



FERNANDO AUGUSTO FRANCO BATISTA

**“DIFERENCIAÇÃO DE CLONES DE EUCALIPTO
UTILIZANDO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM
ÁRVORES”**

CAMPINAS
AGOSTO 2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

FERNANDO AUGUSTO FRANCO BATISTA

**“DIFERENCIAÇÃO DE CLONES DE EUCALIPTO
UTILIZANDO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM
ÁRVORES”**

FERNANDO AUGUSTO FRANCO BATISTA

Orientadora: Raquel Gonçalves

Co-orientadora: Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de mestre em engenharia Agrícola.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO FERNANDO AUGUSTO FRANCO BATISTA
E ORIENTADA PELA PROFª.DRA. RAQUEL GONÇALVES.

Assinatura do Orientador

CAMPINAS
AGOSTO 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA

Errata- onde se lê: "...obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola."

Leia-se: "...obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola, na área de concentração Construções Rurais e Ambiente."

Prof. Dr. ZÉNON MENEZES DE SOUZA
Matrícula 28041-2
Coordenador de Pós-Graduação
FEAGRI/UNICAMP

BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

B32d Batista, Fernando Augusto Franco
Diferenciação de clones de eucalipto utilizando
ensaio de propagação de ondas em árvores / Fernando
Augusto Franco Batista. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Raquel Gonçalves
Coorientador: Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira .
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Ultrassom. 2. Floresta. 3. Rigidez. 4.
Elasticidade. I. Gonçalves, Raquel, 1961-. II. Ferreira,
Gisleiva Cristina dos Santos. III. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV.
Título.

Título em Inglês: Differentiation of clones of eucalyptus using wave
propagation test

Palavras-chave em Inglês: Ultrasound, Florest, Rigidity, Elasticity

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiência.

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Cláudio Henrique Soares Del Manuzzi, Julio Soriano

Data da defesa: 29-08-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Fernando Augusto Franco Batista**, aprovada pela Comissão Julgadora em 29 de agosto de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI



Prof. Dra. Raquel Gonçalves – Presidenta e Orientadora
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi – Membro Titular
UnB

Faculdade de Engenharia Agrícola
Unicamp



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

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Fernando e Maria, pelo apoio durante esse percurso.

Ao meu irmão, Cezar, pelos conselhos.

À Chiara, pela dedicação e companheirismo.

À Eduardo e Mayumi, pelos sorrisos e brincadeiras.

AGRADECIMENTOS

À Prof^ª. Dr^ª. Raquel Gonçalves, pela dedicação, incentivo, paciência, por não desistir, pelos ensinamentos e principalmente pelos momentos de alegrias vividos durante esse período.

À Prof^ª Dr^ª. Gisleiva Ferreira, pelo apoio nos momentos difíceis, pelas horas de conforto pelas críticas e ensinamentos que foram muito além do mestrado.

Aos Professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, da UNICAMP, que de forma direta, ou indireta contribuíram para a realização desta pesquisa.

À empresa International Paper do Brasil por ceder a matéria prima, tempo e funcionários para o apoio da coleta de dados em campo.

Aos Membros do laboratório de Ensaaios Não destrutivos – LabEND, pela participação e ajuda durante os ensaios, sem os quais essa pesquisa não poderia ter sido realizada, e principalmente pelos momentos de descontração e risadas.

EPÍGRAFE

*“Muitos, com a ambição de acertar no centro, erram o alvo.”
(Fernando de Rojas)*

RESUMO

Métodos acústicos têm sido utilizados, com eficiência, em determinações de características físicas, de rigidez e de resistência de peças de madeira. Mais recentemente essa tecnologia tem sido aplicada diretamente em árvores, visando a detecção de ocos ou regiões deterioradas e, também, a antecipação do conhecimento de propriedades de resistência e de rigidez da madeira a ser obtido à partir da árvore inspecionada. Dessa forma, o ultrassom está se configurando como ferramenta de grande potencial para avaliações florestais. Atualmente a produção de eucalipto para a indústria de papel e celulose é baseada na produção de clones, os quais são obtidos pelo cruzamento de espécies com características desejáveis pelo setor, tais como crescimento rápido, resistência a doenças, maior produtividade, maior densidade, dentre outras. No entanto, muitas vezes clones considerados de grande potencial têm apresentado problemas graves de encurvamento e quebras, ocasionados principalmente pela ação de ventos. Esse problema tem sido apontado como bastante grave, pois vem afetando, sistematicamente, a produtividade das florestas e ocasionando grandes perdas. No caso de clones que não quebram, mas que apresentam grandes encurvamentos, o crescimento é prejudicado, ocasionando perdas de produtividade. No caso de clones que sofrem quebras os prejuízos são ainda maiores, pois muitas vezes todo o talhão precisa ser retirado, já que o custo para retirar apenas as árvores quebradas não é compensador. Considerando a premissa de que a rigidez é uma das principais responsáveis pela resistência dos clones ao vento, o objetivo principal dessa pesquisa foi verificar a viabilidade do uso da técnica de ultrassom para separar, dentro de um grupo amostral, os clones por rigidez. Os resultados mostraram que a velocidade de propagação de ondas de ultrassom obtida diretamente nas árvores, apresentou correlações significativas com a rigidez obtida em ensaio de flexão que simulou a ação do vento. Essa velocidade também permitiu diferenciar, estatisticamente, os clones e essa diferenciação foi compatível com a obtida utilizando a rigidez dessas mesmas árvores, comprovando a hipótese da pesquisa.

Palavras chave: módulo de elasticidade, flexão estática, propagação de ondas.

ABSTRACT

Acoustic methods have been used, with efficiency, for obtain stiffness properties of the wood. Nowadays this technology has been used in live trees for detection of holes or declines and also to anticipate the knowledge about the stiffness and strength of wood obtained from the inspected tree. So, the ultrasound became a potential tool in forestry evaluations. Currently the Eucalyptus productions for pulp and paper is based on clones, that are produced by crossing species with required properties, as the fast growing , the strength to diseases, the productivity, the density and so on. However, frequently the clones considered with great potential present important problems in bending and breaking, mainly motivated by winds. This question has been considered as very grave problem, because it has been affecting, systematically, the forestry productivity and so, increased losses. In the case of the clones that not broke, but present great bending, the growing is affected, and so there is the productivity decrease. In the case of the clones that break, losses are also greats, because sometimes all area needs to be removed, because the costs to remove only the broken trees not pay. Considering the premise that the stiffness is the most responsible for the strength of the tree to resist the wind, the mainly objective of this research was to verify the viability of the use of the ultrasound technology to separate, into a sample, the clones by stiffness. The results showed that the ultrasonic velocity obtained from the live tree presented correlations statistically significant with stiffness obtained in bending test simulating the wind action. This velocity was able also to statistically distinguish the different clones and this distinguish was compatible with the obtained using the stiffness, demonstrating the hypothesis of the research.

Keywords: modulus of elasticity, static bending, wave propagation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1. Teste de resistência por ancoragem. Fonte: Ferreira <i>et al.</i> , 2010	6
Figura 2. 2 Padrões de danos em florestas devido ao vento. Fonte: Cenibra (2002) apud Melo (2006).	7
Figura 2.3. Exemplos de florestas da International Paper com danos (encurvamentos e quebras) devidos a vento.	8
Figura 2. 4. (a) Realização do ensaio de stress wave na árvore viva. (b) Padrão de retirada de corpos de prova na tora. Fonte: Adaptado de Wang <i>et al</i> (2000).....	10
Figura 2. 5. Metodologia de ensaios com aplicações na árvore viva e na tora. Fonte: Adaptado de Wang <i>et al</i> 2002.....	11
Figura 2. 6. Esquema de retirada de corpos-de-prova das toras. Fonte: Adaptado de Auty e Achim (2010).	14
Figura 3. 1. Equipamento de ultrassom (USLab, AGRICEF, Brasil) e transdutores (exponenciais de 45 kHz) utilizados nos ensaios nas árvores	17
Figura 3. 2. Esquema de ensaio utilizado para a determinação do módulo de elasticidade e de ruptura das árvores no Laboratório de Materiais e Estruturas (LME) da FEAGRI/UNICAMP	18
Figura 3. 3. Unidade hidrostática.	18
Figura 3. 4. Célula de carga, U10m de 50 kN utilizada para a medição da força de tração na árvore.....	19
Figura 3. 5. Sistema de roldanas	19
Figura 3. 6. Sistema de aquisição de dados HBM spider8.	20
Figura 3. 7. Transdutores de deslocamento linear de 300 mm (a) e transdutores de deslocamento linear de 450 mm (b).	21
Figura 3. 8. Pórtico de ensaios, capacidade de aplicação de carga de 500 kN.	21
Figura 3. 9. Esquema do ensaio com ondas se propagando na direção longitudinal.....	22
Figura 3. 10. Ensaio na árvore viva com ondas se propagando na direção longitudinal.	23
Figura 3. 11. Árvores em laboratório, sem copa e sem galhos.	24
Figura 3. 12. Esquema do ensaio de flexão na árvore.	25

Figura 3. 13. Esquema de retirada das toras à partir do fuste das árvores (a) e ensaio da tora no pórtico do LME (b).....	27
Figura 4. 1 Gráfico de Box and Whisker para o módulo de elasticidade (a) e para a resistência em flexão (b) calculados com o diâmetro equivalente e com o diâmetro médio.	30
Figura 4. 2 Velocidade de ultrassom média na árvore $m.s^{-1}$	40

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	12
Equação 2.....	13
Equação 3.....	13
Equação 4.....	13
Equação 5.....	17
Equação 6.....	25
Equação 7.....	25
Equação 8.....	26
Equação 9.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 4. 1. Resultados médios para cada clone, de velocidade média ($V_{L\text{méd}}$) e de velocidade mínima ($V_{L\text{min}}$) obtidos nas árvores, de módulo de elasticidade (E_{Mt}) e de ruptura (f_{mt}) obtidos em ensaio de flexão das toras, módulos de elasticidade (E_{Ma}) e módulo de resistência (MR) obtidos nos ensaios de flexão das árvores e de diâmetro (ϕ) do fuste no DAP.	31
Tabela 4. 2. Análise estatística da variação da velocidade (média e mínima) obtida na árvore viva em função do diâmetro da árvore.	35
Tabela 4. 3. Modelos de regressão e parâmetros de análise das correlações utilizando os 21 clones estudados.	36
Tabela 4. 4. Resumo das classificações dos clones utilizando como variáveis dependentes a velocidade mínima (V_{min}), o módulo de elasticidade obtido na flexão das toras (E_{Mt}) e das árvores (E_{Ma}) e o módulo de resistência (MR) obtido no ensaio de flexão das árvores.	39
Tabela 4. 5. Modelos de regressão e parâmetros de análise das correlações utilizando os 21 clones estudados no Horto 3.	41

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Justificativa	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1. Material	16
3.2. Metodologia	22
3.2.1. Ensaios de ultrassom nas árvores.....	22
3.2.2. Ensaios de flexão nas árvores	23
3.2.3. Ensaios em toras retiradas das árvores	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5. CONCLUSÕES.....	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

Atualmente a produção de eucalipto para a indústria de papel e de celulose é baseada na produção de clones, os quais são obtidos pelo cruzamento de espécies com características desejáveis pelo setor, tais como crescimento rápido, resistência a doenças, maior produtividade, maior densidade, dentre outras.

Os investimentos na produção de clones de características desejáveis são altos e há grande concentração de esforços para atingir esse objetivo.

No entanto, muitas vezes clones considerados de grande potencial têm apresentado problemas graves de encurvamento e de quebras, ocasionados pela ação de ventos. Esse problema tem sido apontado como bastante grave, pois vem afetando, sistematicamente, a produtividade das florestas e ocasionando grandes perdas.

No caso de clones que não quebram, mas que apresentam grandes encurvamentos, o crescimento é prejudicado, ocasionando perdas de produtividade. Nesse caso as perdas ocorrem nas árvores curvadas e, também, nos indivíduos situados nas proximidades, além de dificultar a retirada das árvores no momento da colheita.

Em alguns casos a incidência de ventos causa a quebra de várias árvores. Nessas situações os prejuízos são ainda maiores, pois as árvores quebradas não se desenvolvem e prejudicam de maneira significativa a operação de colheita. Dependendo da quantidade de indivíduos atingidos os prejuízos podem se estender para o talhão inteiro, já que muitas vezes todo o lote tem que ser retirado, uma vez que o custo para retirar apenas as árvores quebradas não é compensador.

Além disso, o transporte também fica prejudicado, pois árvores curvadas ou que apresentam certo grau de quebra não se encaixam de maneira adequada e acabam por ocupar mais espaço no caminhão, minimizando assim a eficiência do processo.

Assim, para que haja melhor aproveitamento das áreas destinadas a produção de madeira, são necessárias ações que possibilitem a diminuição das perdas de matéria prima ocasionadas pela ação dos ventos nas áreas de plantio.

Sabe-se que em uma mesma área e sob a ação de ventos de mesma magnitude, alguns clones se rompem ou se curvam e outros não. Essa característica permite concluir que deve haver diferenciação de rigidez entre eles. Assim, torna-se importante metodologia que permita mensurar a diferenciação de rigidez entre clones da mesma espécie e entre espécies diferentes.

