1145833,33	423,6	11	17076,33
30	2,9	0,112	0,05	1166666,67	423,6	16,1	11458,72

Fonte: Adaptado de Candian, (2007).

## 5.7 TESTE DE NORMALIDADE PARA OS VALORES DE MÓDULOS DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ESTÁTICO

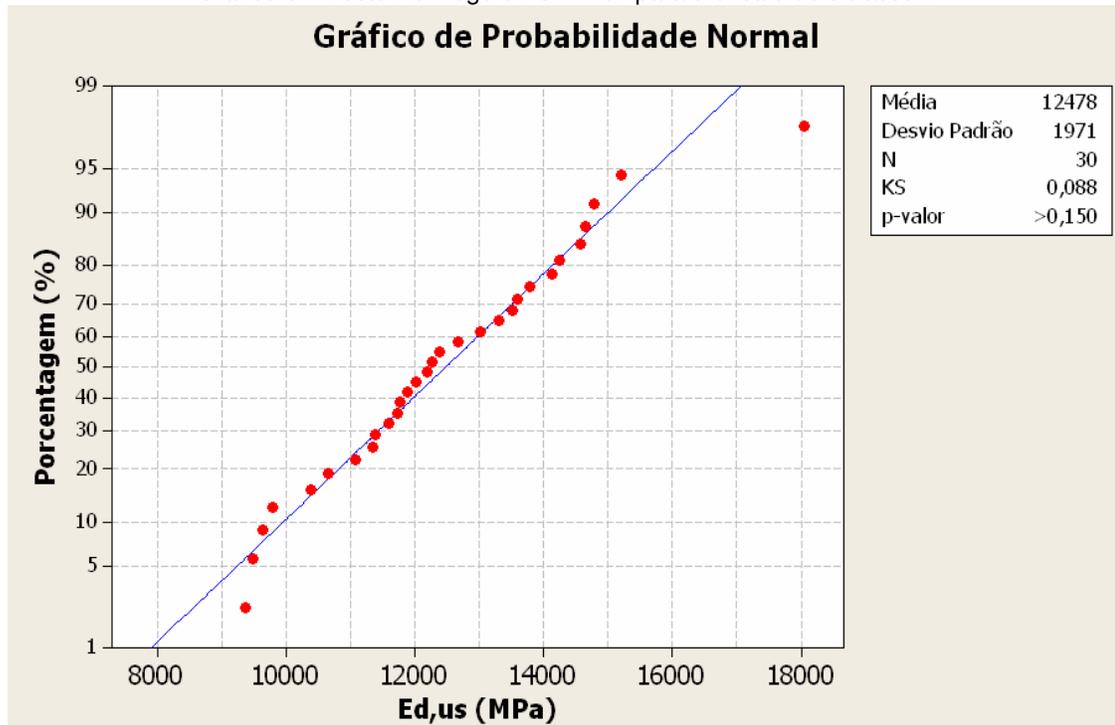
O Teste de normalidade foi realizado para verificar se as amostras (valores obtidos para o ensaio de ultrassom e flexão estática) possuíam uma distribuição normal. Para esta análise, utilizou-se o método Kolmogorov-Smirnov.

Este teste consiste em avaliar duas hipóteses:  $H_0$ : os dados seguem uma distribuição normal;  $H_1$ : os dados não seguem uma distribuição normal. O Teste verifica a máxima diferença entre a função de distribuição acumulada assumida para os dados, no caso a Normal, e a função de distribuição empírica dos dados.

Compara-se esta diferença com um valor crítico D, para um dado nível de significância.

O Gráfico 3 apresenta os dados obtidos do módulo de elasticidade dinâmico obtido pela técnica de ultrassom, aplicando o método de Kolmogorov-Smirnov.

