UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

**ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS
ROLIÇAS DE EUCALIPTO CITRIODORA UTILIZANDO A
TÉCNICA DE ULTRA-SOM.**

Tatiana Raquele Pelizan

Dissertação apresentada à Área
Interunidades em Ciência e
Engenharia de Materiais, para
obtenção do título de Mestre em
Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Almir Sales

São Carlos
2004

À minha mãe, Lucilia Pavlak Pelizan.
(*in memorian*)

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Almir Sales, pela valiosa orientação e principalmente pela amizade e confiança, depositados em mim. Muito obrigada pelo apoio e motivação, mesmo quando tudo parecia “*nebuloso*”.

Ao colega Alexandre Miná, pela valiosa ajuda na concepção do plano de pesquisa, pela ajuda e apoio demonstrados durante o trabalho e pelo empréstimo do material madeira para a realização dos ensaios.

A colega Fabiana de Oliveira, pelo apoio e inestimável ajuda na busca de material bibliográfico.

Aos alunos de iniciação científica da UFSCAR, Zé, Marcela, Francieli e Karla, pela grande ajuda na execução dos ensaios.

Aos professores, técnicos e funcionários do LaMEM, pelos auxílios prestados.

Aos colegas e amigos do LaMEM, pelo companheirismo.

Ao meu namorado, Sergio Bressan, pelo incentivo, paciência e ternura.

Ao meu pai, Antonio e meus irmãos, Mig, Dani e Fer, pelo suporte e compreensão.

A Agência Financiadora CAPES por ter concedido a Bolsa para a realização da pesquisa.

Enfim, meu agradecimento a todos que, direta ou indiretamente, estiveram ao meu lado nesta jornada.

*“Dieu parle dans le calme plus
haut que dans la tempête.”*
Mickiewikz

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	2
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Características físicas e mecânicas da madeira	4
2.2 O gênero <i>Eucalyptus</i>	8
2.3 Métodos de avaliação não destrutiva (NDE) em madeiras.....	10
2.4 Ondas ultra-sônicas na madeira.....	14
2.4.1 Sistemas de medição.....	14
2.4.2 Transdutores	17
2.4.3 Velocidade da onda ultra-sônica.....	18
2.4.4 Fatores que influenciam a propagação da onda ultra-sônica	19
2.5 Utilização da madeira roliça para fins estruturais	23
2.5.1 Vantagens na avaliação não-destrutiva de peças roliças.....	25
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1 Espécie estudada	30
3.2 Propriedades físicas e mecânicas	30
3.2.1 Densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$).....	31
3.2.2 Teor de umidade U (%).....	32
3.2.3 Ensaio a compressão paralela às fibras (f_{c0} e E_{c0}).....	32
3.2.4 Ensaio a flexão estática (E_{M0} e f_M)	33
3.3 Método.....	33
3.3.1 Primeira Fase.....	35
3.3.2 Segunda Fase.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1 Diferenciação das propriedades determinadas no cerne e alburno.....	43
4.2 Análise dos dados obtidos na primeira e segunda fase.....	44
4.3 Regressões para C_{LL} , MOE, MOR, f_{c0} , E_{c0} , f_M e E_{M0}	46
4.3.1 Análise para C_{LL} versus MOE	50
4.3.2 Análise para C_{LL} versus MOR	52
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Os eixos principais da madeira. Fonte: FOREST PRODUCTS LABORATORY (1999).	7
Figura 2 - Ensaio por ultra-sons, técnica de transmissão. Fonte: ROSS e PELLERIN (1994)	15
Figura 3 - Ensaio por ultra-sons, técnica de transmissão. Fonte: SCHMOLDT et al. (1993).	16
Figura 4 - Ensaio por ultra-sons, técnica de transmissão. Fonte: ROSS e PELLERIN (1994).	16
Figura 5 - Transdutor ultra-sônico de contato puntual. Fonte: SANDOZ (1996).	18
Figura 6 - Esquema de propagação de onda ultra-sônica em: a) tronco são; b) tronco deteriorado. Fonte: SANDOZ et al. (2003b).....	23
Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.	32
Figura 8 - Ensaio de flexão estática em corpos-de-prova de 5x5x115cm.....	33
Figura 9 - Esquema da sequência das etapas da experimentação.	34
Figura 10 - Ensaio de ultra-som em um poste.....	35
Figura 11 - Ensaio de flexão estática nos postes.	36
Figura 12 - Toras utilizadas na primeira etapa.	37
Figura 13 - Utilização do equipamento de ultra-som nas direções longitudinal (a) e radial (b).	38
Figura 14 - Medidas do diâmetro do alburno (a) e do cerne (b).	39
Figura 15 - Equipamento de ultra-som SYLVATEST.....	39
Figura 16 - Utilização do medidor de umidade nas toras.	40
Figura 17 - Equipamento de ultra-som V-METER MARK II.	41
Figura 18 - C_{LL} versus MOE.	51
Figura 19 - Resíduos pelos valores da regressão entre C_{LL} versus MOE postes.	52
Figura 20 - C_{LL} versus MOR.	53
Figura 21 - Resíduos pelos valores da regressão entre C_{LL} versus MOR postes.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela I -	Áreas plantadas com eucalipto no Brasil.....	9
Tabela II -	Resultados obtidos com aplicação do ultra-som.....	29
Tabela III -	Propriedades determinadas para cerne e alburno, ensaios das peças roliças, seção transversal com cerne menor que 35%.	43
Tabela IV -	Propriedades determinadas para cerne e alburno, ensaios das peças roliças, seção transversal com cerne maior que 35%.	43
Tabela V -	Valores médios, mínimo, máximo e coeficientes de variação dos postes.	44
Tabela VI -	Valores médios, mínimo e máximo e coeficientes de variação das toras.....	45
Tabela VII -	Propriedades determinadas no ensaio de compressão paralela às fibras (5x5x15cm).....	45
Tabela VIII -	Propriedades determinadas no ensaio de flexão estática (5x5x115cm).	45
Tabela IX -	Valores das análises de variância obtidas para as regressões realizadas com entre C_{LL} , MOE e MOR, f_{c0} , E_{c0} , f_M e E_{M0} para os postes e toras com seção transversal com cerne menor que 35%.	47
Tabela X -	Valores das análises de variância obtidas para as regressões realizadas com entre C_{LL} , MOE e MOR, f_{c0} , E_{c0} , f_M e E_{M0} para os postes e toras com seção transversal com cerne maior que 35%.	47
Tabela XI -	Quadro resumo dos coeficientes de determinação obtidos entre os valores dos ensaios de rigidez e de resistência para os postes com seção transversal com cerne menor que 35%.	48
Tabela XII -	Quadro resumo dos coeficientes de determinação obtidos entre os valores dos ensaios de rigidez e de resistência para os postes com seção transversal com cerne maior que 35%.	49
Tabela XIII -	Quadro resumo dos coeficientes de determinação obtidos entre os valores dos ensaios não-destrutivo e ensaios estáticos para postes com cerne menor que 35%.	49
Tabela XIV -	Quadro resumo dos coeficientes de determinação obtidos entre os valores dos ensaios não-destrutivo e ensaios estáticos para postes com cerne maior que 35%.	50
Tabela XV -	Quadro de Análise de Variância para os dados de C_{LL} e MOE (postes).	51
Tabela XVI -	Quadro de Análise de Variância para os dados de C_{LL} e MOR (postes).	53

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\rho_{ap, 12\%}$ - densidade aparente a um teor de umidade de 12%

CPs – corpos-de-prova

d – distância entre os transdutores

E_{c0} – módulo de elasticidade na compressão paralela

E_{M0} – módulo de elasticidade na flexão estática

$F_{0.5}$ e F_{dados} – distribuição F de Snedecor a significância de 5% e para os dados da amostra.

f_{c0} – resistência à compressão paralela às fibras

f_M – resistência na flexão estática

MOE – módulo de elasticidade na flexão estática

MOR – módulo de ruptura na flexão estática

R^2 – coeficiente de determinação

t – tempo de propagação

$t_{0.5}$ e t_{dados} – distribuição t de Student a significância de 5% e para os dados da amostra.

U – teor de umidade

V – velocidade da onda

V_{LL} – velocidade na direção longitudinal

V_{RR} – velocidade na direção radial

V_{TT} – velocidade na direção transversal

RESUMO

Este trabalho teve como objetivos determinar propriedades mecânicas para ensaios não destrutivos em peças de madeira roliça por meio de ondas ultra-sônicas, por meio de correlação destes com ensaios estáticos e identificar a dependência da velocidade ultra-sônica em relação à geometria de peças roliças. A técnica de ultra-som é baseada na relação entre a propagação da onda ultra-sônica no material e as propriedades elásticas deste material. Na experimentação utilizou-se Eucalipto Citriodora e o procedimento desenvolveu-se em duas etapas: a primeira com peças roliças de tamanho estrutural e a segunda com corpos-de-prova retirados destas peças. As seguintes propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas: densidade aparente a um teor de umidade de 12% ($\rho_{ap,12\%}$); teor de umidade (U); resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}); módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}); resistência à flexão estática (MOR ou f_M) e módulo de elasticidade na flexão estática (MOE ou E_{M0}). Para determinação do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foram utilizados o aparelho de ultra-som Sylvatest, com transdutor exponencial de 22kHz, e o aparelho V-Meter Mark II, com transdutores de faces planas de 54 e 150 kHz. As transmissões foram realizadas nas direções longitudinal e radial, sendo que as peças ensaiadas se encontravam com teor médio de umidade de 12%. Os resultados indicam que a técnica de ultra-som é sensível à geometria das peças roliças. As análises estatísticas dos dados indicam que esta técnica de avaliação não destrutiva pode ser usada para avaliar as propriedades mecânicas de peças roliças de madeira com relativa confiabilidade.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the mechanical properties for nondestructive testing in round timber by ultrasonic waves, through the correlation of these with static tests, and to identify the dependence of the ultrasonic speed in relation to the geometry of roundwood. The ultrasound technique is based on the relation between the propagation of the ultrasonic wave in the material and the elastic properties of such a material. In the experimentation *Eucalypto Citriodora* was used and the procedure was developed in two stages: the first one with roundwood of structural size and second with specimens removed from these parts. The following physical and mechanical properties had been evaluated: apparent density at 12% ($\rho_{ap,12\%}$); moisture content (U); strength in compression parallel-to-grain (f_{c0}); modulus of elasticity in compression parallel-to-grain (E_{c0}), modulus of rupture (MOR or f_M) and modulus of elasticity (MOE or E_{M0}). For determination of the dynamic modulus of elasticity (E_d) it was used the Sylvatest ultrasound device, with exponential transducer of 22kHz, as well as the V-Meter Mark II device, with plane transducers of 54 and 150 kHz. The results indicate that the ultrasound technique is sensible to the geometry of the roundwood. The statistical analyses of the data indicate that this technique of nondestructive evaluation can be used to evaluate the mechanical properties of round timber with relative reliability.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é uma matéria-prima que se torna cada vez mais importante em nossa sociedade, frente à restrição ambiental ao uso de energia fóssil e novas necessidades relacionadas ao desenvolvimento demográfico. A madeira, como material biológico, também desenvolve importante papel no ciclo do carbono.