Atualmente a metodologia de análise utilizada pelas empresas do setor de papel e de celulose é empírica. Vários espécimes são plantados em um mesmo talhão experimental para serem analisados sob as mesmas condições de clima, de solo e de incidência de ventos. Com o acompanhamento do desenvolvimento dos clones a empresa pode estimar quais espécies tem melhor crescimento, melhor rendimento e melhor resistência aos ventos. Porém, para que essa metodologia apresente resultado confiável para a empresa, vários talhões experimentais devem ser plantados em diferentes regiões e com os mesmos clones, de forma que todos eles estejam submetidos ao maior número possível de diversidade de condições. Contudo, essa metodologia demanda tempo, espaço e fica sujeita a variações que não podem ser controladas, como por exemplo, a incidência de ventos de magnitudes diferentes nas diversas áreas de plantio.

Essas questões fragilizam a atual metodologia de análise utilizada pelas empresas, que buscam, então, formas mais confiáveis de análise das características físicas e mecânicas da madeira, visando principalmente o melhor aproveitamento de suas áreas de teste e, também, o aumento de produtividade.

Métodos acústicos têm sido utilizados, com eficiência, em determinações de características físicas, de rigidez e de resistência de peças de madeira destinada à uso estruturais ou moveleiros, uma vez que com a utilização de ensaios não destrutivos existem poucos danos à matéria prima e melhor aproveitamento das peças utilizadas durante os ensaios.

Os métodos acústicos mais utilizados no mundo são os baseados em ondas geradas por impactos, como as ondas de tensão, mais conhecidas como “stress wave”, e as ondas de ultrassom, existindo no mercado diversas opções de equipamentos.

Recentemente essa tecnologia vem sendo aplicada diretamente na árvore ainda viva, visando a detecção de ocos ou de regiões deterioradas e, também, a antecipação do conhecimento de propriedades de resistência e de rigidez da madeira a ser obtida a partir da árvore inspecionada.

Entretanto, grande parte dos equipamentos já industrializados e disponíveis no mercado é de origem estrangeira, gerando custos de importação e, muitas vezes, possuindo

suas configurações voltadas para espécies de madeira nativas de seu país de origem. Para o caso da madeira essa questão é importante, porque algumas características físicas, como a densidade, ou mecânicas, como a resistência e a rigidez, podem impedir o uso adequado do equipamento, levando à inviabilização da medição ou à leituras afetadas e inadequadas em árvores crescidas no Brasil.

Trabalho conjunto realizado por grupo de pesquisa da FEAGRI/UNICAMP e empresa nacional de base tecnológica (AGRICEF) permitiu o desenvolvimento equipamento de ultrassom configurado para espécies crescidas no Brasil. Em diversas pesquisas realizadas no LabEND (laboratório de Ensaios Não Destrutivos) ficou comprovada a eficácia desse equipamento, bem como a praticidade e a confiabilidade dos dados obtidos, tanto em campo quanto em laboratório, e, também a confiabilidade desse método não destrutivo de propagação de ondas em aplicações florestais.

Com base na problemática apresentada, nos antecedentes que envolvem as bases teóricas da relação entre a propagação de ondas de ultrassom e a rigidez da madeira e nos resultados já alcançados por meio dessa técnica, a hipótese dessa pesquisa é a de que o uso do ultrassom é possível, dentro de um grupo amostral, identificar clones com maior resistência ao vento.

Levando em conta os principais aspectos apresentados essa pesquisa teve como objetivo geral avaliar o uso do ultrassom como ferramenta para a identificação de clones com maior resistência à ação dos ventos, considerada como diretamente relacionada à rigidez do tronco.

Para atingir o objetivo geral da pesquisa foram estabelecidos as seguintes etapas do trabalho:

- Realizar ensaios de ultrassom nas árvores em pé, determinando assim a velocidade de propagação das ondas na árvore viva.
- Determinar a resistência e a rigidez das árvores, ensaiadas por ultrassom em campo, por meio de ensaio de flexão em laboratório.
- Estudar as correlações entre a velocidade de propagação de ondas de ultrassom mensurada nas árvores vivas e a rigidez e a resistência das mesmas árvores determinadas em laboratório.

- Avaliar estatisticamente a diferenciação entre os clones utilizando as propriedades mensuradas – velocidade de propagação das ondas na árvore viva e rigidez e resistência obtidas em laboratório.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O melhoramento de uma determinada espécie por meio de clonagem busca a reprodução de características desejáveis através de herança genética. Na busca pela melhoria de qualidade, os produtores de madeira têm utilizado, como principal parâmetro, o aumento da biomassa da árvore, desprezando-se, muitas vezes, outras propriedades do material.

Em árvores plantadas com fins comerciais essas melhorias visam o aumento de produtividade e a velocidade de crescimento, sendo a clonagem prática muito comum para atingir esses objetivos.

A seleção de indivíduos através de características como o módulo de elasticidade, densidade e o ângulo das microfibrilas, pode permitir melhoramento da qualidade da madeira. Em seu estudo, Lindstrom *et al.* (2004) exemplificam essa seleção utilizando clones de *Pinus radiata* de 3 anos de idade, avaliando correlações entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico, bem como a influência do ângulo da microfibrila e da densidade nesses parâmetros. Os autores obtiveram correlações significativas entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico, bem como concluíram que o ângulo da microfibrila afeta ambos módulos. Embora a densidade básica, isoladamente, não tenha influenciado de forma significativa os módulos de elasticidade, ela foi estatisticamente significativa quando combinada com o ângulo da microfibrila.

Uma forma de se determinar propriedades de resistência em árvores em pé é a simulação de carga de vento, como realizado por Ferreira *et al.* (2010). Nessa pesquisa o principal objetivo dos autores foi avaliar o módulo de ruptura (MR) de clones de eucalipto e sua relação com a densidade básica, com a contração volumétrica do caule e a relação com a topografia. Para isso foram realizados testes de ancoragem, como ilustrado pela Figura 2. 1.

O ensaio consiste em aplicar carga a aproximadamente 85% da altura total da árvore e mensurar a carga aplicada na mesma, no momento da ruptura ou no momento em que a árvore toque o chão. Com base nesse procedimento foi possível calcular o momento de flexão da árvore. A principal conclusão apresentada por Ferreira *et al.* (2010) foi a de que a contração volumétrica do tronco tem relação inversa com módulo de ruptura, indicando que quanto menor o valor de MR maior a contração volumétrica.

TESTE DE RESISTÊNCIA

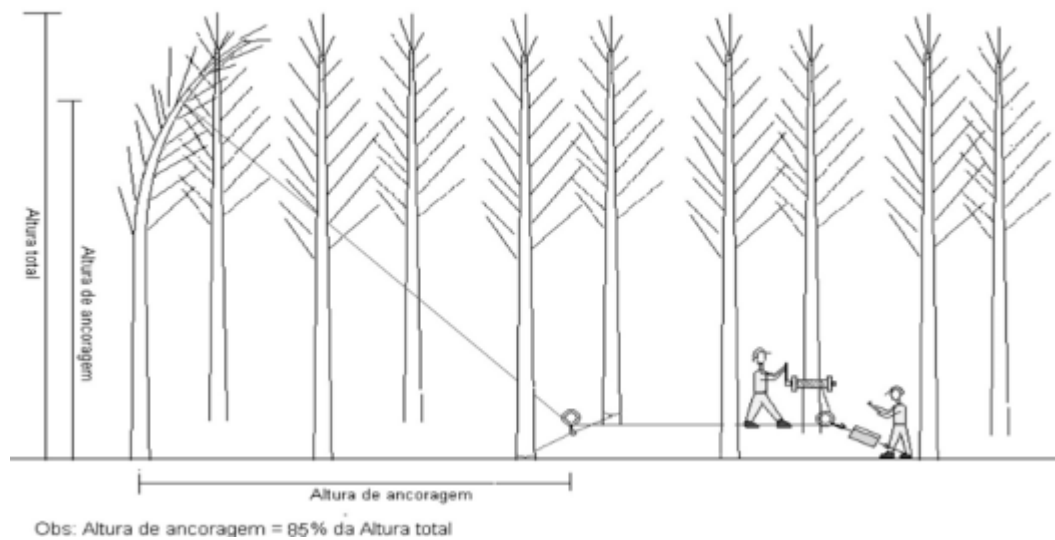


Figura 2. 1. Teste de resistência por ancoragem. Fonte: Ferreira *et al.*, 2010

Wu *et al.* (2010) realizaram experimento com clones de eucalipto buscando avaliar as variações de propriedades mecânicas, características de crescimento e densidade básica da madeira. Para isso utilizaram método de propagação de ondas de tensão (FAKOPP, Hungria) e ensaio de penetração (Pilodyn, TerraGes, Nova Zelândia). Os autores concluíram que a utilização desses equipamentos possibilita a identificação de variação nas características estudadas dos clones. No estudo, as árvores que pertenciam ao mesmo clone apresentaram-se com variação superior ao esperado pelos autores. Essa variação foi atribuída à topografia muito irregular do terreno.

Resultado semelhante foi obtido por Ferreira *et al.* (2010) que verificou que a força de quebra dos clones era influenciada pela topografia do terreno. Esses resultados indicam que além dos fatores intrínsecos da madeira, aspectos relacionados ao solo em termos de nutrientes e a topografia do terreno podem afetar as propriedades dos clones, diferenciando-os em função do local de crescimento.

Segundo Milne e Blackburn (1989) parte dos danos ocorridos em florestas de coníferas são provocados por elementos naturais, tais como vento, neve e chuva. Dados indicam que são crescentes as áreas florestais afetadas pelo vento, tendo atingido grandes extensões em 2009.

Os padrões de danos variam em termos de severidade, desde pequenas inclinações até a quebra das árvores em grandes áreas. A Figura 2. 2 ilustra os tipos de danos que podem ocorrer devido ao vento, e a Figura 2.3 exemplifica danos reais (encurvamentos e quebras) ocorridos em florestas da International Paper¹.

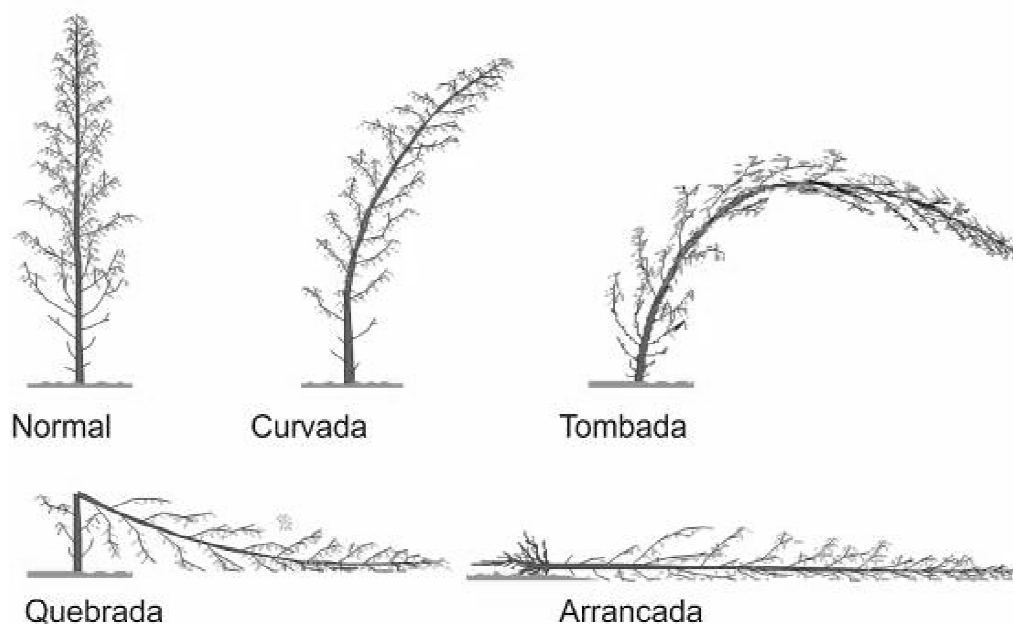


Figura 2. 2 Padrões de danos em florestas devido ao vento. Fonte: Cenibra (2002) apud Melo (2006).

¹ A International Paper possui 72 mil hectares de florestas renováveis de eucalipto, destinadas à produção de celulose e papel. Também mantém 24 mil hectares de áreas preservadas, para a conservação das características originais das vegetações nativas. Essas extensões territoriais estão distribuídas por Mogi Guaçu, Brotas e Luiz Antônio, municípios do interior do estado de São Paulo.



Horto Cara Preta



Horto Vassununguinha



Horto Moinho de Vento

Figura 2.3. Exemplos de florestas da International Paper com danos (encurvamentos e quebras) devidos a vento.

O comportamento frente à ação do vento varia entre clones, entre árvores do mesmo clone situadas no mesmo local e em diferentes locais, entre idades e em diferentes posicionamentos (bordadura e centro do plantio).

É lógico se pensar que o comportamento do clone frente à ação do vento será dependente de sua rigidez (módulo de elasticidade) e de sua resistência (módulo de ruptura). Por outro lado, a rigidez e a resistência do lenho normalmente estão associadas à estrutura

celular (comprimento, largura e espessura da parede das fibras e diâmetro do lúmen) e à densidade básica.

Estudo realizado por Melo (2006) indicou que a largura da fibra e o diâmetro do lúmen apresentavam correlação com a tolerância da árvore a danos causados pelo vento, enquanto que os demais parâmetros associados à estrutura celular tinham correlações fracas. Nesse estudo a densidade básica não apresentou correlação com a tolerância ao vento.