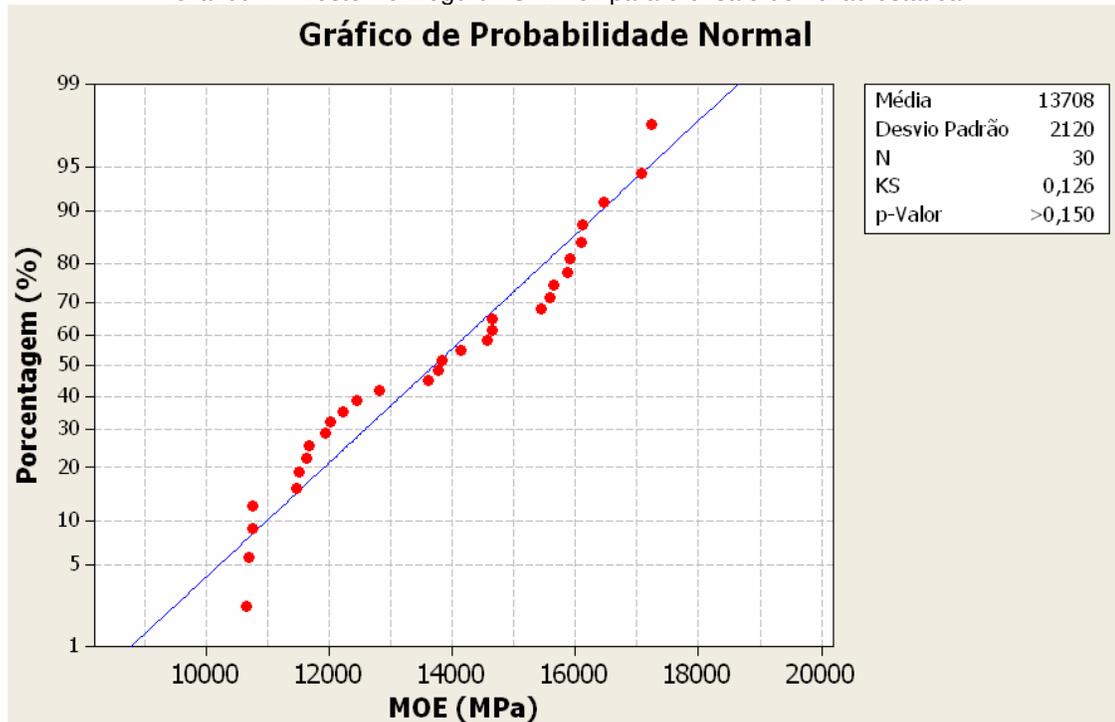
Gráfico 3 – Teste Kolmogorov-Smirnov para o ensaio de ultrassom



Analisando o Gráfico 3, o valor de D obtido para o ensaio de ultrassom é de 0,088. Para  $n = 30$  (número de peças estudadas), a um nível de confiança  $\alpha = 5\%$ , tem-se o valor de  $D = 0,24$ . Assim,  $0,088 < 0,24$ ; aceita-se a hipótese da normalidade.

O Gráfico 4 apresenta os dados obtidos do módulo de elasticidade estático por meio do ensaio de flexão estática, aplicando o método de Kolmogorov-Smirnov.

Gráfico 4 – Teste Kolmogorov-Smirnov para o ensaio de flexão estática



Fonte: Adaptado de Candian, (2007).

Analisando o Gráfico 4, o valor de D obtido para o ensaio de flexão estática é de 0,126. Para  $n = 30$  (número de peças estudadas), a um nível de confiança  $\alpha = 5\%$ , tem-se o valor de  $D = 0,24$ . Assim,  $0,126 < 0,24$ ; aceita-se a hipótese da normalidade.

Seguiu-se a análise estatística verificando a correlação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico por meio de uma regressão linear, conforme abordado no item a seguir.

## 5.8 CORRELAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS DE ELASTICIDADES (ESTÁTICO E DINÂMICO)

A Tabela 9 apresenta dados estatísticos para efeito de comparação entre os ensaios de ultrassom e flexão estática.