A exploração adequada dos recursos florestais torna-se obrigatória por dois motivos: a valorização ambiental dos recursos florestais, e a viabilidade da produção, que só ocorre com a racionalização do uso integral de matéria-prima e meios de produção, MATOS (1997).

A madeira possui um potencial altamente propício ao meio ambiente para utilização como material de construção, por representar um recurso renovável, não fóssil, de baixa demanda energética em seu processo de produção, além de ter um importante papel como medida estratégica na diminuição da concentração de CO₂ na atmosfera, BARBOSA e INO (2000).

Para produzir um metro cúbico de madeira, 500 kg a 600 kg, a árvore assimila por fotossíntese e armazena aproximadamente 1 tonelada de CO₂. Paralelo a isso, ainda

produz 300 kg a 400 kg de oxigênio, SANDOZ (2003). Assim, pode-se inferir que uma peça de madeira cuja vida útil seja maior estocará por mais tempo este carbono.

O conhecimento das propriedades físico-mecânicas da madeira aliado à definição das condições de exposição pode conferir às estruturas de madeira desempenho e durabilidade que as tornam competitivas frente aos demais materiais estruturais, CAMPOS (2002).

As técnicas não-destrutivas são ferramentas utilizadas na caracterização da madeira e na avaliação da durabilidade. Dentre estas técnicas enquadram-se a avaliação visual, testes químicos, técnicas de emissão acústica, vibração, emissão ultra-sônica, raios-x, e outras.

Comparado com métodos não-destrutivos convencionais, aplicações de emissão ultra-sônica na avaliação de estruturas de madeira *in-situ*, são relativamente novas e ainda devem ser melhoradas. Logo é necessário compreender-se os fenômenos de propagação e atenuação de ondas ultra-sônicas em madeira.

1.1 Objetivos

O presente trabalho possui como objetivos:

- ✓ Determinar propriedades mecânicas de peças de madeira roliça por meio de ondas ultra-sônicas, utilizando correlação dos resultados destes ensaios com os de ensaios estáticos;

- ✓ Identificar a dependência da velocidade ultra-sônica em relação à geometria de peças roliças.

Com os resultados desta pesquisa também será possível gerar subsídios técnico-científicos para a introdução de ensaios não destrutivos na avaliação e classificação de peças de madeira roliça utilizadas em estruturas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre a técnica de propagação de ondas ultra-sônicas na madeira.

Inicialmente, estão descritas as propriedades físicas e mecânicas da madeira. Após, segue uma breve descrição sobre a espécie escolhida para estudo. A seguir, estão relacionados os aspectos referentes à propagação de ondas ultra-sônicas na madeira como: relações entre o ultra-som e as propriedades mecânicas da madeira; princípio de utilização desta técnica; atenuação na madeira e fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas na madeira.

2.1 Características físicas e mecânicas da madeira

A elevada variabilidade, normalmente associada à organização interna (anatomia) da madeira e as suas propriedades (físicas e mecânicas), explica-se pelo fato da madeira resultar da atividade de crescimento de um ser vivo (a árvore), MACHADO (2000).

Esta estrutura interna complexa resulta em um comportamento anisotrópico. Além da variabilidade natural e anisotropia, a madeira também apresenta como características a porosidade e a não homogeneidade. A estas causas de variabilidade deve-se

acrescentar a ocorrência de defeitos (nós, bolsas de resina, fendas, etc.), que afetam principalmente as propriedades mecânicas.

Segundo BODIG e JAYNE (1982), do ponto de vista construtivo as características físicas mais importantes são: higroscopicidade, retratibilidade e densidade.

⇒ Higroscopicidade

A umidade pode existir na madeira como água livre (no interior das células) ou como água de impregnação (nas paredes dos vasos, traqueídes e raios medulares). A perda da água livre ocorre facilmente pela higroscopia e porosidade da madeira, enquanto a água de impregnação é eliminada por meio da secagem artificial, com a tendência de permanecer em equilíbrio com a umidade do meio ambiente.

A umidade afeta drasticamente as propriedades mecânicas e a suscetibilidade à degradação da madeira. A quantidade de água absorvida pela madeira é influenciada pelas condições do meio ambiente e pela umidade relativa.

⇒ Retratabilidade

Quando o teor de umidade corresponde ao mínimo de água livre e ao máximo de impregnação, chega-se ao ponto de saturação (aproximadamente 25%). A partir deste ponto a perda de umidade é mais difícil e acompanhada de retração dimensional.

KOLLMANN e COTÊ (1968)

As alterações ocorridas no decorrer do processo de secagem são diretamente proporcionais ao teor de umidade até o ponto de saturação. Em geral, as folhosas retraem mais que as coníferas.

⇒ Densidade

É uma característica particular de cada espécie, podendo, ainda, variar para árvores da mesma espécie. Esta variação se deve principalmente às diferentes proporções de vazios das células em relação ao tecido lenhoso.

Segundo OLIVEIRA (1997), entre outros, a densidade é determinada por diversas características da madeira, como o tamanho das células e a espessura das paredes celulares, a razão entre lenho juvenil e tardio, a quantidade e o tamanho dos raios e vasos e outros fatores. Além das características das células, a ocorrência de depósitos químicos entre as células ou dentro delas também pode afetar drasticamente a densidade da madeira.

A umidade influi significativamente nos valores da densidade. Assim, para determinação da densidade em corpos de prova adota-se a umidade de equilíbrio ao ar, ou seja, em torno de 12%.

A madeira possui propriedades mecânicas únicas e independentes nas direções dos três eixos mutuamente perpendiculares: longitudinal, radial, e tangencial. O eixo longitudinal “L” é paralelo à fibra; o eixo radial “R” é normal aos anéis de

crescimento; e o eixo tangencial “T” é tangente aos anéis de crescimento. Esses eixos estão esquematizados na Figura 1.

Figura 1 - Os eixos principais da madeira. Fonte: FOREST PRODUCTS LABORATORY (1999).

Doze constantes (nove independentes) são necessárias para descrever o comportamento elástico de madeira: três módulos de elasticidade E , três módulos de elasticidade transversal G , e seis coeficientes de Poisson μ .

Entre os materiais utilizados em estruturas para a construção civil, a madeira é o que apresenta maior variabilidade em suas características mecânicas, o que segundo SALES (1996), dificulta a sua aplicação como material estrutural, principalmente diante de materiais como aço e concreto.

Como já citado, os fatores que determinam esse comportamento estão relacionados à própria natureza das árvores, e logo a sua anisotropia.

Esta dificuldade de aplicação também é inerente à caracterização das propriedades de resistência da madeira. Segundo a NBR 7190/97 a determinação das propriedades é feita por meio de ensaios destrutivos de corpos de prova para as seguintes propriedades: resistência à compressão e à tração paralelas às fibras; resistência à compressão e à tração normais às fibras; resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e resistência ao embutimento paralelo e normal às fibras.

2.2 O gênero *Eucalyptus*

A introdução do gênero *Eucalyptus* no Brasil ocorreu no início do século XIX, com evidências de que as primeiras árvores teriam sido plantadas em 1825, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro.

Até o início deste século, o eucalipto foi plantado com a finalidade de ornamentação ou para servir de quebra-ventos, pelo seu extraordinário crescimento. Todavia, o responsável pela introdução de plantações econômicas no Brasil foi o silvicultor Edmundo Navarro de Andrade.

De 1909 a 1966, quando passou a vigorar a Lei 5.106 dos incentivos fiscais ao reflorestamento, haviam sido plantados 470.000 hectares de eucalipto em todo o Brasil. Em 1987, foram abolidos tais incentivos. Contudo, a tecnologia desenvolvida neste período encontra-se fortalecida e completamente absorvida pelas indústrias florestais, Tabela 1.

O Brasil consome atualmente 350 milhões de m³/ano, o que significa 8% do consumo mundial de madeira. Estudos mais recentes indicam que existem no País 4,6 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo 1,7 milhões do gênero *Pinus* e 2,5 milhões do gênero *Eucalyptus*, SILVA (2003).

Tabela I - Áreas plantadas com eucalipto no Brasil.

Estado	Área Plantada (ha)	Área do Estado (%)	Área Nacional (%)
Amapá	13.000	0,42	0,4
Pará	46.000	0,22	1,5
Rio Grande do Sul	116.000	0,90	3,9
Santa Catarina	42.000	0,49	1,4
Paraná	67.000	3,36	2,3
São Paulo	574.000	2,72	19,4
Mato Grosso do Sul	116.000	0,66	2,7
Minas Gerais	1.080.000	2,16	51,6
Espírito Santo	152.000	3,29	5,1
Bahia	213.000	0,80	7,2

Fonte: SBS – ABRACAVE (2001).

A madeira de eucalipto tem-se prestado a uma série de finalidades. Além dos usos tradicionais, como lenha, estacas, moirões, dormentes, carvão vegetal, celulose e papel, chapas de fibras e de partículas, há uma forte tendência em utilizá-la, também, para usos mais nobres, como fabricação de casas, móveis e estruturas.

O gênero *Eucalyptus* compreende um grande número de espécies, com madeiras de características físico-mecânicas e estéticas bastante diferenciadas, o que permite a substituição de várias espécies latifoliadas nativas, PEREIRA et al. (2000).

De acordo com VIDOR (2003), as implicações ambientais dos plantios extensivos de eucalipto ainda são duvidosas, enquanto alguns lhe acusam de empobrecer o solo, destruir as matas nativas, esgotar a água e reduzir a biodiversidade animal e vegetal; outros consideram-no como alternativa para evitar a destruição dos remanescentes de matas nativas. PERELLO apud. VIDOR (2003) demonstrou que os talhões de eucaliptos apresentam diversidade comparável aos fragmentos de mata nativa, especialmente quando associados a sub-bosque.

Com a utilização do sistema de classes de resistência (NBR 7190/97), torna-se possível a disseminação do uso de madeiras de reflorestamento na construção civil. Isto porque anteriormente o projeto indicava uma determinada espécie de madeira; sendo que atualmente a norma prevê a indicação de uma certa classe de resistência para uma determinada aplicação, evitando preconceito e rejeição de espécies reflorestadas.

Segundo SALES (1996), a madeira de eucalipto apresenta menor custo quando disponível em locais próximos aos de sua utilização. Sua extração pode se dar em menor idade relativamente às dicotiledôneas da floresta amazônica, usualmente empregadas no sul e sudeste brasileiros.

2.3 Métodos de avaliação não destrutiva (NDE) em madeiras

Atualmente, a caracterização das propriedades da madeira é feita por meio da avaliação destrutiva de corpos-de-prova amostrados e especificamente preparados para esse fim. Essa prática pode introduzir variabilidade adicional nos resultados

(além da intrínseca do material) devido a fatores como uma amostragem inadequada ou problemas na confecção do corpo-de-prova.