Em relação aos parâmetros de resistência e de rigidez Melo (2006) concluiu que o módulo de elasticidade na flexão foi o parâmetro com maior correlação com a tolerância da árvore a danos causados pelo vento. Esse resultado é esperado, uma vez que o tipo de solicitação na árvore em decorrência da ação do vento é a flexão.

Estudos realizados em várias partes do mundo e também no Brasil têm demonstrado a alta correlação entre os parâmetros de propagação de ondas de ultrassom (velocidade e/ou coeficiente de rigidez) com o módulo de elasticidade na flexão da madeira (BALLARIN e NOGUEIRA, 2006; BARTHOLOMEU *et al.* 2003, BARTHOLOMEU e GONÇALVES, 2007; GONÇALVES e BARTHOLOMEU, 2000).

Mais recentemente estudos vêm demonstrando, também, altas correlações entre os parâmetros de propagação de ondas de ultrassom em árvores vivas e as propriedades de rigidez da madeira proveniente dessas árvores (ADDIS, T. *et al.*, 2000.; AMISHEV e MURPHY, 2008.; ANDREWS, M., 2000.; TSEHAYE *et al.* 2000.; BRASHAW *et al.* , 2009).

Estudos realizados por Wang *et al.* (2007) e Grabianowski *et al.* (2006), com diferentes espécies e utilizando métodos de propagação de ondas (ondas de tensão) aplicados diretamente na árvore, mostram que esse tipo de avaliação *in loco* pode fornecer importantes informações referentes à resistência da madeira. Os autores obtiveram relações significativas entre os ensaios de propagação de ondas na árvore ainda viva e ensaios de flexão realizados em peças dela retiradas, demonstrando a viabilidade do uso dessa técnica para o acompanhamento de variações de propriedades mecânicas da madeira proveniente dessas árvores.

No Brasil, estudos recentes também demonstraram a viabilidade de serem obtidas informações à respeito da rigidez da madeira à partir do ensaio na árvore viva ou em toras recém abatidas (BERTOLDO *et al.*, 2010; BERTOLDO *et al.*, 2009).

A metodologia de ensaios empregando a propagação de ondas, utilizada por diversos autores, (TSEHAYE *et al.* 2000, WANG *et al.*, 2000, GRABIANOWSKI *et al.* 2006, WANG

et al., 2007, BERTOLDO *et al.*, 2010; BERTOLDO *et al.*, 2009), consiste em realizar ensaios com a árvore ainda viva em diferentes pontos de seu tronco, e comparar os valores obtidos com ensaios em peças provenientes das árvores, e dessa maneira correlacionar os valores a fim de estabelecer correlações entre eles.

Para a realização de ensaios em árvores em pé, é necessário que alguns parâmetros sejam controlados, a fim de minimizar as variáveis que podem afetar os resultados procurando-se, por exemplo, fixar a distância entre os transdutores e a altura de ensaio.

Em seu estudo Wang *et al.* (2000) utilizaram distâncias entre os sensores de 1220 mm, a partir da base, mantendo essa distância constante em todos os ensaios, reduzindo as variáveis e permitindo que o ensaio fosse realizado de forma confortável pelo operador do equipamento.

Bertoldo *et al.* (2009 e 2010) também fixaram a distância entre os transdutores em 500 mm acima e abaixo da altura do peito (DAP). No caso de todos os autores citados, após a realização dos ensaios na árvore foram retiradas peças da região de medição (entre os transdutores), para que fosse possível estabelecer correlações entre ambos os ensaios. A Figura 2. 4 exemplifica o ensaio de ondas de tensão realizado por Wang *et al* (2000) na árvore ainda viva e o padrão de retirada dos corpos de prova da tora.

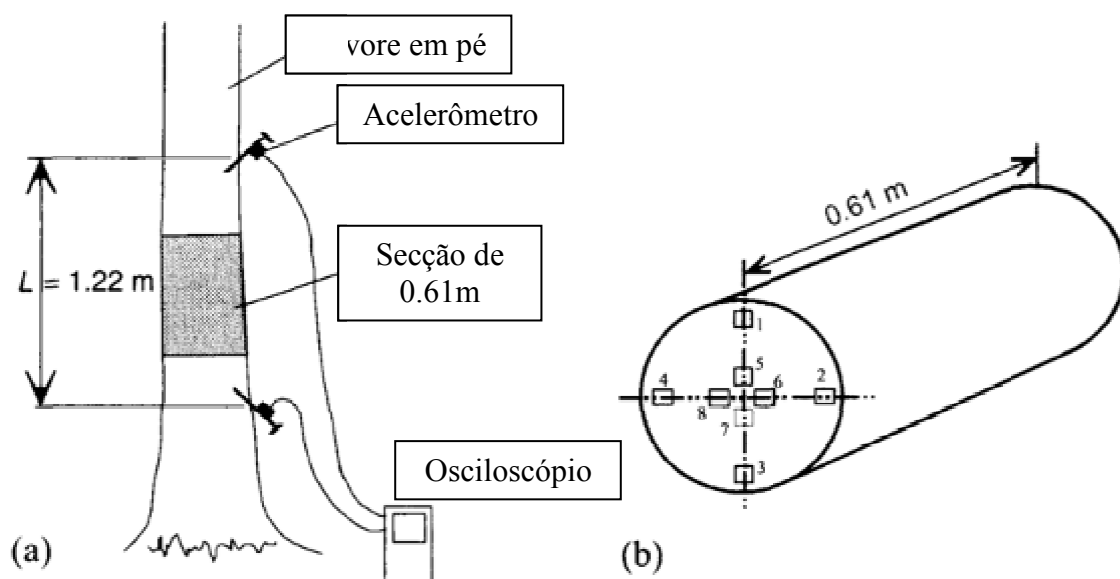


Figura 2. 4. (a) Realização do ensaio de stress wave na árvore viva. (b) Padrão de retirada de corpos de prova na tora. Fonte: Adaptado de Wang *et al* (2000).

Outra maneira sugerida por alguns autores é a comparação dos resultados obtidos nas árvores com ensaios realizados diretamente nas toras, visando correlacionar os parâmetros de propagação de onda na árvore e na tora.

Wang *et al.* (2002) realizaram ensaios com equipamentos de propagação de ondas de tensão em árvores de pinus e em toras delas provenientes. Os ensaios basearam-se em ondas de tensão longitudinais aplicadas na direção das fibras e ensaios de vibração transversal. Os resultados permitiram verificar a sensibilidade dos métodos para a determinação das características da madeira, mas os autores sugerem que imperfeições nas toras e a geometria do tronco afetam os resultados de maneira que a velocidade de propagação de onda nos troncos se diferencia da velocidade nas árvores vivas. Resultado semelhante foi obtido por Bertoldo (2011).

No caso da pesquisa de Wang *et al.* (2002) os resultados dos ensaios nas árvores foram comparados com resultados de ondas de tensão longitudinais e de vibração transversal na toras e, também, ensaios de flexão estática nas toras, como exemplificado na Figura 2. 5.

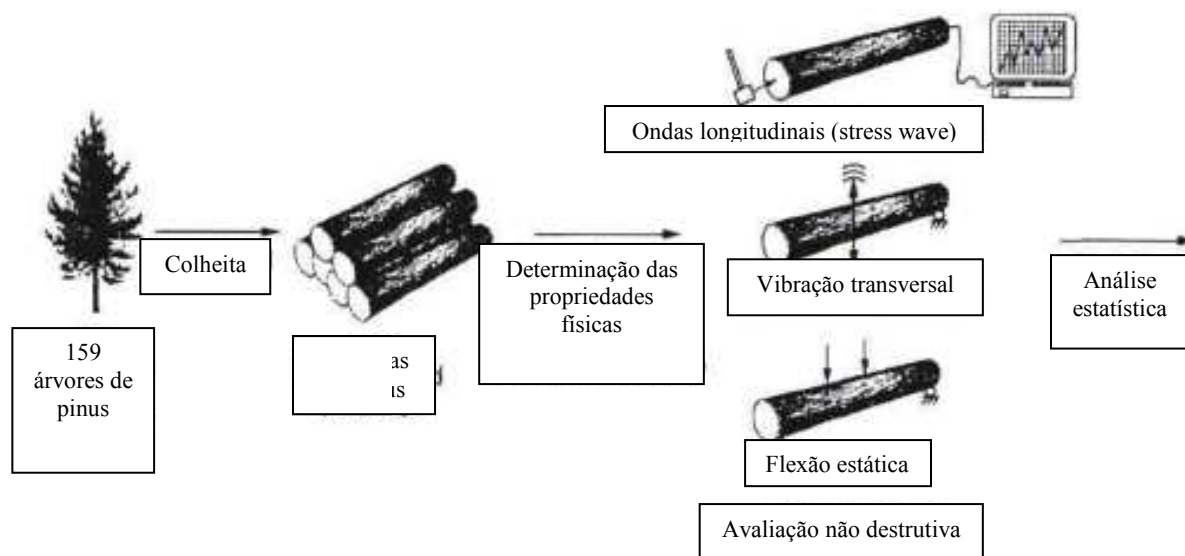


Figura 2. 5. Metodologia de ensaios com aplicações na árvore viva e na tora. Fonte: Adaptado de Wang *et al.* 2002.

Utilizando essa metodologia os autores obtiveram correlações estatisticamente significativas entre os coeficientes de rigidez obtidos nos ensaios não destrutivos e os módulos de elasticidade obtidos no ensaio de flexão das toras, com coeficientes de determinação variando de $R^2 = 58\%$ a $R^2 = 77\%$, demonstrando a viabilidade de se utilizar métodos de

propagação de ondas em árvores para inferir a rigidez da madeira dela proveniente, bem como a possibilidade de utilizar o ensaio de flexão diretamente na tora para inferir a rigidez da madeira.

Um fator apontado por Wang *et al.* (2004), que pode influenciar os resultados obtidos com os ensaios de propagação de onda, é o diâmetro do tronco. Nesse estudo os autores buscaram avaliar a influência deste fator no módulo de elasticidade obtido através de propagação de onda em toras, demonstrando que as ondas longitudinais são sensíveis às variações de diâmetros do tronco, observando que quanto maior o diâmetro maior o desvio obtidos nos resultados nas árvores e nas toras.

Em outro estudo feito por Wang *et al.* (2007) foi analisada a relação entre as velocidades propagação de ondas nas árvores, utilizando um equipamento protótipo, e nas toras com método o de ressonância (Director HM200, fibre-gen, Nova Zelândia), buscando avaliar a capacidade dessas ferramentas em predizer os valores de propriedades mecânicas das toras. Os autores verificaram que as velocidades nas árvores em pé foram superiores as velocidades medidas nas toras, atribuindo esse resultado à diferença entre os equipamentos. Em função de desvios significativos da velocidade na árvore e na tora os autores concluem que seria necessário realizar algum tipo de correção na velocidade antes de usar esse valor, de forma isolada, na determinação das propriedades da madeira. Os autores também destacam que as medições realizadas em árvores em pé podem sofrer influência de fatores como o diâmetro, a espécie e a idade da árvore.

Miná *et al.* (2004) utilizaram 25 postes de *Eucalyptus citriodora*, para determinar a resistência à flexão e a resistência à compressão paralela as fibras. Para a obtenção do módulo de elasticidade os autores utilizaram a Equação 1.

$$E_M = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \Delta \cdot I_{EQ}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde Δ é o deslocamento vertical no meio do vão; I_{EQ} é o momento de inércia equivalente, obtido através da Equação 2 e D_{EQ} é o diâmetro equivalente, fornecido pela Equação 3, e L é o vão livre.

$$I_{EQ} = \frac{\pi \cdot D_{EQ}^4}{64} \quad \text{Equação 2}$$

$$D_{EQ} = \sqrt[4]{\frac{2 \cdot D_T \cdot D_M^3 \cdot D_B}{(D_T + D_B)}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde D_B , D_M e D_T são, respectivamente, o diâmetro obtido na base da tora, o diâmetro obtido no meio da tora e o diâmetro obtido no topo da peça.

Além disso, os autores utilizaram a Equação 4 para a determinação da resistência a flexão (f_m).

$$f_m = \frac{M_{rup}}{W} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: M_{rup} é o momento de ruptura obtido pela aplicação de carga e W é o módulo de resistência elástica, determinado a partir do diâmetro D_M .

Com base nos resultados utilizando o diâmetro equivalente e o diâmetro médio, os autores concluíram que o diâmetro das árvores não exercia influência significativa nos resultados de módulo de elasticidade e de ruptura. No entanto, é importante destacar que a amostragem usada para os ensaios não apresentava grandes variações de diâmetros ao longo do fuste ou entre as toras, contrastando com os resultados obtidos por Wang *et al* (2004).

Wang *et al* (2004) verificaram que o coeficiente de rigidez obtido por ondas de tensão diminuía conforme o diâmetro das peças aumentava e que, embora o módulo estático também tenha diminuído, essa diferença de valores não obedecia a mesma ordem de grandeza, sendo o coeficiente de rigidez menos afetado do que o módulo de elasticidade estático.