Tabela 9 – Estatística Descritiva para os dados obtidos

<b>Estatística Descritiva</b>	<b>Ed,us (MPa)</b>	<b>MOE (MPa)</b>
Tamanho da amostra	n = 30	n = 30
Valor Máximo	18054	17232
Valor Mínimo	9364	10642
Média aritmética	12477,6	13707,7
Coefficiente de variação	15,79%	15,47%

Fonte: A autora, (2011).

Realizou-se posteriormente a análise de variância para comparar os valores do MOE com o  $E_{d,us}$  a um nível de 5% de significância. A Tabela 10 apresenta os valores obtidos pelo programa BioEstat 5.0.

Tabela 10 – Análise da variância obtido para o ensaio de ultrassom e flexão estática

FONTES DE VARIAÇÃO	GL	SQ	QM
Tratamentos	1	22.7 e+06	22.7 e+06
Erro	58	24.3 e+07	41.9 e+05
F =	5.4184		
(p) =	0.0221		
Média (Coluna 1) =	12477.5667		
Média (Coluna 2) =	13707.7000		
Tukey:	Diferença	Q	(p)
Médias ( 1 a 2) =	1230.1333	3.2919	< 0.05

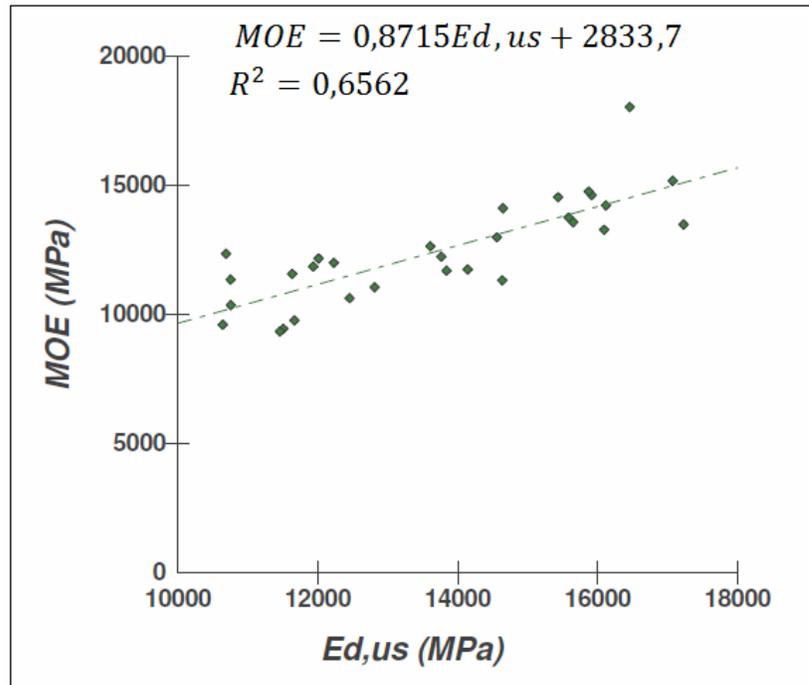
Fonte: A autora, (2011).

Onde Média Coluna 1 é a média dos valores obtidos no ensaio de ultrassom e a média da Coluna 2 é a média obtida para o ensaio de flexão estática.

Analisando a Tabela, é possível verificar que o valor de p encontrado é de  $0,0221 < 0,05$ . Logo, é possível afirmar a dependência linear ao nível de 5% de significância.

Através dos pares do módulo de elasticidade obtido pela técnica de ultrassom e o módulo de elasticidade obtido pelo ensaio de flexão estática foi realizado regressão linear, conforme apresenta a Figura 48.

Figura 48 – Regressão linear entre o MOE e  $E_{d,us}$  para a espécie de Pinus



Fonte: A autora, (2011).

A equação de regressão entre o MOE e o  $E_{d,us}$  é  $MOE = 0,8715 E_{d,us} + 2883,7$ . Esta equação é válida para as amostras de Pinus descritas no tópico 5.