É possível uma caracterização eficaz da madeira por meio de métodos não destrutivos, nos quais não se faz necessária a extração de corpos de prova, uma vez que a avaliação é feita na própria peça ou estrutura. A avaliação não destrutiva é definida como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material sem alterar suas capacidades de uso final, ROSS et al. (1998).

Segundo MACHADO (2000), a maioria dos métodos não destrutivos desenvolvidos têm por objetivo: 1) melhor caracterização do material, sem recorrer a sua destruição (procura crescente de otimização na utilização de recursos naturais, devido a razões ambientais); 2) garantir segurança na atribuição da resistência mecânica, por razões de segurança estrutural; 3) possibilitar a sua utilização em novas situações, como a avaliação do comportamento estrutural de produtos derivados de madeira.

De acordo com ROSS e PELLERIN (1994), uma aplicação potencial é o uso de técnicas não destrutivas para avaliação de madeira em estruturas. Pois a medida que aumenta a quantidade de esforços direcionados ao reparo e reabilitação de estruturas existentes, aumenta a ênfase em avaliações de estruturas *in-situ*, o que por sua vez requer técnicas não destrutivas precisas e rentáveis.

A hipótese fundamental na avaliação não destrutiva da madeira foi estabelecida por JAYNE (1959). Ele propôs que as propriedades de armazenamento e dissipação de energia na madeira, as quais podem ser medidas não destrutivamente por várias técnicas, são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento estático de tal material. Microscopicamente, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a rigidez e resistência. Tais propriedades são observáveis como frequência de oscilação na vibração ou transmissão da velocidade de uma onda ultra-sônica. Reciprocamente, as propriedades de dissipação de energia são controladas pelas características de fricção interna entre elementos anatômicos. Desse modo, as medidas das taxas de deterioração de vibrações livres ou atenuação de ondas ultra-sônicas são usadas para observar a propriedade de dissipação de energia na madeira.

Técnicas não destrutivas para madeira diferem muito daquelas para materiais homogêneos e isotrópicos tais como metais, plásticos, e cerâmicas, nos quais as propriedades mecânicas são conhecidas e rigorosamente controladas nos processos de fabricação. Nesses, a avaliação não destrutiva detecta descontinuidades, vazios ou inclusões. Na madeira, essas irregularidades ocorrem naturalmente e podem ser induzidas por agentes degradantes. Portanto, neste material as técnicas não destrutivas são usadas para avaliar como as irregularidades natural e induzida pelo ambiente interagem numa peça de madeira para avaliar suas propriedades mecânicas, ROSS e PELLERIN (1994).

De acordo com BODIG (2001), o desenvolvimento e pesquisa de avaliação não destrutiva (NDE) podem ter diferentes abordagens dependendo da natureza e geometria do objeto ou produto a ser estudado. Assim, tem-se as seguintes categorias arbitrárias, que representam as maiores diferenças numa abordagem de NDE: as árvores; a madeira sólida (postes e estacas, tábua e madeira serrada); laminados e compósitos de madeira.

Dentre as técnicas de avaliação não destrutivas pode-se citar: a avaliação visual, testes químicos, técnicas de emissão acústica, vibração, emissão ultra-sônica, raios-x, e outras.

Cada uma dessas técnicas não destrutivas apresenta vantagens e desvantagens em seu uso. Logo, para obter uma avaliação precisa de determinadas características do material muitas vezes é necessário o uso de duas ou mais técnicas conjuntamente.

Segundo OLIVEIRA, CAMPOS e SALES (2002), os métodos não destrutivos apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais para caracterização da madeira: possibilidade de avaliar a integridade estrutural de uma peça sem a extração de corpos de prova; maior rapidez para analisar uma grande população e versatilidade para se adequar a uma rotina padronizada numa linha de produção.

De acordo com a NBR 7190/97, no dimensionamento de estruturas de madeira deve-se minorar os valores de resistência e rigidez, o que acaba propiciando um superdimensionamento da estrutura. Porém, conhecendo-se as propriedades

específicas de cada peça, a norma citada permite a adoção de valores maiores de resistência, o que leva a uma melhor adequação do uso da madeira, resultando em estruturas mais seguras e econômicas.

2.4 Ondas ultra-sônicas na madeira

Uma onda de choque em um material provoca um movimento de oscilação nas partículas do mesmo sendo essa perturbação transmitida às partículas vizinhas. Caso a frequência de oscilação seja superior a 20 kHz (20.000 ciclos por segundo) e inferior a 100 MHz classifica-se a onda como ultra-sons.

A propagação de uma onda no interior da madeira é caracterizada por um efeito de diminuição da sua amplitude (atenuação da onda), resultado dos fenômenos de dispersão e absorção.

Quando as vibrações ocorrem no mesmo sentido da propagação da onda, têm-se ondas longitudinais. Se as vibrações ocorrem perpendicularmente à propagação da onda, têm-se ondas transversais ou cisalhantes.

2.4.1 Sistemas de medição

Os métodos de inspeção disponíveis podem ser diferenciados em quatro grupos, dependendo da técnica: 1) eco pulsado; 2) ressonância; 3) transmissão ou sombra e 4) imersão.

Para a técnica do eco pulsado é necessário que apenas uma das superfícies esteja acessível, sendo analisado o fenômeno de reflexão, devida a descontinuidades ou à interface da peça. Geralmente é utilizada uma única sonda (emissora/receptora) ou duas sondas na mesma superfície.

A técnica de ressonância baseia-se na frequência fundamental de vibração da amostra; manifesta-se pelo aumento brusco da amplitude, que ocorre quando o comprimento de onda, ou um múltiplo de meio comprimento, iguala a espessura da peça analisada.

A técnica de transmissão é a mais usada em ensaios de madeira, e utiliza duas sondas (uma transmissora e outra receptora) em duas faces opostas da peça, Figura 2. Esta é a técnica utilizada nos ensaios não-destrutivos neste trabalho.

Figura 2 - Ensaio por ultra-sons, técnica de transmissão. Fonte: ROSS e PELLERIN (1994)

A técnica de imersão é semelhante às técnicas de eco pulsado ou de transmissão, sendo que o que muda é que tanto a sonda quanto a amostra são imersas em água, Figura 3.

Figura 3 - Ensaio por ultra-sons, técnica de transmissão. Fonte: SCHMOLDT et al. (1993).

A grande variabilidade da madeira levou a necessidade de uma caracterização mais detalhada das alterações sofridas pela onda ao passar pelo material. Assim, a técnica da emissão acusto-ultra-sônica (AUS), Figura 4, vem sendo utilizada também para a caracterização de madeira. Essa técnica consiste basicamente de uma estação de aquisição de dados conectada a um osciloscópio, amplificadores e software capaz de processar as características do espectro acusto-ultra-sônico.

Figura 4 - Ensaio por ultra-sons, técnica de transmissão. Fonte: ROSS e PELLERIN (1994).

SANDOZ et al. (2003a) utilizou esta técnica (AUS) em amostras de madeira sólida serrada. A utilização não só do tempo, mas de alguns dados espectrais (pico de voltagem máxima, sinal de energia e função decréscimo) aumentaram a correlação em aproximadamente 25% comparativamente a ensaios mecânicos.

2.4.2 Transdutores

As altas frequências associadas aos ultra-sons podem ser produzidas por vibrações elásticas de um cristal de quartzo induzidas por ressonância com um campo elétrico alternado (efeito piezoelétrico). O transdutor incorpora este elemento piezoelétrico que converte sinais elétricos em vibração mecânica gerando a onda do ultra-som. O efeito inverso é utilizado para detectar as ondas ultra-sônicas que passaram através da amostra.

Durante muito tempo utilizaram-se acoplantes pastosos no contato entre os transdutores e a amostra. Somado ao uso de transdutores de alta frequência houve uma limitação do desempenho deste método em escala industrial, pois a atenuação é proporcional à frequência da onda, BUCUR (1995). Assim, surgiram novos transdutores de baixas frequências.

A Figura 5 apresenta o esquema do transdutor Sylvatest® com oito celas piezoelétricas comprimidas no eixo-X, com a massa de latão e a cabeça do transdutor cônico para o efeito de concentração de energia, SANDOZ (1996).

Figura 5 - Transdutor ultra-sônico de contato pontual. Fonte: SANDOZ (1996).

2.4.3 Velocidade da onda ultra-sônica

A velocidade da onda sonora depende da densidade e constantes elásticas do material, sendo em geral, constante para qualquer frequência e comprimento de onda.

A velocidade de fase é dada por:

$$V = f \cdot \lambda \quad (1)$$

Onde f é a frequência, λ é o comprimento da onda.

Na técnica de transmissão (Figura 2) a contagem de tempo é realizada pelo próprio instrumento de ultra-som. Os tempos registrados são utilizados no cálculo da velocidade de propagação do ultra-som e conseqüentemente da constante elástica C_{LL} , utilizando-se a seguinte equação:

$$C_{LL} = \rho \cdot v^2 \quad (2)$$

onde:

C_{LL} - coeficiente da matriz de rigidez;

ρ - densidade da madeira;

v - velocidade da onda longitudinal.

Várias fontes de erro podem intervir quando se avaliam a velocidade e a atenuação de ondas. Em primeiro lugar estão os erros associados a medições de tempo e distância. Dentro os erros com maior dificuldade de avaliação estão aqueles que se originam da dispersão de velocidade, do contato do transdutor, do cancelamento de fase (resultado da falta de paralelismo dos transdutores), de materiais não homogêneos e da difração, BREAZEALE et al. (1981)

2.4.4 Fatores que influenciam a propagação da onda ultra-sônica

Para o desenvolvimento de estudos envolvendo a aplicação de ondas ultra-sônicas é necessária a consideração de diversas variáveis de significativa influência no mecanismo de propagação de ondas na madeira, principalmente considerando as características microestruturais e a composição química desse material. Torna-se necessário fixar a variabilidade de algumas dessas características de modo a facilitar o entendimento da influência das demais, salientando ainda que estas diferenças podem ser alteradas em função das espécies pertencerem às coníferas ou dicotiledôneas, além das condições de apodrecimento e tratamentos preservativos utilizados na produção das peças. Por esta ótica pode-se afirmar que a velocidade de propagação de onda:

- é maior na direção longitudinal (propagação pelas fibras) do que na direção radial (propagação pelos raios), sendo menor ainda na direção tangencial (propagação

desorientada) BUCUR e BÖHNKE (1994), BUCUR (1995), FENGEL e WEGENER (1984);

- é maior quanto maior for o comprimento das fibras, FENGEL e WEGENER (1984), BODIG e JAYNE (1982);
- é menor quanto maior a porosidade e permeabilidade da parede celular, considerando uma densidade constante na direção considerada, BODIG. e JAYNE (1982), FENGEL (1970);
- é maior quanto maior a densidade, em qualquer das três direções da madeira, considerando um teor de umidade constante ao longo da amostra, BUCUR e BÖHNKE (1994), BUCUR (1995);
- é maior quanto maior a continuidade de regiões cristalinas da parede celular (maior ocorrência de celulose do que lignina e hemicelulose), decrescendo com o aumento de regiões amorfas (maior ocorrência de lignina e hemicelulose do que celulose), BUCUR (1995), KERR e GORING (1975).