Em seu estudo, Auty e Achim (2010) realizaram ensaio de propagação de ondas utilizando ensaio de vibração (Director ST300 (Fibre-gen, Nova Zelândia)) buscando correlações com propriedades mecânicas. Para isso os autores ensaiaram 200 árvores oriundas de duas diferentes florestas do norte da Escócia. Após os ensaios não destrutivos foram retiradas toras de 1,5 m das árvores e dessas peças foram obtidos corpos de prova com dimensões nominais de 20 mm x 20 mm x 300 mm para ensaios destrutivos. Os corpos de prova foram retirados no local onde o ensaio acústico foi realizado, desde as proximidades da medula até as proximidades da casca, conforme indica a Figura 2. 6.

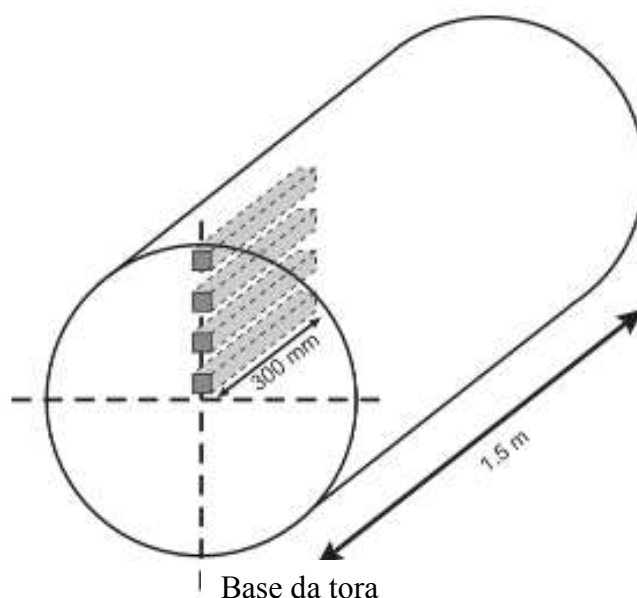


Figura 2. 6. Esquema de retirada de corpos-de-prova das toras. Fonte: Adaptado de Auty e Achim (2010).

Com esse procedimento os autores relacionaram os valores de velocidade de propagação de ondas com valores do ensaio destrutivo, obtendo como resultado correlações entre E_M e velocidade com $R^2 = 0,53$ e de f_m com velocidade de $R^2 = 0,59$, concluindo que métodos acústicos à partir da árvore podem ser utilizados como ferramentas de predição das propriedades da madeira. Entretanto os autores ressaltam sua preocupação em extrapolar tais conclusões para todo o fuste da árvore, pois pode haver variações nas propriedades mecânicas ao longo do tronco, e por se tratar de ensaios realizados em corpos de prova pode não representar toda a condição da árvore.

Destaca-se que, nas pesquisas citadas, o interesse dos autores era correlacionar os parâmetros não destrutivos obtidos nas árvores com as propriedades da madeira dela proveniente, de forma a ser possível antecipar o conhecimento dessas propriedades, permitindo, assim, direcionar o tipo de desdobro, de beneficiamento e, com isso, aplicação dessa madeira. No caso desta pesquisa o objetivo foi correlacionar os parâmetros não destrutivos nas árvores com as propriedades de rigidez da própria árvore e não de peças dela retiradas.

As referências apresentadas e brevemente discutidas nesse capítulo indicam que as pesquisas de métodos não destrutivos para a avaliação das propriedades mecânicas à partir de árvores têm sido foco atual de atenção de muitos pesquisadores em várias partes do mundo.

Com base na revisão bibliográfica e nos antecedentes de pesquisa do grupo do LabEND da FEAGRI nessa área, acredita-se que o aprofundamento desse tema visando a melhor compreensão da aplicação de métodos de propagação de ondas em árvores, com a finalidade de obter informações à respeito das propriedades da madeira e/ou da própria árvore, é importante para o setor florestal brasileiro.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, os equipamentos e a metodologia utilizada durante o desenvolvimento da pesquisa.

3.1. Material

Para a realização desta pesquisa foram utilizadas 189 árvores de eucalipto pertencentes a teste clonal da empresa International Paper. O estudo envolveu 21 clones, resultantes do cruzamento das espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, oriundos de experimentos próprios da empresa, todos com aproximadamente 3 anos de idade na época dos ensaios.

Os exemplares cedidos para o estudo são provenientes de 3 hortos da empresa – Horto Gigante (plantio em 02/06/2008), neste trabalho denominado Horto 1; Horto Paineiras (plantio em e 26/08/2008), neste trabalho denominado de Horto 2 e Horto Gramado (plantio em 11/06/2008), neste trabalho denominado de Horto 3. Dentro dos hortos as árvores mantêm espaçamentos iguais de 2,5 m x 3,0 m.

Em cada horto havia a presença de todos os clones testados e, por pertencerem a teste clonal foi possível reduzir variáveis que interferem no aspecto principal a ser estudado, mas que não foram focos do estudo, tais como o solo, o clima, o tipo de irrigação, dentre outras.

A escolha dos clones a serem utilizados na pesquisa foi feita pela empresa, com base em dados empíricos e testes clonais já realizados em outras ocasiões.

As árvores estudadas se localizavam sempre no meio do lote, evitando-se assim variáveis relacionadas ao posicionamento no talhão tais como árvores de bordadura.

A amostragem foi então composta por um total de 189 árvores provenientes de 3 hortos da International Paper. De cada horto foram obtidas amostras de 21 clones, com 3 árvores de cada clone atuando como fator de repetição, totalizando 63 amostras por horto.

Para a realização dos ensaios de propagação de ondas foi utilizado o equipamento de ultrassom (USLab, AGRICEF, Brasil) (Figura 3. 1), com transdutores de frequência de 45 kHz e faces exponenciais.



Figura 3. 1. Equipamento de ultrassom (USLab, AGRICEF, Brasil) e transdutores (exponenciais de 45 kHz) utilizados nos ensaios nas árvores .

O Equipamento de ultrassom (USLab, AGRICEF, Brasil) permite a medição do tempo de propagação da onda (t) para percorrer a distância entre os transdutores (L).

Assim, a velocidade de propagação de onda do ultrassom foi determinada utilizando a Equação 5.

$$V=L/t$$

Equação 5

Para a realização de ensaios em laboratório foi utilizada a estrutura do Laboratório de Materiais e Estruturas (LME) da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A estrutura, montada para ensaios de postes da rede elétrica, foi adaptada de modo a atender as necessidades dos ensaios de flexão das árvores, conforme a Figura 3. 2. Nesse ensaio foi realizada a simulação do engastamento da árvore, utilizando-se o bloco metálico, e a simulação da carga de vento na parte superior da árvore, utilizando-se unidade hidrostática (Figura 3. 3).



Figura 3. 2. Esquema de ensaio utilizado para a determinação do módulo de elasticidade e de ruptura das árvores no Laboratório de Materiais e Estruturas (LME) da FEAGRI/UNICAMP.



Figura 3. 3. Unidade hidrostática.

Para a medição da carga aplicada durante o ensaio das árvores foi utilizada célula de carga (50 kN, HMB, EUA), conforme Figura 3. 4. Como parte da adaptação da estrutura física realizada no laboratório, foi criado um sistema de roldanas (Figura 3. 5) que permitiu aumento do deslocamento final do ensaio.



Figura 3. 4. Célula de carga, U10m de 50 kN utilizada para a medição da força de tração na árvore



Figura 3. 5. Sistema de roldanas

Para a captação dos dados durante os ensaios de flexão foi utilizado sistema de aquisição de dados (spider8, HBM, EUA) com oito canais (Figura 3. 6).



Figura 3. 6. Sistema de aquisição de dados HBM spider8.

Os deslocamentos da parte superior da árvore durante o ensaio foram medidos utilizando-se dois transdutores de deslocamento linear, sendo um de 300 mm e outro de 450 mm, como mostrado na Figura 3. 7, posicionados em uma estrutura de suporte com roldanas e cabos, permitindo que os valores de deslocamentos medidos durante o ensaio correspondessem a quatro vezes o valor nominal do equipamento.

Para a aquisição desses dados um dos transdutores é colocado no ponto de aplicação da carga e o outro foi colocado a 1,0 m do ponto de aplicação de aplicação da carga. A determinação desses dois deslocamentos permitiu corrigir a variação da posição do ponto de aplicação da carga em virtude da deformação do tronco.

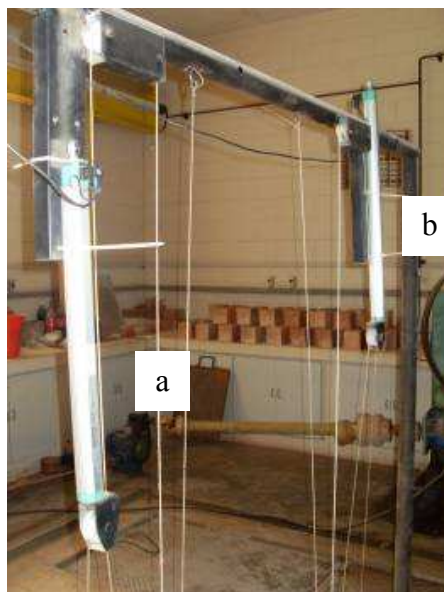


Figura 3. 7. Transdutores de deslocamento linear de 300 mm (a) e transdutores de deslocamento linear de 450 mm (b).

Para a realização dos ensaios de flexão estática nas peças retiradas das árvores foi utilizado pórtico hidráulico de ensaios com capacidade de 500 kN, disponível no LME da FEAGRI, Figura 3. 8.



Figura 3. 8. Pórtico de ensaios, capacidade de aplicação de carga de 500 kN.

3.2. Metodologia

Nesse item é apresentada, de forma detalhada, a metodologia utilizada para os ensaios de campo e de laboratório.

3.2.1. Ensaios de ultrassom nas árvores

A metodologia seguida para o ensaio de ultrassom nas árvores foi a mesma que já vem sendo utilizada pelo grupo de pesquisa do LabEND (Laboratório de Ensaios Não Destrutivos) da FEAGRI (Faculdade de Engenharia Agrícola).

Para os ensaios de propagação de ondas os transdutores de faces exponenciais foram posicionados na mesma face (ensaio indireto), distanciados 1,2 m, de forma inclinada em relação ao fuste da árvore (aproximadamente 45°) permitindo que a propagação da onda, inicialmente superficial, se transforme de forma mais rápida em propagação longitudinal (onda de compressão) (Figura 3. 9 e Figura 3. 9).

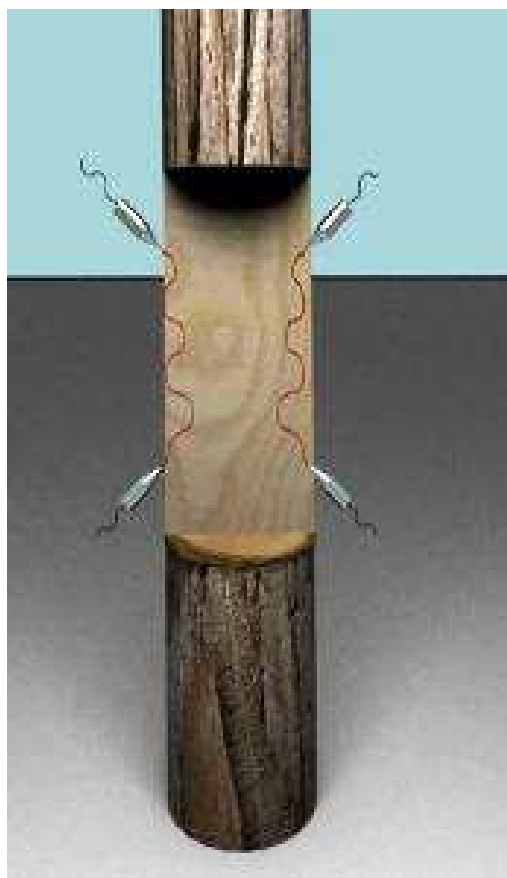


Figura 3. 9. Esquema do ensaio com ondas se propagando na direção longitudinal.



Figura 3. 10. Ensaio na árvore viva com ondas se propagando na direção longitudinal.

Esse intervalo (1,20 m) incluía a altura do peito (aproximadamente 1,30 m do solo), de forma que um dos sensores foi posicionado de 0,40 m a 0,60 m do solo e o outro a 1,20 m a partir do posicionamento do primeiro. Esse procedimento permitiu que a medição fosse feita de forma confortável pelo operador. A distância entre os sensores foi fixada em função de resultados preliminares da equipe, bem como de resultados obtidos por outros pesquisadores (revisão bibliográfica).

3.2.2. Ensaios de flexão nas árvores

Após os ensaios de ultrassom as árvores foram cortadas e levadas para o LME da FEAGRI, sem os galhos e sem a copa, como exemplificado na Figura 3. 11, onde foram realizados os ensaios de flexão (engastado-livre) para a determinação do módulo de elasticidade (E_M) e de ruptura (f_m).



Figura 3. 11. Árvores em laboratório, sem copa e sem galhos.

O ensaio de flexão nas árvores foi realizado fixando-se o engastamento na laje de reação, a qual permite a rigidez necessária do apoio nesse tipo de ensaio. Esse ensaio consistiu em apoiar a base da árvore em uma estrutura de engastamento e aplicar carga (tração) na outra extremidade, perpendicularmente ao eixo de engastamento, com a utilização de cabos e do sistema de roldanas, como demonstrado na Figura 3. 12.

Para a realização deste procedimento utilizou-se uma adaptação da norma para ensaio de poste de madeira segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a NBR 6231(1980). Durante o ensaio houve a captação de dados referentes aos deslocamentos e às cargas aplicadas na extremidade superior da peça, simulando uma carga de vento.