Verifica-se que a correlação obtida pode ser considerada significativa, permitindo verificar o quanto o MOE pode ser explicado pelo  $E_{d,us}$ . Verifica-se que para a espécie estudada, obteve-se um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,66$ . Este valor é significativo, estando compatível com os valores usualmente encontrados na literatura. Assim, pode-se afirmar, que a aferição do Módulo de Elasticidade de peças de madeira de Pinus sp de dimensões estruturais pode ser realizada por meio de ensaio não destrutivo com o emprego do ultrassom.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego de técnicas não destrutivas para a classificação mecânica de peças de madeira é uma importante ferramenta a ser utilizada, uma vez que não alteram suas características originais.

Dentre as técnicas não destrutivas mais estudadas, nota-se um maior emprego do ultrassom para a caracterização de propriedades mecânicas e análise interna da qualidade da madeira. Entretanto, cada técnica tem sua função e aplicação.

Na técnica de ultrassom alguns fatores devem ser levados em consideração como a umidade das peças de madeira, a geometria e a frequência dos transdutores, pois influenciam na propagação da onda ultrassônica, conforme abordados no tópico 4.2.

A partir do emprego do ultrassom para classificação mecânica de peças estruturais de pinus, o valor do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) obtido a partir da análise de regressão entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico foi de 0,66. Deste modo, verificou-se a acurácia dessa técnica para a inferência do módulo de elasticidade em peças estruturais de madeira.

## REFERÊNCIAS

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

AZEVEDO JÚNIOR, Antonio Pires. **Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através da técnica de ultra-som**: fundamentos físicos e resultados experimentais. 2002. 200 f. Dissertação (Mestrado)–Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

BALLARIN, A. W.; GONÇALVES, R. Ensaio não destrutivo aplicados aos produtos à base de madeira: a situação brasileira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABENDI, 2001.

BALLARIN, Adriano Wagner; PALMA, Hernando Alfonso Lara. Avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento com uso do método não destrutivo de vibração transversal. In: ENCONTRO REGIONAL EM MADEIRAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 2011, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EREMEM, 2011. 1 CD-ROM.

BARILLARI, Cristiane T.; FREITAS, Viviane de Paula e. Preservação. **Revista da Madeira**, [S.l.], ed. 68, dez. 2002. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=264&subject=Preserva%C3%A7%C3%A3o&title=Preserva%C3%A7%C3%A3o](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=264&subject=Preserva%C3%A7%C3%A3o&title=Preserva%C3%A7%C3%A3o)>. Acesso em: 1 nov. 2011.

BARNABÉ, Arrigo. Arrigo Barnabé tenta desvendar terra roxa. **Folha.com**, São Paulo, 25 mar. 2010. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/turismo/noticias/ult338u711905.shtml>>. Acesso em: 27 out. 2011.

BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som**. 2001. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)–Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

BERNDT, H.; SCHNIEWIND, A. P.; JOHNSON, G. C. Ultrasonic energy propagation through wood: where, when, how much. In: SYMPOSIUM NDT OF WOOD, 12., 2000, Sopron. **Proceedings...** Sopron: University of Western Hungary, 2000. p. 57-65.

BILESKY, Luciano Rossi. **Simulação numérica do comportamento da madeira de Eucalyptus citriodora ao cisalhamento através do ensaio de tração "Off-Axis"**. Guaratinguetá: UNESP, 2010. 120 p.

BLITZ, J.; SIMPSON, G. **Ultrasonic methods of non-destructive testing**. London: Chapman & Hall, 1996.

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

BOTELHO JÚNIOR, Jerónimo Araújo. **Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos**. 2006. 207 f. Dissertação (Mestrado em Reabilitação do Património Edificado)–Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2006.

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. New York: CRC Press, 1995.

\_\_\_\_\_. **Nondestructive characterization and imaging of wood**. New York: Springer-Verlag, 2003.

BUENO, Carlos Frederico Hermeto. **Tecnologia de materiais de construções**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000.

CALIL JUNIOR, Carlito. **O potencial do uso da madeira de pinus na construção civil**. [S.l.: s.n.], 2011. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br/construcao/noticias/o-potencial-do-uso-da-madeira-de-pinus-na-construcao-81480-1.asp>>. 12 set. 2011.