BUCUR (1995) analisou a influência da dimensão do corpo-de-prova nas medições com ultra-som em coníferas européias, estudando duas situações distintas: mantendo-se o comprimento constante e variando-se a seção transversal e vice-versa.

Estudo semelhante foi realizado por BARTHOLOMEU et al. (2003) em peças de madeira serrada de tamanho estrutural, demonstrando a viabilidade desta técnica em madeira reflorestada brasileira.

A influência da variabilidade natural das espécies na velocidade pode ser analisada pela escolha de uma frequência da fonte na qual o comprimento de onda no material fique aproximadamente entre a dimensão máxima dos elementos anatômicos e a dimensão mínima da amostra, BUCUR (1995).

A falta de homogeneidade da madeira limita a precisão da técnica do ultra-som. Se uma amostra apresentar fissuras internas, o pulso ultra-sônico será atenuado por difusão nas interfaces, mas se a dimensão da descontinuidade for muito menor que o comprimento de onda, a alteração do pulso será pequena. A intensidade de uma onda ultra-sônica diminui a medida em que se afasta da fonte, sendo a diminuição da amplitude da onda no material denominada atenuação ou decréscimo acústico. As causas dessa diminuição podem ser divididas em duas categorias: fatores geométricos e mecanismos de absorção e difusão.

A atenuação também é provocada pela não homogeneidade estrutural da madeira. Trata-se de um parâmetro sensível às condições higroscópicas e implica na estimativa da porosidade do material.

Em geral, as perdas de amplitude da onda aumentam com a frequência, sendo que a diminuição da velocidade com o aumento da frequência se deve provavelmente ao fato de que o comprimento de onda se torna próximo ao dos elementos anatômicos da madeira. Em testes com este material, frequências maiores que 1 MHz devem ser evitadas porque a atenuação se torna muito elevada, BUCUR (1983).

Existe uma forte relação entre velocidade de propagação de ondas e umidade. A umidade afeta a velocidade de propagação de dois modos: no efeito intrínseco da rigidez e na densidade da madeira. A água livre aumenta a atenuação resultando numa diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial. Os coeficientes de atenuação das ondas estão relacionados com a geometria do campo de radiação e com a dispersão e absorção de energia ultra-sônica pelo sólido, sendo que a menor e a maior atenuações são observadas respectivamente nas direções longitudinal e tangencial, KABIR (1997), BUCUR e FENEY (1992).

A velocidade de propagação das ondas é maior na direção longitudinal devido à orientação das células nesse eixo, propiciando um caminho contínuo para as ondas. As menores velocidades ocorrem na direção tangencial. Quando as ondas viajam através da direção transversal, cruzam a lignina, mais amorfa e inelástica, e assim estão sujeitas a grandes atenuações, OLIVEIRA (2001), BARTHOLOMEU (2001).

A maioria dos trabalhos referidos na literatura utiliza a informação fornecida pela propagação da onda segundo a direção longitudinal (paralela às fibras). Este tipo de ensaio encontra-se na linha dos ensaios destrutivos, em que a caracterização do elemento é realizada de forma global pela pior zona detectada ou existente no mesmo, MACHADO (2000).

O ultra-som possui uma gama de aplicações desde a árvore em pé até os produtos finais da madeira. Assim, quando aplicado longitudinalmente em árvores é possível uma primeira classificação mecânica. Aplicado radialmente o ultra-som pode detectar

defeitos internos. Para SANDOZ (1994), 80% a 90% da qualidade de toras medidas com ultra-som irão ser conservadas na madeira serrada. Logo este tipo de classificação interessa também à indústria de madeira laminada colada e madeira serrada, pois melhora a confiabilidade e o desempenho mecânico das vigas.

O ultra-som aplicado ao eixo radial pode fornecer informações sobre o apodrecimento interno. Num elemento de madeira sã, a velocidade ultra-sônica no eixo radial é aproximadamente constante. Para cada espécie é necessária uma calibração que indica a variação da velocidade em que ela pode ser considerada sã. Assim, quando a velocidade for menor que a esperada, pode ser indício de apodrecimento, Figura 6, SANDOZ (1994).

Figura 6 - Esquema de propagação de onda ultra-sônica em: a) tronco sã; b) tronco deteriorado. Fonte: SANDOZ et al. (2003b)

2.5 Utilização da madeira roliça para fins estruturais

A produção mundial de madeira para fins estruturais encontra-se por volta de 10^9 toneladas ao ano, o que torna este material muito importante no contexto mundial, MACEDO (2000). O Brasil apresenta uma grande disponibilidade de madeira, reservas tropicais e de reflorestamento, que necessitam de exploração adequada.

Postes e estacas conservam a geometria tipicamente circular e cônica de uma árvore, apesar da casca, galhos e raízes terem sido removidas. A variação das características de crescimento (taxa de crescimento, densidade, nós, grã espiralada, fissuras e fendas) ao longo do comprimento e na direção radial gera complexidades na sua própria avaliação. Além disso, postes e estacas são usualmente secos e tratados com preservativos. Enquanto os postes são utilizados com uma porção engastada no solo, as estacas são totalmente enterradas no solo ou ficam submersas na água, BODIG (2001).

A produção de postes de madeira para eletrificação e telefonia é uma das principais aplicações estruturais no país. Em relação aos postes de outros materiais, como o aço e o concreto, os de madeira possuem as seguintes vantagens (REVISTA DA MADEIRA (2001)):

- Atuam como regulador de preço e redutor de custos no mercado nacional;
- São ecológicos: a fabricação de um poste de madeira renovável consome 2.400 kcal de energia, contra 550.000 kcal para o poste de concreto, o qual utiliza matéria não renovável, ferro e cimento;
- Como a madeira possui baixa condutibilidade térmica, os postes apresentam desempenho elétrico e nível de isolamento superiores;
- Por apresentarem menor peso específico, reduzem os custos de transporte e facilitam o manuseio e instalação.

Essas vantagens instigam sua utilização em grande escala em diversos países.

No Brasil, várias concessionárias de energia elétrica continuam utilizando quantidades significativas de postes de madeira, principalmente em áreas rurais. No estado de São Paulo, a companhia ELEKTRO possui aproximadamente 600.000 unidades de postes de madeira preservada na sua rede de distribuição. No Rio Grande do Sul, a Companhia Rio Grande Energia – RGE, possui em torno de 900.000 postes de madeira instalados; segundo VIDOR (2003) a AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S/A possui 758.000 postes de madeira instalados. Estes postes são preparados em usinas, onde recebem tratamento preservativo, com a finalidade de prolongar sua vida útil; porém, ao longo do tempo, essa proteção vai perdendo a sua eficiência tornando-os suscetíveis à ação de agentes externos, SALES (2001), BUENO (2001).

Tais agentes reduzem a resistência mecânica dos postes, principalmente na porção mais crítica, a zona de afloramento. É nesta região de engaste mecânico que se desenvolvem os fungos apodrecedores, pois encontram condições de umidade e taxas de oxigênio ideais. Além da diminuição da confiabilidade do sistema e prejuízos materiais aos consumidores e à sociedade, ocorrências de colapso em postes podem provocar vítimas fatais, motivo pelo qual se torna imprescindível o desenvolvimento de estudos que permitam detectar a resistência mecânica residual e a ação de fungos nestes elementos.

2.5.1 Vantagens na avaliação não-destrutiva de peças roliças

Os valores do módulo de elasticidade obtidos por meio de métodos de ultra-som são usualmente maiores que aqueles encontrados com os ensaios estáticos. De acordo

com HALABE et al. (1995) isto ocorre porque a madeira é um material visco-elástico e altamente absorvente de impacto. Na vibração de um corpo-de-prova de madeira a força de restauração elástica é proporcional ao deslocamento e a força dissipativa é proporcional à velocidade. Portanto, quando a força é aplicada por um curto tempo, o material demonstra um comportamento de sólido elástico, enquanto com aplicações mais longas de força, seu comportamento é igual aquele de um líquido viscoso. Este comportamento é mais evidente em ensaios de flexão estática (de longa duração) que nos ensaios ultra-sônicos. Logo o módulo de elasticidade determinado pelo método de ultra-som é usualmente maior que aquele obtido no ensaio de flexão estática.

Estudo realizado por ROSS et al. (1997) em toras, utilizando o método das ondas de tensão encontraram coeficientes de determinação entre o módulo dinâmico de toras e tábuas variando de 0,17 a 0,50 para valores individuais e 0,33 e 0,82 para valores médios.

Já WANG et al. (2000), utilizando-se do mesmo método das ondas de tensão, avaliaram o módulo de elasticidade dinâmico da árvore (coníferas) com o módulo estático de corpos-de-prova isentos de defeitos e obtiveram coeficientes de correlação de 0,63 a 0,78.

ROSS et al. (2000) investigaram o uso de diversas técnicas não destrutivas para avaliar o módulo de elasticidade dinâmico em toras de pequeno diâmetro. Os resultados desta pesquisa demonstraram fortes correlações entre as propriedades determinadas pelos métodos de emissão acústica e flexão estática, indicando a

eficácia da utilização desta técnica não-destrutiva na avaliação de peças roliças de madeira.

WANG et al. (2002) pesquisaram o efeito do diâmetro das toras na avaliação do MOE pelo método de ondas de tensão. Um total de 201 toras de pequeno diâmetro das espécies jack pine (*Pinus banksiana*), red pine (*Pinus resinosa* Ait.), Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) e ponderosa pine (*Pinus ponderosa*) foram avaliados não-destrutivamente. Os resultados indicaram que o método de ondas de tensão é sensível ao tamanho e às imperfeições geométricas das toras. Concluíram que à medida que o diâmetro das toras aumenta, as diferenças entre os módulos de elasticidade estático (corpo-de-prova de flexão) e dinâmico (tora) também aumentam.

HELLMEISTER (2003) estudando a caracterização mecânica de toras de *Pinus taeda*, obteve boas correlações entre as propriedades determinadas pelo método de ondas de tensão e o módulo de elasticidade (compressão paralela às fibras), tendo obtido coeficiente de determinação $R^2 = 0,57$.

Pesquisas recentes, desenvolvidas por pesquisadores brasileiros, empregando técnicas de ultra-som em madeiras nativas e de reflorestamento, evidenciaram a eficácia deste método na estimativa das propriedades mecânicas da madeira. A validade desta técnica é testada por meio da comparação com resultados obtidos em ensaios destrutivos, os quais forneceram índices de correlação significativos, PUCCINI e GONÇALVES (2000), BARTHOLOMEU e GONÇALVES (2000), PUCCINI et al. (2001), GABRIEL (2000).