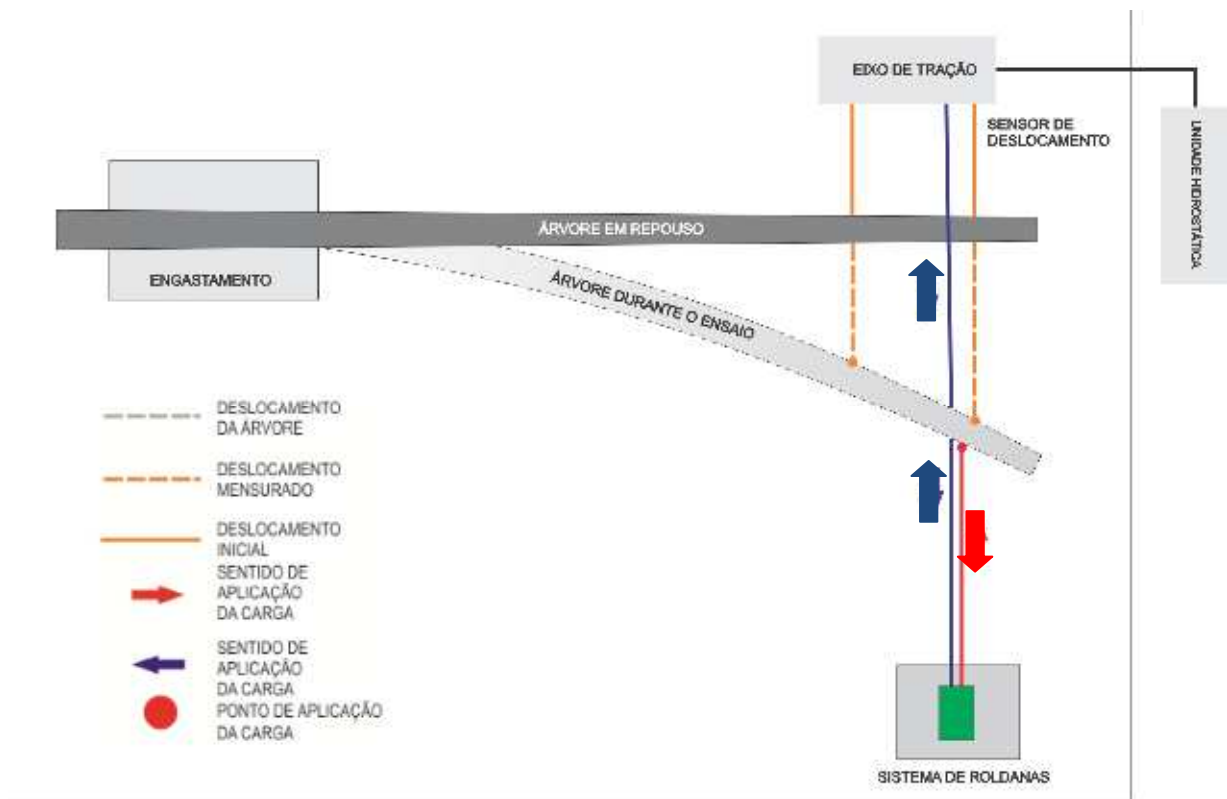


Figura 3. 12. Esquema do ensaio de flexão na árvore.

De posse dos valores de carga e de deslocamento no trecho elástico (entre 10% e 30% da carga máxima), obtidos por meio do sistema de aquisição de dados, foi possível calcular o módulo de elasticidade da árvore (E_a), utilizando a Equação 6. Os cálculos foram realizados utilizando-se programação no Matlab (R2010a, MathWorks). A Equação 7 apresenta o fator de “y”, indicado pela ASTM D 1036 (1997) para corrigir o posicionamento da carga, que para continuar sendo perpendicular ao eixo do poste precisa se deslocar, reduzindo assim a distância entre o engastamento e o ponto de aplicação da carga.

$$E_a = \frac{64\pi^3(L-y)^3\Delta P}{3C^3c\Delta f} \quad \text{Equação 6}$$

$$y = 1 - [\cos(\arcsen(f - f_1))] \quad \text{Equação 7}$$

Onde, L é a distância da seção de engastamento até o ponto de aplicação da carga; C é a medida da circunferência da árvore no ponto de engastamento; y é o deslocamento do ponto de aplicação da carga dado pela Equação 7; ΔP é a variação da carga aplicada no trecho

elástico (10% e 30% da carga máxima); Δf é a variação da flecha no trecho elástico (10% e 30% da carga máxima); c é a medida da circunferência do poste no ponto de aplicação da carga; f é o deslocamento no ponto de aplicação da carga e f_l é o deslocamento a 1 m do ponto de aplicação da carga.

Tendo em vista os grandes deslocamentos das árvores (flechas) durante o ensaio, o espaço do laboratório limitou a condição de ruptura para muitas árvores, o que não permitiria a análise desse parâmetro de forma completa. Dessa forma optou-se pela utilização, na Equação 8, da carga correspondente a um valor fixo de deslocamento, adotado como sendo 800 mm. O valor obtido pela Equação 8 foi denominado nesse trabalho de MR para diferenciar o valor correto desse parâmetro (f_{ma}) que seria calculado utilizando-se a carga máxima ruptura (P).

$$MR = \frac{32\pi^2 P(L - y)}{C^3} \quad \text{Equação 8}$$

Onde P é a carga correspondente ao deslocamento de 800mm, L é a distância da seção de engastamento até o ponto de aplicação da carga, y é o deslocamento do ponto de aplicação da carga dado pela Equação 7, e C é a circunferência da árvore no ponto de engastamento.

3.2.3. Ensaio em toras retiradas das árvores

De partes dos troncos não danificadas pela ruptura durante o ensaio detalhado anteriormente foram obtidas toras com aproximadamente 3,5 m de comprimento, permitindo assim que o ensaio fosse realizado utilizando-se vão de, pelo menos, 21 vezes o valor do diâmetro no ponto de aplicação da carga. Para o esquema estático adotado nesse ensaio (carga centrada) obedecer a essa relação é importante para minimizar o efeito do cisalhamento. Os ensaios foram realizados em pórtico de ensaios com capacidade de 500 kN, disponível no LME da FEAGRI. A Figura 3. 13 mostra o esquema de retirada das toras à partir do fuste da árvore bem como uma foto do ensaio realizado no pórtico.

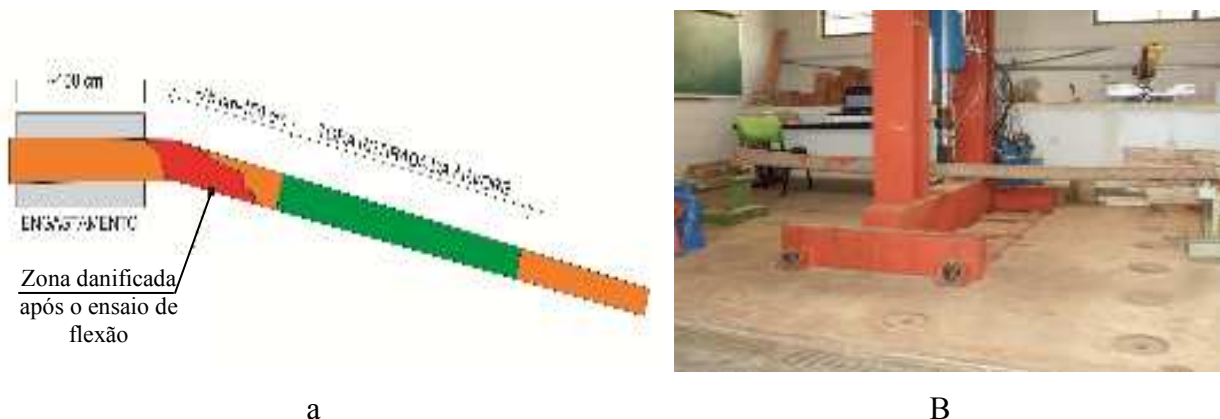


Figura 3. 13. Esquema de retirada das toras à partir do fuste das árvores (a) e ensaio da tora no pórtico do LME (b).

Os ensaios das toras foram realizados de acordo com o proposto por Miná *et al.* (2004), cujo detalhamento foi apresentado no Capítulo 2. O objetivo desses ensaios foi a determinação do módulo de elasticidade (E_{Mt}) e do módulo de ruptura (f_{mt}) nas toras provenientes das árvores, visando comparar os valores com os obtidos no ensaio na árvore (item 3.2.2).

Para a determinação de E_{Mt} e f_{mt} foram utilizadas duas formas de cálculo. A primeira foi baseado em Miná *et al.* (2004), no qual os autores utilizam o diâmetro equivalente do tronco (Equação 2), levando em consideração a forma cônica da peça para o cálculo do módulo de elasticidade nas toras. A segunda forma de cálculo é realizada com as mesmas equações para a determinação do módulo de elasticidade e de ruptura (Equações 1 e 4), mas é utilizado o diâmetro no ponto de aplicação da carga.

Essa metodologia foi utilizada a fim de avaliar se a conicidade do tronco afetaria de maneira significativa os resultados dos módulos de elasticidade e de ruptura, já que de acordo com Miná *et al.* (2004) o uso do diâmetro médio acarretaria em diferenças significativas no valor final desta propriedade.

No caso do Horto 3 foi possível recuperar dados de inventário realizado pela empresa um pouco antes do corte. Assim, para as árvores desse horto eram conhecidos, além do diâmetro no DAP (D), as alturas das árvores (L). Portanto, para esse horto, foi possível calcular os valores de esbeltez (λ) das árvores. O cálculo da esbeltez foi realizado utilizando-se a Equação 9:

$$\lambda = \frac{L_{flambagem}}{i}$$

Equação 9

Onde $L_{flambagem} = 2 \times L$ (condição estática engastada-livre) e i = raio de giração.

O cálculo do raio de giração (i) foi feito, por simplificação, considerando apenas o diâmetro no DAP, ou seja, sem considerar a conicidade da árvore. Para peças com seção circular o raio de giração é $\frac{1}{4}$ do diâmetro.

Após a fase de cálculo, foi realizada análise estatística dos resultados com o objetivo de obter as correlações entre a velocidade de propagação de ondas de ultrassom mensurada nas árvores vivas e a resistência e a rigidez das mesmas mensuradas em laboratório e, também, avaliar estatisticamente a diferenciação entre os clones utilizando as propriedades mensuradas na árvore viva e a resistência e a rigidez obtida em laboratório.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, todas as variáveis estudadas (velocidade longitudinal média (VL_{med}) e mínima (VL_{min}) na árvore, módulo de elasticidade obtido na tora (E_{Mt}) e na árvore (E_{Ma}), resistência à flexão obtida na tora (f_{mt}) e módulo de resistência (MR) obtido nas árvores) foram analisadas quanto a distribuição de frequência dos resultados. Essa análise foi realizada por clone e indicou que todas as variáveis apresentaram valores de curtose e de assimetria dentro do intervalo esperado (entre -2 e +2) para dados com distribuição normal. Considerando esses resultados as análises estatísticas subsequentes foram realizadas utilizando-se testes estatísticos paramétricos. O sumário dos resultados gerais (independente dos hortos) médios e de dispersão é apresentado na Tabela 4. 1.

No caso do ensaio na tora, inicialmente foram considerados, para o cálculo do módulo de elasticidade (E_{Mt}) e de ruptura (f_{mt}), dois tipos de equacionamento: com o diâmetro equivalente e com o diâmetro médio – Equação 2 e Equação 3, respectivamente.

Utilizando os valores de todos os pares de resultados (189) verificou-se, pelo teste de comparação de médias, que o intervalo da diferença entre as médias de E_M utilizando o diâmetro equivalente e o diâmetro médio, com 95% de confiança, foi de -633,2 MPa a 453,6 MPa. Como o zero pertence ao intervalo, não há diferença estatística entre as duas amostras de resultados. O mesmo teste foi realizado para os resultados de f_{mt} calculado com o diâmetro equivalente e com o diâmetro médio, e o intervalo de confiança da diferença de médias foi de -2,97 MPa a 1,89 MPa, contendo também o zero, sendo portanto considerados estatisticamente equivalente. A Figura 4. 1 apresenta, de forma gráfica, esse resultado.