CALIL JÚNIOR, C.; MINÁ, A. J. S. Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 335-8, 2003.

CANDIAN, Marcela. **Estudo da classificação não-destrutiva de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas**. 2007. 154 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil)–Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

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

CANDIAN, Marcela; SALES, Almir; CARDIN, Viviane de Salles. Determinação do módulo de elasticidade de peças estruturais da espécie goupia glabra com emprego de técnicas não-destrutivas. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Trabalho apresentado...** Londrina: [s.n.], 2008.

\_\_\_\_\_. Proposição de valores de coeficiente de modificação para a revisão da norma brasileira: NBR 7190: 1997: projeto de estruturas de madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Trabalho apresentado...** Londrina: [s.n.], 2008.

CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JUNIOR, A. P. Avaliação não destrutiva de madeiras através da técnica de ultra-sonografia. In: SEMANA DE PÓS GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 3., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2002. p. 21-23.

CARREIRA, M. R. et al. Classificação de peças estruturais de *pinus sp* por ultrassom. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Trabalho apresentado...** Foz do Iguaçu: [s.n.], 2006. p. 8316-8328.

CARREIRA, Marcelo Rodrigo. **Critérios para classificação visual de peças estruturais de *Pinus Sp***. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas)–Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CARREIRA, Marcelo Rodrigo; DIAS, Antônio Alves. Critérios para classificação visual de peças estruturais de *Pinus Sp*. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 8, n. 34, p. 17-43, 2006.

CARREIRA, Marcelo Rodrigo; ALCÂNTARA SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de; DIAS, Antônio Alves. Estimativa do módulo de elasticidade à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal livre. In: ENCONTRO REGIONAL EM MADEIRAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 2011, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EREMEM, 2011. 1 CD-ROM.

CARREIRA, Marcelo Rodrigo. et al. **Aplicação do ensaio de vibração transversal livre na avaliação não-destrutiva de vigas de Madeira Laminada Colada (MLC)**. In: ENCONTRO REGIONAL EM MADEIRAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 2011, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EREMEM, 2011. 1 CD-ROM.

CASABELLA. **A casa de madeira “ecologicamente correta”**: madeira roliça tratada. São Paulo, [2011?]. Disponível em: <<http://www.casabella.etc.br/>>. Acesso em: 12 set. 2011.

CASTELO, P. A. R. **Avaliação da qualidade da madeira de pinus taeda em diferentes sítios de crescimento espaçamentos, através do método não destrutivo de emissão de ondas de tensão**. 2007. 137 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)–Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

CHIARADIA, Gabriel, M. S. **Desempenho físico-mecânico de painéis de LVL de pinus tropicais da região de São Paulo**. 2007. 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007. Disponível em: <[http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bla/33004064021P7/2007/gabriel\\_msc\\_dr\\_botfca.pdf](http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bla/33004064021P7/2007/gabriel_msc_dr_botfca.pdf)>. Acesso em: 11 jun. 2010.

COLIN, Silvio. **A madeira em tempos de sustentabilidade**. [S.l.: s.n.], 2011. Disponível em: <<http://coisasdaarquitectura.wordpress.com/2011/02/24/a-madeira-em-tempos-de-sustentabilidade-i/>> Acesso em: 12 set. 2011.

COMINO, E. et al. Ultrasonic tomography for wood decay diagnosis. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT HEALTH IN URBAN HORTICULTURE, 2000, Braunschweig. **Proceedings...** Braunschweig: Mitt. Bundesanst Land-Forstwirtschaft, 2000.

COSTA, A. **Coletâneas de anatomia da madeira**. Joinville: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2001. Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/sbs/professores/arlindo/materiais/APOSTILANATOMIA1.pdf>>. Acesso em: 6 maio 2008.

COUTINHO, Joana de Sousa. **Sebenta de Materiais de Construção 1: madeiras**. Porto: FEUP, 1999. 37 p.