CARRASCO (1999) obteve bons resultados utilizando ultra-som (Sylvatest[®]) em madeira de *Eucalyptus grandis*, com um coeficiente de determinação de 0,76 para a regressão entre a resistência à compressão paralela (f_{c0}) e a velocidade.

AGGOUR et al. (1986) obtiveram igualmente bons coeficientes de determinação por meio de análises de regressão múltipla, relacionando a f_{c0} com a densidade e a velocidade de propagação na direção radial de pilares de pontes de madeira.

OLIVEIRA et al. (2002), estudando tábuas de *Pinus taeda* de 5x20x440 cm, encontraram um coeficiente de determinação (R^2) de 0,80, para a regressão linear entre MOE e E_d .

A presença de fungos apodrecedores atenua de maneira significativa a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas. Pesquisas realizadas com peças de madeira das espécies *Douglas-fir* e *White fir* atacadas por fungos apodrecedores comprovaram a atenuação das ondas ultra-sônicas, sendo possível estabelecer relações significativas entre a velocidade da onda e a perda de massa, com coeficientes de determinação (R^2) entre 0,67 e 0,91, BUCUR e FEENEY (1992), WILCOX (1988), ROSS (1999).

A Tabela II apresenta resultados de pesquisas que correlacionaram módulos de elasticidade obtidos em ensaios de flexão estática e ultra-som.

Tabela II - Resultados obtidos com aplicação do ultra-som.

Referência	Espécie	Coefficientes de Determinação e Correlação
BARTHOLOMEU (2001)	Pinus elioti	R = 0,85
	Eucalipto citriodora	R = 0,87
	Cupiúba	R = 0,63
OLIVEIRA (2001)	Eucalipto grandis	R ² = 0,14
	Eucalipto citriodora	R ² = 0,23
	Cupiúba	R ² = 0,63
	Jatobá	R ² = 0,59
MACHADO (2000)	Maritime pine	R = 0,63
CARRASCO e OLIVEIRA (1999)	Maçaranduba, jatobá, eucalipto tereticornis	R ² = 0,56
BARADIT et al. (1998)	Pinus radiata	R = 0,79
WAUBKE apud BARTHOLOMEU (2001)	Fichte	R = 0,84

É neste contexto que se compreendendo a relação entre os fatores que afetam as condições e os parâmetros físicos da técnica de ultra-som, pode-se melhorar seu potencial de aplicação.

Neste sentido, pesquisas que visem o estudo da influência da dimensão dos corpos-de-prova na velocidade de propagação de ondas são de grande valia para o correto emprego da técnica de ultra-som, devido a importância significativa desse parâmetro na variabilidade dos resultados obtidos, conforme evidenciado nesta revisão. Além disso, salienta-se a necessidade de pesquisas referentes à propagação de ondas ultra-sônicas em madeiras de reflorestamento cultivadas no Brasil, pois a maior parte do conhecimento existente nesta área foi desenvolvido com coníferas européias, as quais possuem complexidade anatômica bem diferenciada das essências cultivadas em nosso país.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste item está descrito o método utilizado para a confecção dos corpos-de-prova e o detalhamento dos procedimentos adotados na experimentação.

3.1 Espécie estudada

A espécie estudada foi o eucalipto citriodora. Esta escolha levou em consideração a maior frequência na utilização de dicotiledôneas em postes instalados por concessionárias de energia elétrica no Brasil, SALES (2001).

A espécie e respectiva classe de resistência está a seguir descrita, salientando-se que o enquadramento inicial nas classes de resistência foi efetuado pelos valores médios da resistência à compressão paralela às fibras, conforme anexo E da NBR 7190/97, e dados disponíveis no LaMEM/SET/EESC/USP.

✓ Eucalipto citriodora (*Eucalyptus citriodora*)C-40

3.2 Propriedades físicas e mecânicas

Foram realizados ensaios para avaliação das seguintes propriedades físicas e mecânicas:

- ✓ Densidade aparente a um teor de umidade de 12%: $\rho_{ap,12\%}$ (Kg/m³);
- ✓ Teor de umidade: U (%);
- ✓ Resistência à compressão paralela às fibras: f_{c0} (MPa);

- ✓ Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras: E_{c0} (MPa);
- ✓ Resistência à flexão estáticas MOR, f_M (MPa);
- ✓ Módulo de elasticidade na flexão estática: MOE, E_{M0} (MPa);
- ✓ Coeficiente da matriz de rigidez: C_{LL} (MPa).

Todas as peças passaram por secagem ao ar, sendo que os 25 postes utilizados na experimentação estavam estaleinados há mais de um ano. O controle do teor de umidade dos postes foi realizado retirando corpos-de-prova de cada peça com as dimensões estabelecidas pela NBR 7190/97. Os resultados permitiram atribuir um valor médio de 12% de teor de umidade, sendo que durante a experimentação com toras e postes foram verificados os teores de umidade com equipamento do tipo resistivo conforme descrito no item 3.3.1.

Todos os resultados dos ensaios estáticos realizados nos postes, nas toras e nos corpos-de-prova foram obtidos em MINÁ (2004).

3.2.1 Densidade aparente ($\rho_{ap,12\%}$)

A método utilizado neste ensaio está de acordo com as recomendações da NBR 7190/97, anexo B, na qual os corpos-de-prova devem apresentar forma prismática com seção transversal retangular de 2 cm x 3 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 5 cm. Além disso, na determinação da densidade na condição seca ao ar, o corpo-de-prova deve apresentar teor de umidade de aproximadamente 12%.

3.2.2 Teor de umidade U (%)

Para se conhecer o valor do teor de umidade, foram obtidas as massas inicial (m_i) e seca (m_s) do corpo-de-prova. Os procedimentos para a determinação do valor da massa seca são os mesmos dos utilizados na determinação da densidade, já descritos anteriormente.

3.2.3 Ensaio a compressão paralela às fibras (f_{c0} e E_{c0})

A metodologia utilizada no ensaio de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) está de acordo com as recomendações da NBR 7190/97, anexo B.

Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras.

Seguindo as recomendações da NBR 7190/97, foi possível determinar os valores do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}) da espécie em estudo por meio do ensaio de compressão paralela às fibras, Figura 7.

A determinação da resistência e do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras se faz necessária para possibilitar comparações com valores já obtidos na literatura, de maneira a permitir a verificação da verossimilhança dos resultados,

OLIVEIRA, (2001). Salienta-se a importância da obtenção das relações entre f_{c0} , E_d e E_{c0} em função da atual normalização brasileira NBR 7190/97 utilizar a resistência à compressão paralela às fibras como principal parâmetro na especificação da madeira.

3.2.4 Ensaio a flexão estática (E_{M0} e f_M)

Os ensaios de flexão (E_{M0}) nos corpos-de-prova prismáticos foram feitos de acordo com a NBR 7190/97, anexo B, como ilustra a Figura 8. Todas as peças foram levadas até a ruptura para determinação do módulo de ruptura (f_M).

Figura 8 - Ensaio de flexão estática em corpos-de-prova de 5x5x115cm.

3.3 Método

O trabalho foi desenvolvido em duas fases: a primeira utilizando-se peças roliças e a segunda com corpos-de-prova pequenos e não isentos de defeitos, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema da seqüência das etapas da experimentação.

A primeira fase da experimentação consistiu na realização de ensaio estático e com ultra-som em peças com dimensões estruturais; sendo utilizados 25 postes de eucalipto com aproximadamente 600cm de comprimento. Após a realização desta etapa, deu-se prosseguimento à segunda fase, na qual foram confeccionados 50 corpos-de-prova (dois de cada poste) para ensaio à flexão estática e ultra-som e 200 corpos-de-prova (dois do cerne e dois do alburno retirados do topo e base de cada poste) para ensaio à compressão e ultra-som, nesta fase também foram retirados os corpos-de-prova utilizados na determinação de teor de umidade e densidade.

3.3.1 Primeira Fase

Na primeira etapa foram feitas quatro leituras (duas no cerne e duas no alburno) do tempo de propagação da onda para cada poste (Figura 10), sendo utilizado o equipamento SYLVATEST[®]. O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi calculado a partir da média das leituras e da densidade aparente; conforme Equação 2.

Figura 10 - Ensaio de ultra-som em um poste.

Cada poste foi identificado com um código, de tal modo que o código CP13 se refere ao poste número 13.

Os ensaios de flexão estática foram realizados com um esquema estático simplesmente apoiado, com uma força concentrada aplicada no meio do vão, como apresentado na Figura 11. Com carregamento lento e crescente foram medidas (por meio de anel dinamométrico) duas forças, correspondentes aos deslocamentos verticais de 2cm e de 4cm. Os deslocamentos verticais foram medidos no centro do vão, utilizando um relógio comparador com sensibilidade de centésimo de milímetro. Os postes foram levados à ruptura no ensaio de flexão.

Figura 11 - Ensaio de flexão estática nos postes.

O cálculo do MOE foi feito a partir da aplicação do princípio dos trabalhos virtuais (PTV), por meio do processo da carga unitária, considerando-se cada poste constituído de duas partes tronco-cônicas de comprimentos iguais a $L/2$, conforme descrito em MINÁ et al. (2004).

Foram realizadas nove medidas do diâmetro ao longo de cada poste e posteriormente calculado o diâmetro médio e o diâmetro equivalente, para este último utilizando a metodologia de MINÁ *et al.* (2004).

Nesta fase também foram utilizadas 50 peças roliças de aproximadamente 50cm de comprimento, sendo que 25 retiradas da base e 25 do topo de postes, os diâmetros dessas peças variaram de 23 a 33 centímetros, Figura 12.

Figura 12 - Toras utilizadas na primeira etapa.

A identificação das toras seguiu a numeração do seu respectivo poste de origem, sendo que a codificação para as toras retiradas do CP13 ficaram: B13 e T13, onde B se refere à base e T ao topo do poste.

Com o mesmo equipamento de ultra-som realizaram-se medições do tempo de propagação da onda:

- Na direção longitudinal duas medidas no cerne e duas no alburno (Figura 13a);
- Na direção radial duas medidas ortogonais na seção mediana das toras (Figura 13b).

Figura 13 - Utilização do equipamento de ultra-som nas direções longitudinal (a) e radial (b).

A partir dos valores do tempo de propagação ultra-sônica, calculou-se a velocidade da onda nas direções longitudinal (V_{LL}) e radial (V_{RR}), conforme Equação 3.

$$V = d/t \quad (3)$$

onde:

V – velocidade de propagação da onda (m/s);

d – distância entre os transdutores (m);

t – tempo de propagação da onda (s).

A estimativa da proporção cerne e alburno foi realizada por meio de medições do diâmetro de cerne e alburno das extremidades de cada uma das toras analisadas nesta fase, como pode ser observado na Figuras 14a e 14b.