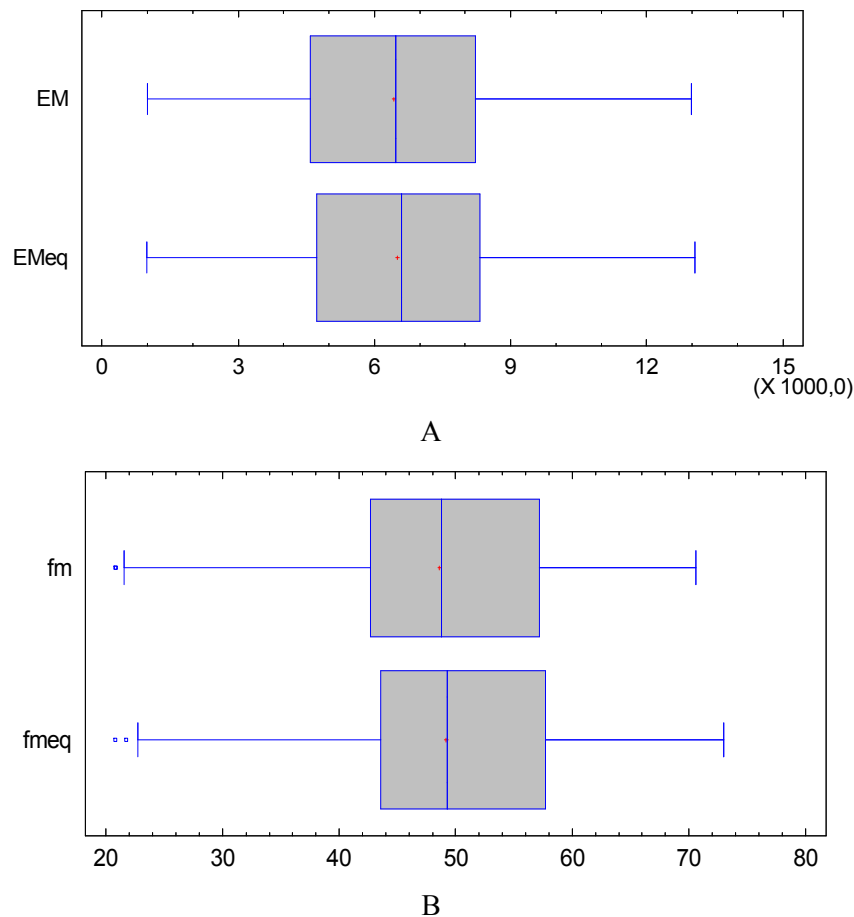


Figura 4. 1 Gráfico de Box and Whisker para o módulo de elasticidade (a) e para a resistência em flexão (b) calculados com o diâmetro equivalente e com o diâmetro médio.

Tendo em vista o resultado de equivalência estatística entre EMt e fmt obtidos utilizando-se o diâmetro equivalente ou o diâmetro no ponto de aplicação da carga, apenas os calculados com o diâmetro equivalente foram adotados na sequencia das análises. Uma vez que todos os cálculos já haviam sido realizados, os valores obtidos com o diâmetro equivalente foram adotados por serem mais completos, já que levam em conta a conicidade da peça. No entanto, considerando o resultado da análise estatística realizada nessa pesquisa, em trabalhos futuros envolvendo peças com variação de diâmetro equivalente às estudadas nesse trabalho, não haveria a necessidade de se utilizar o diâmetro equivalente, simplificando os cálculos e as medições. No caso dessa pesquisa, os 189 valores de diâmetro variaram de 80 mm a 205 mm, com média 126 mm e coeficiente de variação de 18,7%.

Tabela 4. 1. Resultados médios para cada clone, de velocidade média ($V_{L\text{méd}}$) e de velocidade mínima ($V_{L\text{min}}$) obtidos nas árvores, de módulo de elasticidade (E_{Mt}) e de ruptura (f_{mt}) obtidos em ensaio de flexão das toras, módulos de elasticidade (E_{Ma}) e módulo de resistência (MR) obtidos nos ensaios de flexão das árvores e de diâmetro (ϕ) do fuste no DAP.

Clone (Identificação)	$V_{L\text{méd}}$ m.s⁻¹	$V_{L\text{min}}$ m.s⁻¹	E_{Mt} MPa	f_{mt} MPa	E_{Ma}	MR MPa	ϕ mm
3	3766 (19,3)	3599 (21,7)	5011 (27,7)	41,9 (17,0)	1817 (70,0)	51,3 (18,1)	139 (15,6)
6	3972 (21,1)	3712 (23,5)	5213 (35,5)	41,2 (27,8)	1967 (55,9)	58,9 (22,2)	131 (11,5)
7	3566 (22,1)	3341 (24,9)	4967 (30,2)	41,7 (25,5)	1315 (72,2)	47,9 (37,0)	142 (8,0)
8	3604 (30,3)	3463 (33,0)	6366 (42,0)	45,4 (19,5)	2088 (45,5)	61,9 (6,0)	124 (16,6)
10	3812 (18,3)	3718 (18,4)	7196 (34,0)	53,7 (21,8)	2415 (65,2)	63,8 (8,9)	128 (11,5)
15	3987 (20,6)	3760 (24,9)	7635 (47,9)	46,9 (22,6)	2042 (40,7)	64,1 (28,1)	114 (13,9)
31	3455 (26,9)	3305 (30,6)	5511 (29,4)	46,7 (12,9)	1327 (82,5)	39,5 (27,5)	135 (10,1)
34	3863 (18,1)	3690 (21,0)	8164 (10,5)	54,4 (11,1)	1461 (48,8)	49,1 (27,2)	107 (9,8)
41	3977 (22,5)	3840 (24,9)	5348 (40,1)	43,4 (30,3)	1562 (71,4)	51,6 (47,8)	124 (14,8)
42	3928 (20,2)	3736 (22,8)	6883 (7,3)	50,0 (3,7)	2722 (56,1)	64,5 (14,2)	130 (3,7)
43	3900 (20,0)	3665 (24,5)	6295 (19,5)	46,4 (13,9)	2326 (84,1)	67,4 (52,1)	118 (11,6)
53	3735 (18,7)	3578 (21,3)	9708 (55,4)	59,5 (49,5)	1295 (35,6)	44,2 (32,0)	132 (15,3)
59	4011 (22,0)	3845 (24,7)	7456 (26,5)	53,5 (18,2)	2103 (53,3)	69,3 (11,8)	121 (27,2)
77	3563 (18,9)	3402 (22,9)	4893 (18,3)	42,5 (13,5)	1248 (55,2)	41,0 (20,6)	139 (18,4)
86	4216 (18,6)	4051 (21,9)	6103 (43,1)	40,8 (40,3)	3746 (72,7)	74,1 (26,3)	107 (15,8)
92	4456	4181	7136	47,5	4170	86,2	129

	(14,2)	(19,6)	(26,4)	(12,1)	(137,6)	(103,3)	(31,6)
95	4051	3969	8479	56,5	2928	74,7	126
	(16,6)	(16,4)	(5,2)	(13,0)	(95,9)	(58,7)	(13,2)
97	3747	3591	5503	47,8	1328	44,7	132
	(17,0)	(19,9)	(26,9)	(7,6)	(40,0)	(25,6)	(20,7)
98	4014	3883	9198	59,3	2917	85,9	128
	(17,2)	(18,7)	(4,1)	(3,0)	(73,6)	(47,7)	(16,0)
99	3908	3674	6383	57,7	2733	60,7	131
	(21,4)	(26,0)	(38,8)	(5,4)	(99,4)	(36,8)	(14,6)
100	3890	3815	7441	55,1	2111	56,0	120
	(19,9)	(21,5)	(22,2)	(11,1)	(48,7)	(40,5)	(12,7)

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

Rocco Lahr (1989) apresenta resultados de coeficiente de variação (CV) esperados para a madeira na condição saturada ensaiada em flexão estática. Esses coeficientes foram obtidos em trabalhos de diversos autores no Brasil e em outros países, considerando várias espécies. O valor médio do CV apresentado por Rocco Lahr (1989) foi de 15% para a resistência a flexão e de 19% para o módulo de elasticidade, com variações de 12% a 18% para a resistência e de 16% a 25% para a rigidez.

Para a velocidade de propagação de ondas de ultrassom, Trinca (2006) obteve coeficientes de variação da ordem de 5% para o *Eucalyptus grandis*, utilizando 244 corpos de prova.

Por meio da Tabela 4. 1 verifica-se que os CVs obtidos para a rigidez, para a resistência e para a velocidade nos clones foram muito elevados, indicando que o horto exerceu grande influência nas propriedades dos clones, já que era de se esperar valores menos variáveis dentro de um mesmo clone. Até mesmo os diâmetros apresentaram variabilidade elevada, mostrando comportamento diferenciado de crescimento dos clones nas diferentes regiões analisadas durante a pesquisa.

O módulo de elasticidade médio obtido em flexão estática das toras retiradas de todos os clones foi de 6710 MPa com coeficiente de variação de 45,6%. Trugilho *et al.* (2007) em avaliação de 15 clones de Eucalipto com 5 e 6 anos de idade (cinco de *E. Camaldulensis*, cinco de *E. urophylla*, dois híbridos de *E. camaldulensis* com *E. tereticornis* e três híbridos de *E. grandis* com *E. urophylla*) obteve, em corpos de prova de 25 mm x 25 mm x 460 mm

ensaiados em flexão estática na condição de umidade de equilíbrio (12%), módulo de elasticidade de 6404 MPa com coeficiente de variação de 14%. Considerando a idade dos clones ensaiados nessa pesquisa (3 anos) e a condição do ensaio (saturado), o valor do módulo de elasticidade obtido nesse trabalho foi superior, e a variabilidade foi, também, muito mais elevada.

O valor médio do módulo de ruptura em flexão obtido por Trugilho *et al.* (2007) para os 4 clones avaliados, utilizando corpos de prova, foi de 103,4 MPa (CV de 13,4%), muito superior ao obtido nesse trabalho que foi de 49,1 MPa com CV de 31,1%.

No trabalho de Ferreira *et al.* (2010), cuja metodologia de ensaio das árvores foi próxima à utilizada nessa pesquisa, o momento de ruptura (denominado módulo de ruptura nessa pesquisa) dos 4 clones de 2 anos de idade variou de 29,7 MPa a 56,8 MPa com média de 46,4 MPa. Nessa pesquisa o valor médio do MR foi 59,4 MPa com valor mínimo de 13,6 MPa e máximo de 273,5 MPa). Nesse trabalho o módulo de elasticidade médio obtido na árvore (esquema estático engastado-livre) foi de 2129 MPa. Ferreira *et al.* (2010) não determinaram o módulo de elasticidade na árvore, mas os valores médios do módulo de elasticidade e resistência obtidos em flexão de corpos de prova retirados dos clones foi de 4000 MPa e 70 MPa, respectivamente.

Tendo em vista as diferenças entre os esquemas estáticos utilizados pelos vários autores nos ensaios, os dados não podem ser diretamente comparados, mas a comparação é importante na avaliação da ordem de grandeza dos valores.

Normalmente correlações significativas são obtidas entre o módulo de elasticidade e a resistência, obtidas em flexão. Trabalho realizado por Rocha *et al.* (1988) com 21 espécies de madeiras nativas na condição saturada, utilizando corpos de prova, indica coeficientes de correlação da ordem de 0,64. Dados de Trugilho *et al.* (2007) provenientes da avaliação de 15 clones de eucalipto indicam coeficiente de correlação de 0,90 para a resistência e a rigidez de corpos de prova retirados dos clones. Trugilho *et al.* (2007) demonstram que os clones tinham porcentagens de lignina estatisticamente diferentes e que, mesmo assim, os módulos de elasticidade e as resistências obtidas em ensaio de flexão não apresentavam diferenças estatísticas entre os clones.

Neste trabalho, considerando os valores médios de cada clone, a correlação entre a resistência e o módulo de elasticidade obtidos em ensaio de flexão das toras foi significativa

(P-valor = 0,0000) com coeficiente de correlação de 0,85. No caso do módulo de resistência (MR) e o módulo de elasticidade obtido nas árvores a correlação também foi significativa (P-valor de 0,0000) e o coeficiente de correlação foi de 0,88. Esse resultado indica que o comportamento do ensaio, na árvore e na tora, foi dentro do esperado para a madeira e compatível com outros autores.

Conforme já observado em outras pesquisas do grupo de Pesquisa do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (LabEND) da FEAGRI (GONÇALVES *et al.* 2011), a velocidade de propagação de ondas medidas na árvore em pé é afetada por parâmetros que fazem com que o seu valor não seja igual ao obtido em troncos das mesmas árvores, mesmo que passem por medição imediatamente após o corte. O estado de tensões ao qual o fuste da árvore está submetido e a forma de medição (indireta na árvore em pé) afetam a propagação da onda, de forma que as correlações das velocidades mensuradas diretamente na árvore com a rigidez das peças de madeira dela retiradas são muito inferiores às obtidas com resultados de velocidade obtidos em toras recém abatidas, nas quais a medição da propagação da onda é direta.

Bertoldo (2011) verificou que, embora os modelos de regressão entre a velocidade medida diretamente na árvore e a rigidez de vigas dela retiradas sejam estatisticamente significativos, a correlação (R) é fraca quando se tomam valores individuais. Para clones de Eucalipto a autora obteve coeficiente de correlação de 0,37 entre a velocidade na árvore e o módulo de elasticidade em flexão em vigas retiradas desses clones.

Grupo de pesquisa da empresa *Madera Plus Calidad Forestal*, Espanha, obteve, também considerando valores individuais, coeficiente de correlação em torno de 0,30 para a madeira adulta, utilizando também modelos de regressão envolvendo medições de velocidade na árvore viva e a rigidez de vigas retiradas dessas mesmas árvores. Nos trabalhos citados não foi estudada a correlação entre a velocidade de propagação na árvore em pé e a rigidez do fuste das árvores ou de toras delas retiradas, mas sim de vigas obtidas das toras.

Trabalhos realizados por Wang *et al.* (2004 e 2007), citados no capítulo de revisão bibliográfica, apontam para a influência do diâmetro da árvore na velocidade de propagação das ondas de ultrassom medidas nas árvores vivas.