CUNHA, Alexsandro Bayestorff da. **Produção de vigas estruturais de madeira avaliadas por meio de ensaios estáticos e dinâmicos**. 2007. Tese (Doutorado)–Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

DIVOS, F.; SZALAI, L. Tree evaluation by acoustic tomography. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 13., 2002, Berkeley, USA. **Proceedings...** Berkeley: University of California, 2002. p. 251-256.

DUARTE, Denise; GONÇALVES, Joana Carla Soares; MULFARTH, Roberta Kronka. **O mercado de madeira e a construção civil**. [S.l.: s.n., 200-?].

ESPÍNDOLA, Luciana da Rosa; MORAES, Poliana Dias de. **Coordenação modular em sistemas leves de madeira e sistemas mistos**. [S.l.: s.n., 200-?].

ESTUDO detalha benefícios do equilíbrio da umidade. **REMADE**: revista da madeira, [S.l.], n. 80, abr. 2004. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=545&subject=Secagem&title=Estudo%20detalha%20benef%C3%ADcios%20do%20equil%C3%ADbrio%20da%20umidade](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=545&subject=Secagem&title=Estudo%20detalha%20benef%C3%ADcios%20do%20equil%C3%ADbrio%20da%20umidade)>. Acesso em: 1 ago. 2011.

EVANS, R.; ILIC, J. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. **Forest Products Journal**, [S.l.], v. 51, n. 3, p. 53-57, 2001.

EVANS, R.; KIBBLEWHITE, R. P. Controlling wood stiffness in plantation softwoods. In: SYMPOSIUM NDT OF WOOD, 12., 2000, Sopron. **Proceedings...** Sopron: University of Western Hungary, 2000. p. 67-74.

FREITAS, R. R.; GÓES, J. L. N. Classificação de peças estruturais de pinus sp. pela MSR (Machine Stress Rate). **Revista Minerva**, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 119-129, jul./dez. 2005. Disponível em: <[http://www.fipai.org.br/Minerva%2002\(02\)%2002.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2002(02)%2002.pdf)>. Acesso em: 21 maio 2010.

FREITAS, R. R.; CALIL JUNIOR, C. Classificação de peças estruturais de Pinus spp. pela MSR (Machine Stress Rate). In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: EBRAMEM: UFMT, 2004.

FURIATI, M. **Classificação estrutural de peças de madeira**. 1981. Dissertação (Mestrado)–Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

GABRIEL, M. S. C.; BALLARIN, A. W. Determinação do módulo de elasticidade da madeira de *P. taeda* com uso do método não-destrutivo das ondas de tensão. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7, 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: LaMEM, EESC, USP, 2000.

GESUALDO, F. A. R. **Estruturas de madeira**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2003. Notas de aula.

GONÇALVES, Raquel; BARTHOLOMEU, André. Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeirade *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 269-274, 2000.

HAUFFE, P.; MAHLER, G. Evaluation of internal log quality using x-ray and ultrasound. In: SYMPOSIUM NDT OF WOOD, 12., 2000, Sopron. **Proceedings...** Sopron: University of Western Hungary, 2000. p. 259-263.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS (IPEF). Resistógrafo: qualidade e precisão na análise da madeira. **IPEF Notícias**, Piracicaba, v. 23, n. 144, maio/jun. 1999. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ipefnoticias/ipefnoticias144.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2008.

INSTRUMENT MECHANIC LAB - IML/USA. **IML wood testing systems**. Kennesaw, [2000?]. Disponível em: <<http://www.implusa.com/html/products.htm>> Acesso em: 15 ago. 2008.

JAYNE, B. A. Vibrational properties of wood as indices of quality. **Forest Products Journal**, Madison, v. 9, n. 11, p. 413-416, 1959.

KANG, H.; BOOKER, R. E. Variation of stress wave velocity with the MC and temperature. **Wood and Science Technology**, [S.l.], v. 36, p. 41-54, 2002.

KLITZKE, Ricardo J. **Curso de secagem da madeira**. Paraná: DETF/UFPR, 2008. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/graduacao/secagemmadeira.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2011.