A partir desses dados estimou-se o volume de cerne e alburno utilizando a mesma metodologia utilizada nos postes e proposta por MINÁ *et al.* (2004). Assim, os 25 postes foram divididos em dois grupos: primeiro grupo com percentagem de cerne menor que 35% do volume total constituído de 9 elementos e o segundo com percentagem de cerne maior que 35% do volume total constituído de 16 elementos.

Figura 14 - Medidas do diâmetro do alburno (a) e do cerne (b).

O equipamento de ultra-som utilizado nas peças roliças foi o SYLVATEST® do Concept Bois, Figura 15. Esse instrumento possui entrada e saída de dados que possibilitam o armazenamento dos dados por meio da utilização de um notebook. É equipado com dois transdutores piezo-eletrônicos (exponenciais) de 22kHz, sendo que um gera a onda (transmissor) e o outro recebe a onda (receptor). Ambos trabalham diretamente em contato com a peça de madeira a ser ensaiada.

Figura 15 - Equipamento de ultra-som SYLVATEST.

Tanto nos postes como nas toras utilizou-se o equipamento Digisystem, medidor de umidade para madeiras modelo DL2000, Figura 16. Este equipamento permite a adequação de trinta e três grupos de espécies de madeira com a variação de temperatura de 0°C a 95°C, possibilitando medições do teor de umidade de 6% a 60%, com resolução de 0,1%. Este procedimento visou verificar se os valores do teor de umidade das peças roliças e corpos-de-prova encontravam-se no intervalo de 12% a 14%.

Figura 16 - Utilização do medidor de umidade nas toras.

3.3.2 Segunda Fase

Para cada corpo-de-prova de 5x5x15cm foram feitas três leituras do tempo de propagação da onda: uma na direção longitudinal e duas na direção transversal. O módulo dinâmico E_d foi calculado a partir da média das três medições e da densidade aparente a um teor de umidade em torno de 12%, conforme a Equação (2).

Nos corpos-de-prova pequenos foi utilizado o aparelho de ultra-som V-METER MARK II, Figura 17. Este é equipado com dois transdutores piezo-eletrônicos (planos), sendo que um gera a onda (transmissores de 54 kHz e 150kHz) e o outro

recebe a onda (receptor de 54 kHz). Por se tratar de transdutores planos, se fez necessário o uso de gel medicinal para conferir contato entre estes e os corpos-de-prova. Este gel permite uma melhor transmissão da onda ultra-sônica na interface, evitando que ocorram interferências no sinal.

Figura 17 - Equipamento de ultra-som V-METER MARK II.

Nos corpos-de-prova de 5x5x115cm foram feitas duas leituras do tempo de propagação da onda na direção transversal e uma leitura na direção longitudinal. Nestes corpos-de-prova foram utilizados os dois equipamentos de ultra-som, SYLVATEST® e V-METER MARK II.

A identificação dos corpos-de-prova para ensaio à compressão paralela às fibras foi realizada simultaneamente à confecção dos mesmos. Dessa forma, o corpo-de-prova identificado com o código B13-A1 possui as seguintes informações:

- T, B - corpo-de-prova retirado do topo ou da base, respectivamente;
- A, C - corpo-de-prova retirado do alburno ou do cerne, respectivamente;
- 1, 2 - corpo-de-prova número 1 ou 2.

Os corpos-de-prova (CPs) para serem ensaiados à flexão também foram identificados. Assim o corpo-de-prova com o código CP13-1 foi retirado do poste 13, e 1 ou 2 o número ao qual pertence.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos na realização dos ensaios físicos, mecânicos e não-destrutivos. Os dados foram calculados e analisados com o auxílio dos softwares Excel e Minitab.

4.1 Diferenciação das propriedades determinadas no cerne e alburno

Nas Tabelas III a IV estão apresentados os valores das propriedades determinadas quando as medidas foram realizadas no cerne e no alburno das peças roliças.

Tabela III - Propriedades determinadas para cerne e alburno, ensaios das peças roliças, seção transversal com cerne menor que 35%.

	$C_{LL, postes}$ (MPa) Alburno	$C_{LL, postes}$ (MPa) Cerne	$C_{LL, toras}$ (MPa) Alburno	$C_{LL, toras}$ (MPa) Cerne
Média	21536	21076	23892	17745
Mínimo	17021	16993	17980	21058
Máximo	27673	26871	29232	21058
CV (%)	17,51	16,56	14,32	13,79
Desvio Padrão	3772	3491	3421	2447

Tabela IV - Propriedades determinadas para cerne e alburno, ensaios das peças roliças, seção transversal com cerne maior que 35%.

	$C_{LL, postes}$ (MPa) Alburno	$C_{LL, postes}$ (MPa) Cerne	$C_{LL, toras}$ (MPa) Alburno	$C_{LL, toras}$ (MPa) Cerne
Média	19817	20388	23292	17640
Mínimo	15325	14793	18902	13500
Máximo	23260	25201	29724	23127
CV (%)	11,61	11,56	13,01	13,67
Desvio Padrão	2301	2367	3031	2411

Nos ensaios com ultra-som realizados nos postes com cerne menor que 35% da seção transversal, o coeficiente da matriz de rigidez obtido no alburno é 2% maior que o C_{LL} obtido no cerne, enquanto nos postes com cerne maior que 35% da seção transversal esta diferença se inverte, ou seja, o C_{LL} obtido no alburno é 3% menor que o C_{LL} obtido no cerne.

Nos ensaios com ultra-som realizados nas toras com cerne menor que 35% da seção transversal, o coeficiente da matriz de rigidez obtido no alburno é 35% maior que o C_{LL} obtido no cerne, e nas toras com cerne maior que 35% da seção transversal esta diferença é de 32%.

4.2 Análise dos dados obtidos na primeira e segunda fase

Nas Tabelas V a VIII, está apresentada a estatística descritiva, com os valores mínimo e máximo, a média e o coeficiente de variação das propriedades determinadas nos ensaios estáticos e dinâmicos para os postes, ensaios dinâmicos para as toras, ensaios estáticos para os corpos-de-prova de 5x5x15cm e ensaios estáticos e dinâmicos para os corpos-de-prova de 5x5x115cm.

Tabela V - Valores médios, mínimo, máximo e coeficientes de variação dos postes.

	ρ (kg/m ³)	Diâmetro (cm)	V_{LL} (m/s)	C_{LL} (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Média	1016	26,5	4477	20457	19116	107
Mínimo	885	23,8	3880	15187	13401	81
Máximo	1085	29,9	5104	27272	25729	134
CV (%)	4,64	5,5	5,92	13,45	17,34	13,68
Desvio Padrão	47	1,5	265	2751	3314	15

Tabela VI - Valores médios, mínimo e máximo e coeficientes de variação das toras.

	ρ (kg/m ³)	V_{LL} (m/s)	C_{LL} (MPa)	V_{RR} (m/s) V-meter 54 kHz
Média	909	4556	20465	2010
Mínimo	741	4091	15556	1862
Máximo	1316	5142	25242	2292
CV (%)	11,24	6,81	13,67	5,08
Desvio Padrão	102	310	2797	102

Tabela VII - Propriedades determinadas no ensaio de compressão paralela às fibras (5x5x15cm).

	$\rho_{(12\%)}$ (kg/m ³)	f_{c0} médio (MPa)	E_{c0} médio (MPa)
Média	892	59	23704
Mínimo	702	52	16626
Máximo	1055	68	30065
CV (%)	9,36	8,55	15,00
Desvio Padrão	84	5	3557

Tabela VIII - Propriedades determinadas no ensaio de flexão estática (5x5x115cm).

	$\rho_{(12\%)}$ (kg/m ³)	f_M (MPa)	E_{M0} (MPa)	C_{LL} (MPa) Sylvatest 22 kHz	C_{LL} (MPa) V-meter 54 kHz	C_{LL} (MPa) V-meter 150 kHz
Média	965	127	20312	21623	25031	22098
Mínimo	855	97	15130	16109	19022	16727
Máximo	1071	162	25021	27234	29156	28560
CV (%)	6,52	12,01	12,19	11,66	9,91	13,20
Desvio Padrão	63	15	2475	2522	2480	2917

O coeficiente de variação (CV) obtido para C_{LL} ficou próximo dos valores encontrados na literatura, BUCUR (1995). Além disso, este valor ficou abaixo do correspondente nos ensaios estáticos. Isto denota a menor variabilidade inerente a esta determinação não-destrutiva em relação aos ensaios estáticos.

Os resultados nos ensaios dinâmicos (C_{LL}) foram de 6,5% a 23% superiores aos ensaios estáticos (MOE). De acordo com BARTHOLOMEU (2001), C_{LL} é em torno de 20% maior que os métodos estáticos quando não se aplica a correção com o coeficiente de Poisson.

No prosseguimento da análise dos resultados foi verificada a existência de relações entre as variáveis em estudo (C_{LL} , MOE e MOR) e os níveis de significância dos parâmetros obtidos. Foram determinados os valores dos coeficientes de determinação (R^2), e a análise de variância para um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Para os casos que apresentaram valores mais significativos de R^2 , foi realizada a análise de resíduos de modo a verificar a validação dos modelos assim obtidos.

4.3 Regressões para C_{LL} , MOE, MOR, f_{c0} , E_{c0} , f_M e E_{M0}

Foram realizadas regressões entre C_{LL} , MOE e MOR, f_{c0} , E_{c0} , f_M e E_{M0} sendo que a análise de resíduos foi feita apenas para as duas regressões que demonstraram valores adequados do coeficiente de correlação R^2 , (C_{LL} versus MOE e C_{LL} versus MOR).

Desta maneira obteve-se os valores apresentados nas tabelas IX e X, as quais sintetizam os valores das análises de variância obtidos para todas as regressões realizadas.

Tabela IX - Valores das análises de variância obtidas para as regressões realizadas com entre C_{LL} , MOE e MOR, f_{c0} , E_{c0} , f_M e E_{M0} para os postes e toras com seção transversal com cerne menor que 35%.

Regressão	r^2	t_{dados}	t_{05}	F_{dados}	F_{05}
C_{LL} x MOE (postes)	0,83	5,75	1,86	33,11	4,46
C_{LL} x MOR (postes)	0,74	4,42	1,86	19,51	4,46
C_{LL} (toras) x MOE (postes)	0,77	4,78	1,86	22,84	4,46
C_{LL} (toras) x MOR (postes)	0,86	6,58	1,86	43,36	4,46
C_{LL} (toras) x E_{c0} (cps)	0,62	3,38	1,86	11,41	4,46
C_{LL} (toras) x f_{c0} (cps)	0,56	3,00	1,86	9,00	4,46
C_{LL} (toras) x E_{M0} (cps)	0,48	2,53	1,86	6,39	4,46
C_{LL} (toras) x f_M (cps)	0,45	2,40	1,86	5,74	4,46
C_{LL} (postes) x E_{c0} (cps)	0,51	2,68	1,86	7,22	4,46
C_{LL} (postes) x f_{c0} (cps)	0,35	1,96	1,86	3,83	4,46
C_{LL} (postes) x E_{M0} (cps)	0,49	2,61	1,86	6,80	4,46
C_{LL} (postes) x f_M (cps)	0,14	1,06	1,86	1,12	4,46

Tabela X - Valores das análises de variância obtidas para as regressões realizadas com entre C_{LL} , MOE e MOR, f_{c0} , E_{c0} , f_M e E_{M0} para os postes e toras com seção transversal com cerne maior que 35%.