Considerando os dados gerais dessa pesquisa (resultados para as 189 árvores – todos os clones) observa-se, também, que o diâmetro da árvore tem influência estatisticamente significativa, com nível de significância de 95%, na velocidade de propagação das ondas de

ultrassom obtidas na árvore viva (P-valor < 0,05). Os coeficientes de correlação e de determinação não são elevados, mas a tendência demonstrada pelo modelo é que há redução da velocidade com o aumento do diâmetro da árvore. A Tabela 4. 2 resume os resultados da análise estatística.

Tabela 4. 2. Análise estatística da variação da velocidade (média e mínima) obtida na árvore viva em função do diâmetro da árvore.

Modelo	R	R² (%)	Pvalor
$V_{Lméd} (m.s^{-1}) = 5797 - 152,7 \ Ø (mm)$	-0,49	24	0,0000
$V_{Lmin} (m.s^{-1}) = 5788 - 165,6 \ Ø (mm)$	-0,49	24	0,0000

Esse resultado e as observações de outros pesquisadores, citados na revisão bibliográfica a respeito da influência do diâmetro da árvore na velocidade de propagação das ondas de ultrassom, indicam a importância de se verificar, nos modelos de regressão entre a velocidade na árvore viva e as propriedades mecânicas obtidas por meio de métodos estáticos, se a inserção do diâmetro da árvore melhora o coeficiente de determinação (R²).

A amostragem nessa pesquisa (21 diferentes clones) foi adotada visando avaliar a sensibilidade do ensaio de ultrassom, aplicado diretamente na árvore viva, para a separação de clones com diferentes resistências ao vento. Por outro lado, com base na revisão bibliográfica, assumiu-se que a maior ou menor resistência dos clones ao vento estaria associada à sua rigidez. Assim, embora não seja o objetivo direto dessa pesquisa, o estudo das correlações entre o ensaio de ultrassom na árvore e a rigidez e resistência, mensurada nesse trabalho por meio de ensaios de flexão no fuste e na tora, era importante.

A determinação de modelos para a inferência de propriedades de resistência e de rigidez de um determinado clone por meio da velocidade de propagação de ondas de ultrassom obtidas nas árvores vivas não permite resultados conclusivos, já que o número de pares de cada clone é pequeno para essa finalidade. Assim, a análise dos modelos de regressão (Tabela 4. 3) foi realizada utilizando-se a média de resultados de cada um dos 21 clones estudados, ou seja, o grupo amostral. Nos casos em que a regressão não foi significativa (P-valor > 0,05) os modelo e os coeficientes de correlação e de determinação não foram apresentados.

Tabela 4. 3. Modelos de regressão e parâmetros de análise das correlações utilizando os 21 clones estudados.

	Modelo	P-valor	R	R² (%)
$f_{mt} \times E_{Mt}$	$f_m = 23,8 + 0,0038* E_{Mt}$	0,0000	0,85	71,5
$MR \times E_{Ma}$	$MR = 28,5 + 0,0146* E_{Ma}$	0,0000	0,88	77,0
$E_{Mt} \times V_{Lmin}$	$E_{Mt} = -5488 + 3,26*V_{Lmin}$	0,0048	0,53	34,9
$E_{Mt} \times V_{Lmin} \text{ e } \phi$	$E_{Mt} = 3899 + 2,26*V_{Lmin} - 448*\phi$	0,0055	-	43,9
$E_{Ma} \times V_{Lmin}$	$E_{Ma} = -8591 + 2,90*V_{Lmin}$	0,0000	0,79	62,4
$E_{Ma} \times V_{Lmin} \text{ e } \phi$	$E_{Ma} = -11153 + 3,18*V_{Lmin} + 122*\phi$	0,0001	-	64,0
$f_{mt} \times V_{Lmin}$	-	0,1102*	-	-
$f_{mt} \times V_{Lmin} \text{ e } \phi$	-	0,2528*	-	-
$MR \times V_{Lmin}$	$MR = -121 + 0,049*V_{Lmin}$	0,0000	0,80	64,4
$MR \times V_{Lmin} \text{ e } \phi$	$MR = -143 + 0,051*V_{Lmin} + 1,08*\phi$	0,0001	-	64,8

*Modelo não significativo

V_{Lmin} = velocidade mínima obtida nas árvores

E_{Mt} e f_{mt} = módulo de elasticidade e de ruptura obtidos em ensaio de flexão das toras

E_{Ma} e MR = módulos de elasticidade e de resistência obtidos nos ensaios de flexão das árvores

ϕ = diâmetro do fuste no DAP.

Por meio da Tabela 4. 3 verifica-se que, considerando o grupo amostral estudado, os ensaios de flexão na árvore (engastado-livre) e na tora (bi-apoiado) mostraram resultados coerentes, pois as correlações entre o módulo de elasticidade e de resistência nas toras e entre o módulo de elasticidade e de resistência nas árvores foram significativas e dentro do esperado para esse material (madeira).

Os valores de módulo de elasticidade obtidos na árvore e na tora não foram estatisticamente equivalentes, pois o intervalo de confiança entre as diferenças de médias variou de 3834 MPa a 5272 MPa, não contendo, portanto, o zero. Os valores dos módulos de elasticidade obtidos com o ensaio bi-apoiado, na tora, foram muito superiores aos obtidos em ensaio engastado-livre, no fuste. Tendo em vista se tratar do mesmo material esse resultado (módulos de elasticidade diferentes), em princípio, não é esperado. No entanto, se devem levar em conta, na análise desse resultado, dois aspectos que podem explicar a diferença.

O primeiro ponto se refere à diferença de propriedades da madeira ao longo da altura do tronco, questão essa refletida nos dois tipos de ensaios, já que no caso da tora apenas parte do tronco está sendo analisado, enquanto no caso do ensaio engastado-livre grande parte do fuste da árvore está sendo testado. Outra questão a ser apontada nessa discussão é o ponto de medição do deslocamento do fuste da árvore no ensaio engastado-livre. Tendo em vista a idade das árvores (3 anos), a tração é exercida em uma zona do fuste com diâmetro muito pequeno, conforme pode ser visto na Figura 3. 2. Embora a equação utilizada para calcular o módulo de elasticidade no esquema estático engastado-livre leve em conta a circunferência no ponto de aplicação da carga e no engastamento, essa zona do fuste de árvores muito jovens é muito flexível, fazendo com que os deslocamentos utilizados no cálculo do módulo de elasticidade sejam muito grandes, provavelmente interferindo nos resultados.

A diferença entre os módulos de elasticidade obtidos com os dois esquemas estatísticos, no entanto, não afeta o resultado dessa pesquisa, uma vez que as análises de correlação com o ensaio de ultrassom na árvore são independentes.

Pelos resultados da Tabela 4.3 verifica-se que os modelos de correlações entre a velocidade de propagação das ondas de ultrassom obtidas nas árvores vivas e a rigidez obtida nos ensaios de flexão das toras foram significativos, mas os coeficientes de correlação foram baixos. Os modelos de correlação da velocidade com a resistência à flexão não foram significativos. Por outro lado, os modelos entre a velocidade de propagação das ondas de ultrassom obtidas nas árvores vivas e a rigidez obtida nos ensaios de flexão das árvores são significativos e apresentam coeficientes de correlação considerados muito bons para a madeira (cerca de 0,80). A variabilidade do módulo de elasticidade e de resistência obtida no ensaio da árvore é 62,4% e 64,4% explicada pela velocidade mensurada na árvore viva, respectivamente. Esse resultado é particularmente importante para essa pesquisa, porque o efeito do vento nas árvores parece ser muito mais adequadamente simulado pelo ensaio engastado-livre do que pelo ensaio bi-apoiado. Assim, é possível que esse ensaio esteja incluindo variáveis importantes nessa análise que não poderiam ser mensuradas no ensaio da tora.

Considerando as regressões múltiplas com a inclusão do diâmetro da árvore verificou-se que esse parâmetro (densidade) não foi estatisticamente significativo no modelo (P-valor do parâmetro densidade > 0,05). Apesar disso os coeficientes de determinação sofreram ligeiro aumento e pôde ser verificado, visualmente, melhor ajuste dos pontos de medição ao modelo.

Esse resultado, associado aos resultados de outros autores que indicaram a influência do diâmetro na velocidade de propagação das ondas de ultrassom em árvores vivas, sugere que essa questão deva ser melhor estudada e, também, que esse parâmetro deva ser associado às medições de velocidade durante medições em árvores, já que essa medição não dificultaria o ensaio, nem implicaria em grande aumento de tempo.

Conforme já destacado anteriormente, o foco principal dessa pesquisa foi a avaliação do ultrassom como ferramenta de classificação de clones com maior resistência ao vento, tendo como base a suposição de que a resistência ao vento estaria diretamente relacionada com a rigidez do fuste da árvore e que, a rigidez, tem relação com a velocidade de propagação das ondas de ultrassom nas árvores.

Considerando que todos os parâmetros avaliados tiveram variabilidades altas, a análise de como cada parâmetro (velocidade, módulo de elasticidade, módulo de ruptura e módulo de resistência) variou entre os clones deve ser feita considerando, também, o efeito do horto. Para realizar essa análise foi utilizado o teste estatístico de ANOVA com múltiplos fatores. Esse teste permite avaliar a variância de cada parâmetro considerando – clone e horto. Essa estatística utiliza testes para determinar quais fatores têm influência significativa no parâmetro avaliado (variável dependente) e também a interação entre os fatores.

A Tabela 4. 4 resume as classificações dos clones utilizando como variáveis dependentes a velocidade mínima ($V_{\min}$), o módulo de elasticidade obtido na flexão das toras (E_{Mt}), o módulo de elasticidade obtido em flexão das árvores (E_{Ma}) e o módulo de resistência (MR) obtido no ensaio de flexão das árvores. A resistência à flexão obtida nas toras (f_{mt}) não foi utilizada nessa análise por não ter apresentado correlação estatisticamente significativa com a velocidade. A velocidade mínima foi adotada para essa classificação por ser a que apresentou melhores correlações com os parâmetros de flexão.

Tabela 4. 4. Resumo das classificações dos clones utilizando como variáveis dependentes a velocidade mínima (V_{min}), o módulo de elasticidade obtido na flexão das toras (E_{Mt}) e das árvores (E_{Ma}) e o módulo de resistência (MR) obtido no ensaio de flexão das árvores.

Classificação	V_{min} m.s⁻¹	Classificação	E_{Mt} MPa	Classificação	E_{Ma} MPa	Classificação	MR MPa
31	3305a	77	4893 ^a	77	1248a	31	39,5a
7	3341a	7	4967 ^a	53	1295a	77	41,0a
77	3402b	3	5011 ^a	7	1315a	53	44,2a
8	3463b	6	5213b	31	1326a	97	44,7a
53	3578c	41	5348b	97	1328a	7	47,9b
97	3591c	97	5503c	34	1461a	34	49,1b
3	3599d	31	5511c	41	1562b	3	51,3b
43	3665d	86	6103c	59	1761b	41	51,6b
99	3674d	43	6295d	3	1817b	100	56,0b
10	3684d	8	6366d	6	1967b	6	58,9b
34	3690e	99	6383d	15	2042c	99	60,7b
6	3712e	42	6883e	8	2089c	8	61,9b
42	3736e	92	7136e	100	2111c	10	63,9b
15	3760e	10	7196e	43	2325c	15	64,1b
100	3815f	100	7441e	10	2415c	42	64,5b
41	3840f	59	7456e	42	2722c	43	67,4b
59	3845f	15	7635e	99	2733c	59	69,3b
98	3883g	34	8164f	98	2917c	86	74,1b
95	3969h	95	8479f	95	2928c	95	74,7b
86	4051i	98	9198g	92	4170d	98	85,9c
92	4181j	53	9708g	86	4604e	92	86,2c

*Letras iguais indicam que não há diferença estatística entre os clones para a variável considerada

Verifica-se, pela Tabela 4. 4 que velocidade obtida pela medição na árvore teve maior sensibilidade na classificação, porque conseguiu diferenciar, estatisticamente, maior número de grupos diferentes (10) entre os clones. Utilizando o módulo de elasticidade obtido em flexão na tora foi possível diferenciar 7 grupos diferentes, com o módulo de elasticidade obtido na flexão da árvore 5 grupos e com o módulo de resistência obtido na flexão da árvore apenas 3 grupos diferentes.

Para a velocidade mínima na árvore, além do clone, o horto exerceu influência estatisticamente significativas ($P\text{-valor} = 0,0000$ para ambos). O horto 3 se diferenciou dos demais com a maior velocidade média (4682 m.s^{-1}) enquanto os hortos 1 e 2 apresentaram médias 3184 m.s^{-1} e 3246 m.s^{-1} , respectivamente, e foram considerados estatisticamente equivalentes, como demonstrado na Figura 4. 2.