KLOCK, U. et al. **Química da madeira**. 3. ed. rev. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/quimicadamadeira/quimicadamadeira.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2008.

LAROCA, Christine. A madeira como alternativa na construção de habitações. **Remade**: revista da madeira, nov. 2001.

\_\_\_\_\_. **Habitação social em madeira**: uma alternativa viável. 2002. Dissertação (Mestrado)—Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

- MARQUES, Luís Eduardo Menezes Marinho. **O papel da madeira na sustentabilidade da construção**. Porto: Universidade do Porto, 2008. 111 p.
- MINÁ, Alexandre José Soares et al. Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. **Scientia Forestalis**, [S.l.], n. 65, p. 188-196, jun. 2004.
- MOLINA, Julio Cesar. Avaliação não destrutiva da deterioração de postes roliços de madeira através da utilização do resistógrafo. In: ENCONTRO REGIONAL EM MADEIRAS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 2011, [S.l.]. **Anais...** [S.l.]: EREMEM, 2011.
- MORALES, E. A. M. **Técnica de propagação de ondas na estimativa de propriedades mecânicas de painéis OSB**. 2006. 96 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)–Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.
- MURPHY, J. F. **Commentary on factors affecting transverse vibration using an idealized theoretical equation**. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000. 4 p. Reserch note FPL-RN-0276.
- NICOLOTTI, G. et al. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. **Journal of Arboriculture**, [S.l.], v. 29, n. 2, p. 66-78, Mar. 2003.
- NOGUEIRA, Marcelo. **Determinação de módulos de elasticidade à compressão da madeira de pinus taeda l com o uso de ultra-som**. 2003. 144 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2003. Disponível em: <<http://www.bv.fapesp.br/dissertacoes-teses/2896/determinacao-modulos-elasticidade-compressao-madeira-pinus/>>. Acesso em: 25 maio 2010.
- NOGUEIRA, Marcelo et al. Classificação de peças de madeira serrada de dimensões estruturais de *Eucalyptus sp.* com uso de ensaios não-destrutivos. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Trabalho apresentado...** Londrina: [s.n.], 2008.
- NOGUEIRA, Marcelo; BALLARIN, Adriano Wagner. Determinação dos módulos de elasticidade da madeira de pinus taeda l. com ensaios não-destrutivos. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 22, n. 3, p. 86-101, 2007. Disponível em: <[http://www.fca.unesp.br/cd\\_revista\\_energia\\_vol11/vol22n32007/artigos/marcelo%20nogueira\\_ok.pdf](http://www.fca.unesp.br/cd_revista_energia_vol11/vol22n32007/artigos/marcelo%20nogueira_ok.pdf)>. Acesso em: 2 jun. 2010.
- ODILON, A. L. da C. **Velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira para diferentes condições de umidade**. 2005. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)–Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2005.
- OLIVEIRA, F. G. R. **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de ultra-som**. 2001. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)–Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

OLIVEIRA, F. G. R. et al. A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (*Goupia glabra*). **Building and Environment**, 2005. No prelo.

OLIVEIRA, F. G. R. et al. Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de ultra-som. In: PAN AMERICAN CONFERENCE FOR NON DESTRUCTIVE TESTING, 3., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], 2003.

\_\_\_\_\_. Influência da seção transversal na velocidade ultra-sônica na madeira *Eucalyptus citriodora*. **Cerne**, [S.l.], v. 11, n. 2, p. 197-203, abr./jun. 2005. Disponível em: <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/744/74411210.pdf>>. Acesso em: 26 maio 2010.

OLIVEIRA, Fabiana Goia Rosa de; SALES, Almir. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira. **Revista Minerva**, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 25-31, jan./jun. 2005.

OLIVEIRA, L. B. **Avaliação da qualidade da madeira da espécie florestal scleronema micranthum ducke através de metodologia destrutiva e não-destrutiva**. 2006. Dissertação (Mestrado)—Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2006.