Regressão	r^2	t_{dados}	t_{05}	F_{dados}	F_{05}
C_{LL} x MOE (postes)	0,48	3,60	1,75	12,93	3,68
C_{LL} x MOR (postes)	0,49	3,63	1,75	13,19	3,68
C_{LL} (toras) x MOE (postes)	0,35	2,74	1,75	7,52	3,68
C_{LL} (toras) x MOR (postes)	0,32	2,54	1,75	6,47	3,68
C_{LL} (toras) x E_{c0} (cps)	0,41	3,13	1,75	9,78	3,68
C_{LL} (toras) x f_{c0} (cps)	0,28	2,31	1,75	5,32	3,68
C_{LL} (toras) x E_{M0} (cps)	0,48	3,57	1,75	12,73	3,68
C_{LL} (toras) x f_M (cps)	0,33	2,61	1,75	6,78	3,68
C_{LL} (postes) x E_{c0} (cps)	0,54	4,07	1,75	16,54	3,68
C_{LL} (postes) x f_{c0} (cps)	0,36	2,83	1,75	8,00	3,68
C_{LL} (postes) x E_{M0} (cps)	0,33	2,61	1,75	6,81	3,68
C_{LL} (postes) x f_M (cps)	0,36	2,81	1,75	7,87	3,68

De maneira geral, a magnitude dos valores dos coeficientes de determinação obtidos pode ser explicada em função da utilização de corpos-de-prova de diferentes regiões do poste (base e topo) com diferentes dimensões, peças de dimensões estruturais (6 metros de comprimento) até peças pequenas. Também não houve nenhuma classificação visual, ou seja, foram ensaiados corpos-de-prova com defeitos.

A análise estatística do grupo de postes com cerne menor que 35% da seção transversal revelou melhores coeficientes de determinação entre o ensaio com ultrassom (C_{LL}) e o ensaio a flexão estática (MOE e MOR), do que com o grupo de postes com cerne maior que 35% da seção transversal.

Esta diferença parece estar relacionada com a geometria do poste (cilíndrica), sendo que no ensaio estático a parte que resiste mais às forças aplicadas é o elemento mais externo, ou seja, o alburno.

As análises anteriores permitiram construir os seguintes quadros resumo, Tabelas XI e XII com os coeficientes de determinação (R^2).

Tabela XI - Quadro resumo dos coeficientes de determinação obtidos entre os valores dos ensaios de rigidez e de resistência para os postes com seção transversal com cerne menor que 35%.

	MOE	E_{c0}		MOR	f_{c0}
E_{c0}	0,65	-	f_{c0}	0,74	-
E_{M0}	0,28	0,40	f_M	0,43	0,66

Tabela XII - Quadro resumo dos coeficientes de determinação obtidos entre os valores dos ensaios de rigidez e de resistência para os postes com seção transversal com cerne maior que 35%.

	MOE	E_{c0}		MOR	f_{c0}
E_{c0}	0,38	-	f_{c0}	0,30	-
E_{M0}	0,37	0,38	f_M	0,31	0,47

Para os postes com seção transversal menor que 35% de cerne, observa-se que os coeficientes determinados no ensaio a compressão paralela às fibras estão estatisticamente mais próximo da rigidez e resistência determinados no ensaio a flexão dos postes, do que este com o ensaio a flexão dos corpos-de-prova. Para os postes com seção transversal maior que 35% de cerne, este comportamento não é verificado.

Nas Tabelas XIII e XIV são apresentados quadros resumo com os coeficientes de determinação obtidos entre as três variáveis dinâmicas e as seis variáveis estáticas.

Tabela XIII - Quadro resumo dos coeficientes de determinação obtidos entre os valores dos ensaios não-destrutivo e ensaios estáticos para postes com cerne menor que 35%.

	MOE	MOR	E_{c0}	f_{c0}	E_{M0}	f_M
$C_{LL, postes}$	0,83	0,74	0,51	0,35	0,49	0,14
$C_{LL, toras}$	0,77	0,86	0,62	0,56	0,48	0,45
$C_{LL, flexão}$	0,58	0,72	0,55	0,48	0,69	0,42

Tabela XIV - Quadro resumo dos coeficientes de determinação obtidos entre os valores dos ensaios não-destrutivo e ensaios estáticos para postes com cerne maior que 35%.

	MOE	MOR	E_{c0}	f_{c0}	E_{M0}	f_M
$C_{LL, \text{postes}}$	0,48	0,49	0,54	0,36	0,33	0,36
$C_{LL, \text{toras}}$	0,35	0,32	0,41	0,28	0,48	0,33
$C_{LL, \text{flexão}}$	0,43	0,30	0,34	0,13	0,66	0,40

Como se verifica pela comparação da Tabela XIII com a Tabela II, os coeficientes de determinação estão na mesma magnitude dos valores citados na literatura. Pode-se também observar que as regressões feitas nos corpos-de-prova com o ensaio de ultrassom aplicado nestas mesmas peças foram bem superiores àquelas regressões entre ensaios de corpos-de-prova diferentes.

Na comparação entre as Tabelas XIII e XIV, observa-se que os coeficientes de determinação dos postes com seção transversal menor que 35% de cerne foram bem superiores ao outro conjunto de postes, seção transversal maior que 35% de cerne.

A seguir estão apresentadas as análises de variância e resíduos para as duas relações C_{LL} versus MOE e C_{LL} versus MOR que apresentaram melhores valores de R^2 .

4.3.1 Análise para C_{LL} versus MOE

Na Figura 18 está apresentada a correlação linear simples entre C_{LL} e MOE, com o respectivo valor do coeficiente de determinação (R^2) para os postes ensaiados, sendo que o maior valor de R^2 foi obtido para os postes com cerne menor do que 35% da seção transversal.

Figura 18 - C_{LL} versus MOE.

Para o conjunto formado pelos dados referentes aos postes (C_{LL} x MOE) foi possível obter os valores apresentados na Tabela XV, destacando-se que o valor da variável de teste $F_{\text{dados}} = 33,11$ é superior ao valor crítico $F_{05} = 4,46$, evidenciando estatisticamente a existência de dependência linear ao nível de $\alpha=5\%$. Os parâmetros estimados para a regressão linear apresentam magnitude superior ao valor crítico $t_{05}=1,86$ ($t_{\text{dados}}=5,75$) representando significância estatística com um coeficiente de determinação $R^2=0,83$.

Tabela XV - Quadro de Análise de Variância para os dados de C_{LL} e MOE (postes).

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{dados}	F_{05}
Devido à Regressão	93622847	1	93622847	33,11	4,46
Residual	19792184	7	2827455		
Total	113415030	8			

No prosseguimento da análise e validação estatística, verificou-se que os resíduos apresentaram uma distribuição aleatória em torno do zero, indicando que os modelos

lineares foram satisfatórios para a análise dos dados, conforme pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Resíduos pelos valores da regressão entre C_{LL} versus MOE postes.

Deste modo, a distribuição normal de frequência para os resíduos foi constatada para os dados analisados. A retirada de pontos com resíduos elevados conduziram a resultados semelhantes para a constatação da normalidade dos resíduos, e sem a ocorrência de aumento significativo nos valores de R^2 e na F, indicando assim a adequação dos modelos às variáveis estudadas.

4.3.2 Análise para C_{LL} versus MOR

Na Figura 20 está apresentada a correlação linear simples entre C_{LL} e MOR, com o respectivo valor do coeficiente de determinação (R^2) para os postes ensaiados, sendo que o maior valor de R^2 foi obtido para os postes com cerne menor do que 35% da seção transversal.

Figura 20 - C_{LL} versus MOR.

Para o conjunto formado pelos dados referentes aos postes (C_{LL} x MOR) foi possível obter os valores apresentados na Tabela XVI, destacando-se que o valor da variável de teste $F_{\text{dados}} = 19,51$ é superior ao valor crítico $F_{05} = 4,46$, evidenciando estatisticamente a existência de dependência linear ao nível de $\alpha = 5\%$. Os parâmetros estimados para a regressão linear apresentam magnitude superior ao valor crítico $t_{05} = 1,86$ ($t_{\text{dados}} = 4,42$) representando significância estatística com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,74$.

Tabela XVI - Quadro de Análise de Variância para os dados de C_{LL} e MOR (postes).

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{dados}	F_{05}
Devido à Regressão	871	1	871	19,51	4,46
Residual	313	7	45		
Total	1184	8			

No prosseguimento da análise e validação estatística, verificou-se que os resíduos apresentaram uma distribuição aleatória em torno do zero, indicando que os modelos lineares foram satisfatórios para a análise dos dados, conforme pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Resíduos pelos valores da regressão entre C_{LL} versus MOR postes.

Deste modo, a distribuição normal de frequência para os resíduos foi constatada para os dados analisados. A retirada de pontos com resíduos elevados conduziram a resultados semelhantes para a constatação da normalidade dos resíduos, e sem a ocorrência de aumento significativo nos valores de R^2 e na F, indicando assim a adequação dos modelos às variáveis estudadas.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na experimentação permitem afirmar que existe uma boa relação entre as propriedades determinadas por emissão ultra-sônica e a flexão estática, para os postes com seção transversal menor que 35% de cerne, o que indica que esta técnica de avaliação não destrutiva pode ser usada para avaliar o módulo de flexão estática de postes de madeira com relativa confiabilidade. Como observado na literatura, o módulo de elasticidade determinado pelo método de ultra-som foi de 6,5% a 23% maior que aquele obtido no ensaio de flexão estática.

Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) estão compatíveis com os usualmente encontrados na literatura, e são considerados altamente satisfatórios para um material de origem natural e anisotrópico como a madeira, salientado-se que foram utilizadas amostras com dimensão estrutural, as quais estão naturalmente afetadas por defeitos internos não mensuráveis. O valor mais baixo de R^2 obtido para a relação E_d versus MOR pode ser atribuído às dificuldades inerentes ao estabelecimento de correlações entre propriedades de resistência e elasticidade, dificuldades estas também presentes nos ensaios destrutivos.

O diâmetro possui um efeito significativo na propagação de ondas ultra-sônicas em postes de madeira. Os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico se afastam do módulo estático progressivamente com o aumento do diâmetro do poste.