PADUELLI, Marcela Candian. **Estudo da técnica de ondas de tensão como instrumento de avaliação interna de árvores urbanas**. 2011. 149 f. Tese (Doutorado)—Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

PELIZAN, Tatiana Raquele. **Estudo de propriedades mecânicas de peças roliças de eucalipto citriodora utilizando a técnica de ultra-som**. 2004. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)—Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PETRUCCI, E. **Madeiras**. 2. ed. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1980.

QUOIRIN, N. S. R. **Diagnóstico de amostras de madeira por tomografia de raios-x**. 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)—Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

RIBEIRO, P. G. **Utilização de técnicas não destrutivas para caracterização de madeiras de Pinus caribaea Var. hondurensis e de Eucalyptus grandis**. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)—Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

RIVERO, L. A. **Laminado colado e contraplacado de bambu**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)—Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000313904>>. Acesso em: 14 jun. 2010.

ROCHA, Ricardo Ramos DA. **Avaliação não-destrutiva de madeiras para dormentes ferroviários**. 2003. 112 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)– Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2003.

ROSS, R. J. et al. Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small diameter logs. In: SYMPOSIUM NDT OF WOOD, 12., 2000, Sopron. **Proceedings...** Sopron: University of Western Hungary, 2000. p. 155-163.

RUST, S. A new tomographic device for the nondestructive testing of trees. In: SYMPOSIUM NDT OF WOOD, 12., 2000, Sopron. **Proceedings...** Sopron: University of Western Hungary, 2000. p. 233-237.

SALES, Almir et al. Obtenção de imagens tomográficas a partir do emprego de ondas de tensão em peças roliças de eucalipto. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 33., 2008, Santiago. **Trabalho apresentado...** Santiago: [s.n.], 2008.

SALES, Almir; CANDIAN, Marcela; CARDIN, Viviane de Salles. Revisão da NBR 7190: 1997 – Projeto de estruturas de madeira: proposição de coeficiente de modificação para ensaios não-destrutivos. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 33., 2008, Santiago. **Trabalho apresentado...** Santiago: [s.n.], 2008.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Estimativas de propriedades da madeira de pinus taeda através do método não-destrutivo emissão de onda de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado**. 2005. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)–Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SIMPSON, W. T; WANG, X. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying. **Forest Products Journal**, Madison, v. 51, n. 10, p. 51-54, 2001.

SOCCO, V. et al. Open problems concerning ultrasonic tomography for wood decays diagnosis. In: SYMPOSIUM NDT OF WOOD, 12., 2000, Sopron. **Proceedings...** Sopron: University of Western Hungary, 2000. p. 468.

SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (SPIB). **Standard grading rules for Southern Pine lumber**. Pensacola, 1994.

STAMATO, G. C. et al. Cuidados com a Utilização de Coníferas nas Estruturas de Madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Carlos: Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira, 2006. 1 CD-ROM.

SZÜCS, A. B. et al. **Estruturas de madeira**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

TRINCA, Alex Julio. **Influência da dimensão do corpo de prova no ensaio destrutivo de compressão paralela às fibras e no ensaio não-destrutivo utilizando ultra-som**. 2006. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)– Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

TSUCHIKAWA, S.; TAKAHASHI, T.; TSUTSUMI, S. Nondestructive measurement of wood properties by using near-infrared laser radiation. **Forest Products Journal**, [S.l.], v. 50, n. 1, p. 81-86, 2000.

WANG, X.; CHUANG, S. Experimental data correction of the dynamic elastic moduli, velocity and density of solid wood as a function of moisture content above the fiber saturation point. **Holzforschung**, [S.l.], v. 54, p. 309-314, 2000.

WANG, S. Y.; LIN, C. J.; CHIU, C. M. The adjusted dynamic modulus of elasticity above the fiber saturation point in Taiwania plantation wood by ultrasonic-wave measurement. **Holzforschung**, [S.l.], v. 57, n. 5, p. 547-552, 2003.

ZENID, Geraldo José. **Madeira**: uso sustentável na construção civil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: SVMA, 2009.