Sugere-se como pesquisas de continuidade a análise da consistência da aplicação da técnica de ultra-som em peças roliças degradadas. A observação da razão d/λ permite identificar as velocidades afetadas pela deterioração, aliada a uma melhor acuracidade deste método. Também na continuidade seria fundamental a realização de ensaios acusto-ultrasônicos, os quais fornecem um conjunto de dados (assinatura da onda) bem maiores sobre as características do material testado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGGOUR, M.S.; HACHICHI, A.; MAYER, M.A. (1986). **Nondestructive evaluation of timber bridge piles**. In: Evaluation and upgrading of wood structures: case studies. New York: Vijay Gopu, p. 82-95.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro.
- BARADIT, E.; ROZAS, C.; VARGAS, G. (1998) Aplicacion de ultrasonido em la evaluacion de madera de pinus radiata. **Maderas: Ciência y Tecnologia**. V. 1, p. 27-33.
- BARBOSA, J. C.; INO, A. (2000). Cadeia produtiva de habitação em madeira de reflorestamento – análise do ciclo de vida (lca) e indicadores de sustentabilidade. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6. São Carlos. **Anais**. São Carlos. Cd rom, arquivo digital.
- BARTHOLOMEU, A. (2001). **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som**. Campinas, 73 p. Tese (Doutorado) – UNICAMP.
- BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R. (2000). O uso do ultra-som na determinação de constante elástica da madeira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 19. São Paulo. **Anais**, Cd-rom, arquivo digital.
- BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R.; BUCUR, V. (2003). Dispersão de ondas de ultra-som em peças de madeira serrada de Eucalyptus em função da geometria. **Scientia Forestalis**, n. 63, p. 235-240, jun.
- BIRKS, A. S., ed. (1991). Nondestructive Testing Handbook – Ultrasonic Testing. ASNT, v.7, 893p.
- BODIG, J. (2001). The process of NDE research for wood and wood composites. In: 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, **Proceedings**, v. 6 no 03.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. (1982). **Mechanics of wood and wood composites**. New York, Van Nostrand Reinhold.

- BREAZEALE, M. A.; CANTRELL Jr., J. H.; HEYMAN, J. S. (1981) Ultrasonic wave velocity and attenuation measurements. In: MARTON, L.; MARTON, C. **Methods of Experimental Physics**, Califórnia: Academic Press, v. 19, p. 68
- BUCUR, V. (1983). An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. **Ultrasonics**. v. 21, n. 3, p.116-126.
- BUCUR, V. (1995). **Acoustics of wood**. New York, CRC Press Inc.
- BUCUR, V.; BÖHNKE, I. (1994). Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. **Ultrasonics**, v. 32, n. 5, p.385-390.
- BUCUR, V.; FEENEY, F. (1992). Attenuation of ultrasound in solid wood. **Ultrasonics**, v. 30, n.2, p.76-81.
- BUENO, O. C. (2001). Controle biorracional de cupins em postes de madeira. In: CITENEL-CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 1. Brasília. **Anais**, Cd-rom, arquivo digital.
- CAMPOS, J. A. O. (2002). **Método para avaliação da durabilidade e da reabilitação da madeira de estruturas em serviço**. São Carlos, 99 p. Dissertação (Mestrado) – EESC, USP.
- CARRASCO, E. V. M.; OLIVEIRA, S. V. (1999) Evaluation of eucalyptus mechanical properties by ultrasound (NDT) In: Rilem Symposium on Timber Engineering. **Proceedings**, Estocolmo, V. 1. p.732–738.
- CARRASCO, M.E.V. (1999). Evaluation of eucalyptus' mechanical properties by ultrasounds. In: 1st Rilem Symposium on Timber Engineering. **Proceedings**, Estocolmo: RILEM Publications sarl, p. 813-821.
- FENGEL, D. (1970). **Wood Science and Technology**. v.4, p. 15-35.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. (1984). **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin, Walter de Gruyter, 613 p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY, (1999). **Wood Handbook – Wood as an Engineering Material**. Gen. Tech. Rep. FPL – GTR – 113. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products. 463 p.
- GABRIEL, M. S. C. (2000). **O uso do método das ondas de tensão na qualificação mecânica da madeira serra de Pinus taeda L.** Botucatu. 75p. Dissertação (Mestrado) – UNESP.
- HALABE, U. B.; BIDIGALU, G. M.; GANGARAO, H. V. S.; ROSS, R. J. (1995). Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. **Materials Evaluation**. Setembro. p.1013-1018.

- HELLMEISTER, L. A. V. (2003). **Aplicação do método de ondas de tensão na caracterização mecânica de toras, pranchas e tábuas de *Pinus taeda* L.** Botucatu. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP.
- JAYNE, B. A. (1959). Vibrational properties of wood as indices of quality. **Forest Products Journal**. v. 9, n. 11, p. 413-416.
- KABIR, M. F. et al. (1997). Effect of moisture content and grain angle on the ultrasonic properties of rubber wood. **Holzforschung**. v. 51, n.3, p.263-267.
- KERR, A. J.; GORING, D. A. I. (1975). **Cell Chemistry and Technology**. v.9, p. 563-573.
- KOLLMANN, F. E. P.; COTÊ, W. A. (1968). **Principles of wood science and technology**. New York, Springer-Verlag. v.1.
- MACEDO, A. N. (2000) **Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada**. São Carlos, 2000. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 195p.
- MACHADO, J. M. S. R. S., (2000) **Avaliação da variação das propriedades mecânicas de pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.) por meio de ultra-sons**. 265 p. Dissertação (Doutorado) – Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Portugal.
- MATOS, J. L. M. (1997). **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** Curitiba, 117p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Paraná.
- MINÁ, A. J. S. (2004) **Estudo de estacas de madeira para fundações de pontes de madeira**. São Carlos. (Texto de Qualificação de Tese de Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- MINÁ, A. J. S.; OLIVEIRA, F. G. R.; CALIL JUNIOR, C.; DIAS, A. A.; SALES, A. (2004) Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. **Scientia Forestalis**, Piracicaba n. 65, p. 188-196, jun. ISSN 1413-9324.
- OLIVEIRA, F. G. R. (2001). **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de ultra-som**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – EESC, USP.
- OLIVEIRA, F. G. R.; CAMPOS, J. A. O.; PLETZ, E.; SALES, A. (2002) Nondestructive evaluation of wood using ultrasonic technique. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, Universidad del Bío-Bío, vol.4, no. 2, p. 133-139.
- OLIVEIRA, F. G. R.; CAMPOS, J. A. O.; SALES, A. (2002). Evaluation of Mechanical Properties of Wood using ultrasonic measurements In. World Conference on Timber Engineering, WCTE'2002, Shad Alam, Malaysia **The Proceedings of 7 WCTE 2002**, v. 4, n. , p. 110-117.

- OLIVEIRA, J. T. S. (1997). **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. São Paulo, 414 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, USP.
- PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. (2000) Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas Documentos**, v. 38 113p
- PUCCINI, C. T.; BALLARIN, A. W.; GONÇALVES, R. (2001). Dispersão de ondas de ultra-som em peças de madeira serrada de pinho do paran em funo do comprimento. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NO-DESTRUTIVOS, 20. So Paulo. **Anais**, Cd-rom, arquivo digital.
- PUCCINI, C.T.; GONÇALVES, R. (2000). Uso do ultra-som na avaliao da qualidade da madeira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NO DESTRUTIVOS, 19. So Paulo. **Anais**, Cd-rom, arquivo digital.
- REVISTA DA MADEIRA (2001). A madeira de Eucalipto para postes, Revista da Madeira, **Ed. Especial – Eucalipto**.
- ROSS, R. J. (1999). Using sound to evaluate standing timber. **Forest Products Journal**. Review. P. 43-44.
- ROSS, R. J. et al. (1998). Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**. v. 48, n.1, p. 14-19.
- ROSS, R. J.; WANG, X.; MATTSON, J. A.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; GESKE, E. A.; WEHR, M. A. (2000), Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small diameter logs. In: **12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**. Sopron, p.155-163.
- ROSS, R.J.; McDONAL, K.A.; GREEN, D.W.; SCHAD, K.C. (1997). Relationship between log and lumber modulus of elasticity. **Forest Products Journal**, Madison, v. 47, n.2, p. 82-92, feb.
- ROSS, R.J.; PELLERIN, R.F. (1994) Nondestructive testing for assessing wood members in structures – A review. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–70. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 40 p.
- SALES, A. (1996). **Proposio de classes de resistncia para madeira**. So Paulo. 223p. Tese (Doutorado) - Escola Polcnica, USP.
- SALES, A. (2001). **Estudo da durabilidade de madeiras empregadas em linhas de distribuio de energia eltrica por meio de mtodos no destrutivos**. Projeto de pesquisa em andamento. CNPq modalidade auxlio pesquisa – Edital Universal, demanda 05/2001. Processo nmero 477848/01.
- SANDOZ, J. (1994). Ultrasound applications to structural timber. In: Pacific Timber Engineering Conference – PTEC’94, Gold Coast, Australia, **Anais**, p. 740-744.

- SANDOZ, J. (1996). Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications. In: 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne CH., **Anais**, vol.1, n. 12.
- SANDOZ, J. (2003). **Forest, timber and environment**. URL http://www.cbs-cbt.com/SERVICES/PUB/doc/environmental_context.pdf
- SANDOZ, J.; BENOIT, Y.; DEMAY, L. (2003a). **Wood testing using Acusto-ultrasônico**. URL <http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/7-5-5.pdf>
- SANDOZ, J.; BENOIT, Y.; DEMAY, L. (2003b). **Standig tree quality assessments using acusto-ultrasonic**. URL http://www.cbs-cbt.com/SERVICES/PUB/doc/testing_of_standing_trees
- SBS – ABRACAVE (2001) URL <http://www.abracave.com.br>.
- SCALLAN, A. M. (1974). **Wood Science**. v.6, p. 266-271.
- SCHMOLDT, D. L.; DUKE JR., J. C.; MORRONE, M.; JENNINGS; C. M. (1993) Application of ultrasound nondestructive evaluation to grading pallet parts. Proceedings of the 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, **Proceedings**, Madison, Wisconsin, U.S.A., p. 183-190, 22-24, set.
- SILVA, J. C. (2003). **Vantagens comparativas e competitivas da madeira de eucalipto** Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, e-mail: jcastro@ufv.br
- VIDOR, F. L. R. (2003). **Avaliação de processos de inspeção e retratamento de postes de madeira**. Porto Alegre. Dissertação (mestrado), PGTEMA/PUCRS.
- WANG, X.; ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; PELLERIN, R. (2002). Diameter effect on stress-wave evaluation of modulus of elasticity of logs. In: **13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**. Berkeley, California. p.149-156.
- WANG, X.; ROSS, R.J.; ERICKSON, J.R.; FORSMAN, J.W.; McCLELLAN, M.; BARBOUR, R.J.; PELLERIN, R. (2000). In: 12th International Symposium on Nondescrutive Testing of Wood. **Proceedings**, Sopron, Hungary, p. 197-206.
- WILCOX, W. W. (1988). Detection of early stages of wood decay with ultrasonic pulse velocity. Univ. of California, Richmond. **Forest Prod. J.** 38(5): 68-73.