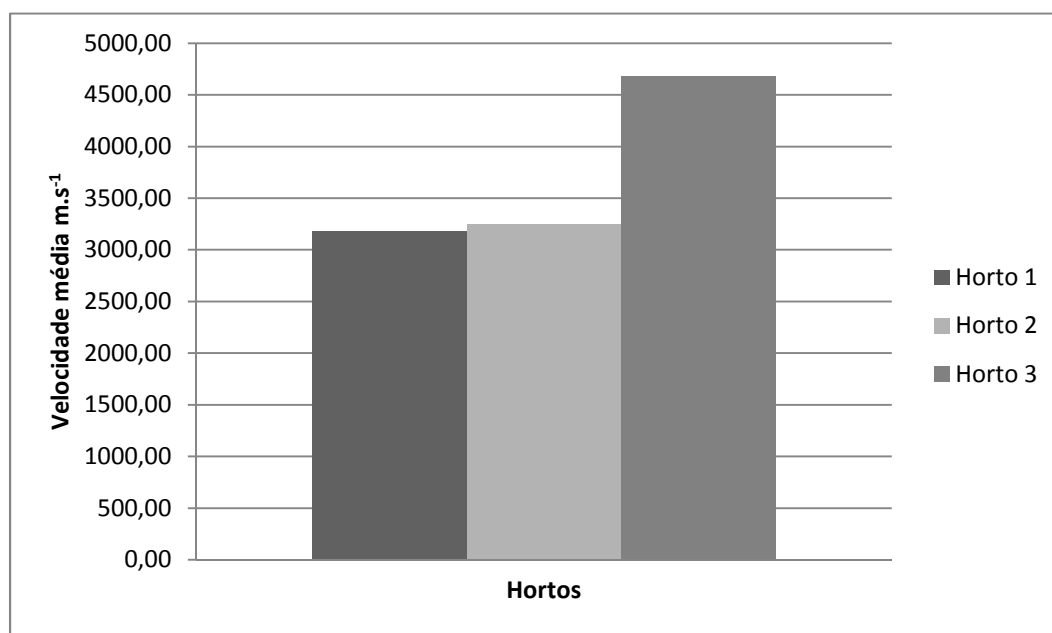


Figura 4. 2 Velocidade de ultrassom média na árvore m.s^{-1}

Para o módulo de elasticidade obtido na flexão estática das toras e das árvores e para o módulo de resistência obtido no ensaio estático das árvores o horto 1 foi estatisticamente diferente dos demais e com a menor média.

A análise da esbeltez da árvore viva foi estudada nessa pesquisa apenas como forma de analisar a possível influência desse parâmetro na rigidez da madeira formada pela árvore. Uma vez que os dados necessários para essa análise foram recuperados apenas para o horto 3.

Tendo em vista que todas as árvores deste horto possuem praticamente a mesma idade, a menor esbeltez poderia indicar um crescimento mais rápido do clone em diâmetro do que em altura, e o intuito foi, portanto, analisar se essa característica teria influência na rigidez, analisada nesse trabalho por meio da velocidade de propagação da onda na árvore viva e pelos ensaios de flexão. Assim, avaliações de correlação foram realizadas com a esbeltez, embora essa esbeltez não seja a do ensaio, mas sim da árvore viva.

A esbeltez dos clones do horto 3 variou de 859 a 1397 com média 1140 e coeficiente de variação de 9%. A distribuição dos resultados foi normal (curtose e assimetria com valores entre -2 e +2).

Adicionalmente é importante destacar que a maior altura de uma árvore indica maior peso a ser suportado, sendo esse um dos parâmetros que tem sido indicado como possível causador da diferença entre a velocidade de propagação na árvore viva e na tora recém-abatida.

Utilizando somente os resultados médios de cada clone do horto 3, foram avaliadas as correlações (Tabela 4. 5) entre a esbeltez (λ) e os parâmetros velocidade mínima ($V_{\min}$), módulo de elasticidade (E_{Ma}) e módulo de resistência (MR) obtidos no ensaio de flexão. Esses parâmetros foram os adotados nessa análise por terem sido os que melhores se correlacionaram na avaliação completa apresentada na Tabela 4.3.

É importante destacar que as correlações obtidas considerando apenas o horto 3 não apresentam coeficientes tão bons quanto os obtidos na avaliação de todos os hortos. Esse resultado é esperado, uma vez que a obtenção de modelos de correlação adequados exige variabilidade da amostra. O coeficiente de variação da velocidade mínima da amostra considerando todos os hortos foi de 46% enquanto para o horto 3 considerado de forma isolada foi de apenas 5%. Apesar disso todos os modelos de correlação foram estatisticamente significativos (P-valor < 0,05).

Tabela 4. 5. Modelos de regressão e parâmetros de análise das correlações utilizando os 21 clones estudados no Horto 3.

	Modelo	P-valor	R	R² (%)
$V_{L\min} \times \lambda$	$V_{L\min} = 2672 + 1,76 * \lambda$	0,0030	0,62	37,9
$E_{Ma} \times \lambda$	$E_{Ma} = -6214 + 7,14 * \lambda$	0,0426	0,45	19,9
$MR \times \lambda$	$MR = -56,5 + 0,091 * \lambda$	0,0500	0,43	18,7
$E_{Ma} \times V_{L\min}$	$E_{Ma} = -12151 + 3,00 * V_{L\min}$	0,0119	0,54	28,9
$E_{Ma} \times V_{L\min} \text{ e } \lambda$	$E_{Ma} = -12545 + 2,37 * V_{L\min} + 2,96 * \lambda$	0,0055	-	31,1
$MR \times V_{L\min}$	$-137 + 0,04 * V_{L\min}$	0,0125	0,53	28,6
$MR \times V_{L\min} \text{ e } \lambda$	$MR = -141 + 0,032 * V_{L\min} + 0,04 * \lambda$	0,0387	-	30,3

$V_{L\min}$ = velocidade mínima obtida nas árvores

E_{Ma} e MR = módulos de elasticidade e de resistência obtidos nos ensaios de flexão das árvores

λ = esbeltez do fuste (árvore viva).

Verifica-se, por meio da Tabela 4. 5, que tanto a velocidade na árvore quanto a rigidez obtida no ensaio de flexão do fuste aumentam com o aumento da esbeltez da árvore viva.

No caso da velocidade a explicação pode estar atrelada ao fenômeno acustoelástico, ou seja, na variação da velocidade em função do estado de tensões ao qual a árvore está submetida. Resultados anteriores do grupo (ainda não publicados) indicam que para as folhosas submetidas a compressão a velocidade aumenta com o aumento da tensão. Em árvores de folhosas Gonçalves *et al.* (2011) observaram que a velocidade na árvore é superior à velocidade na tora recém-abatida, indicando a questão do estado de tensões como sendo um dos aspectos responsáveis por esse resultado.

Observa-se, pela Tabela 4.5, que embora os ganhos em termos de significância do modelo ou de coeficientes de determinação sejam pequenos, assim como no caso do diâmetro é importante que pesquisas subsequentes permitam estudar melhor a utilização desses parâmetros, associados à velocidade de propagação das ondas em árvores vivas, na inferência de propriedades de rigidez da própria árvore ou da madeira dela obtida.

5. CONCLUSÕES

A velocidade de propagação de ondas de ultrassom, obtida diretamente nas árvores, apresentou correlações significativas com a rigidez obtida em ensaio de flexão que simulou a carga de vento por meio da aplicação de tração nas proximidades do topo do fuste. Essa velocidade também permitiu diferenciar os clones e essa diferenciação foi compatível com a obtida utilizando a rigidez dessas mesmas árvores. Assim, se a premissa de que a rigidez do fuste da árvore é uma das principais responsáveis pela resistência ao vento, a hipótese dessa pesquisa foi comprovada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDIS, T.; BUCHANAN, A. H.; WALKER, J. C. F. **Selecting trees for structural timber.** *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, Springer Berlin, p. 162-167. 19 out. 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 198-08 Static tests of Timbers in Structural Sizes. Philadelphia, Pa, USA, 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 1036: Standard test methods of static test of wood poles. Philadelphia, Pa, USA, 1997.

AMISHEV, Dzhamal; MURPHY, Glen E. **In-forest assessment of veneer grade Douglas-fir logs based on acoustic measurement of wood stiffness.** *Forest Products Journal*, Inist-cnrs, Cote Inist, v. 58, n. 11, p. 42-47. 2008.

ANDREWS, M. Where are we with sonics? **In: Proceedings, Capturing the benefits of forestry research: Putting ideas to work, Workshop 2000.** Wood Technology Research Center, University of Canterbury. p. 57-61, 2000

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – NBR 15521/2007 - Ensaio não destrutivo — Ultra-som — Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas. 8p. Rio de Janeiro(RJ), 2007.

AUTY, D.; ACHIM, A. **The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands.** *Wood Science and Technology*, v. 81, n. 4. doi: 10.1093/forestry/cpn015, 2008

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, Marcelo. O ultra-som como ferramenta na classificação de peças de *Pinus taeda* L.. In: 1º Seminário sobre a aplicação de ensaios não-destrutivos em madeira e materiais à base de madeira, Itatiba - SP. **Anais do 1º madeira Seminário sobre a aplicação de ensaios não-destrutivos em madeira e materiais à base de madeira**. São Paulo: ABENDE, p. 1-9, 2006.

BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R.; BUCUR V. **Dispersion of ultrasonic waves in Eucalyptus lumber as a function of the geometry of boards** . Scientia Forestalis, n. 63, p. 235-240, jun. 2003.

BARTHOLOMEU, André ; GONÇALVES, R. **Prediction of the Module of Elasticity (MOE) in Beams of Eucalyptus using the Longitudinal velocity of ultrasonic waves**. E-Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics, v. 12, p. 4853, 2007.

BERTOLDO, C.; GONÇALVES, R.; MASSAK, M. V.; SECCO, C. Assessment of Wood Quality by Tree Evaluation Using Ultrasound. **Anais do XIII Congresso Florestal Mundial**, Buenos Aires. XIII World Forestry Congress, 2009. v. 1. p. 1-11.

BERTOLDO, Cinthya. **Estimativa de propriedades de rigidez da madeira a partir de avaliação acústica na árvore e em toras recém abatidas**. 2011. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola - Feagri, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2011

BERTOLDO, C.; GONÇALVES, R.; MASSAK, M. V.; SECCO, C. **Relationship between tre Velocity of Ultrasound Waves Propagation on logs and the Modulus of Elasticity of the Beans**. In: 16th International Symposium on Nondestructive Testing and Evaluation of Wood, Beijing. Proceedings of the 16th International Symposium on Nondestructive Testing and Evaluation of Wood, 2009. v. 1. p. 304-304

BRASHAW, B.K.; BUCUR, V.; Divos, F.; GONÇALVES, R.; Lu, J.X.; MEDER, R.; PELLERIN, R.; POTTER, S.; Ross, R.J.; WANG, X.; Yin, Y. **Nondestructive Testing and Evaluation of Wood A Worldwide research update**. Forest Products Journal, v. 59, p. 7-14, 2009.

FERREIRA, Sérgio.; LIMA, José Tarcísio.; TRUGILHO, Paulo Fernando.; DA SILVA, José Reinaldo Moreira.; ROSADO, Antonio Marcos.; MONTEIRO Thiago Campos. **Resistência mecânica de caules de clones de eucalyptus cultivados em Diferentes topografias**. Cerne, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 133-140, jul.2010

GONÇALVES, Raquel.; Bertoldo Pedroso, Cinthya.; MASSAK, Marcus Vinicius.; BATISTA, Fernando.; SECCO, Chiara Barros.; **Velocity of ultrasonic waves in live trees and freshly-felled logs**. Wood and Fiber Science, v. 43, n. 2, p. 232-235, 2011.

GONÇALVES, R.; BARTHOLOMEU, A. **Avaliação do desempenho de ensaios não destrutivos em vigas de madeira de Eucalyptus citriodora e Pinus elliottii**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.4, n.2, p.269-274, 2000.

GRABIANOWSKI M.;, MANLEY B.; WALKER, J.C.F. **Acoustic measurements on standing trees , logs and green lumber**. Wood Science and Technology, v. 40, p. 205-216, 2006.

LINDSTROM, H.; HARRIS, P.; SORENSSON, C. T.; EVANS, R. **Stiffness and wood variation of 3-year old Pinus radiata clones**. Wood Science and Technology, v. 38, p. 579-597, 2004.

MELO, V. M. **Variações nas propriedades da madeira de clones de Eucalyptus cultivados em diferentes topografias e sujeitos a tempestades**. Apresentação(2006).

MILNE, R.; BLACKBURN, P. **The elasticity and vertical distribution of stress within stems of Picea sitchensis**. Tree Physiology, v. 5, p. 195-205, 1989.

MINÁ, A. J. S.; DIAS, A.; CÁLIL JÚNIOR, C. **Avaliação da rigidez e da resistência de postes de madeira para uso como estacas para fundações.** IX ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. *Anais...*, 2004. CUIABÁ.

ROCHA, Jadir de Souza; PAULA, Estevão VCM; SIQUEIRA, Milton. **Flexão estática em amostras pequenas e livres de defeitos.** Laboratório de Engenharia da Madeira do Centro de Pesquisa de Produtos Florestais. <http://acta.inpa.gov.br/fasciculos/18-2/PDF/v18n2a14.pdf>

ROTH, B. E.; LI, X.; HUBER, D. A.; PETER, G. F. **Effects of management intensity , genetics and planting density on wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the southeastern USA.** *Forest Ecology and Management*, v. 246, p. 155-162. doi: 10.1016/j.foreco.2007.03.028, 2007

TRINCA, Alex Julio. **Influência da dimensão do corpo de prova, no ensaio destrutivo, compressão paralela às fibras, e não-destrutivos, utilizando ultra-som.** Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2006. 137p

TRUGILHO, Paulo Fernando.; BIANCHI, Maria Lúcia.; ROSADO, Sebastião Carlos da Silva.; LIMA, José Tarcísio. **Wood quality of natural hybrid and species of Eucalyptus clones.** *Scientia Forestalis*, n. 73, p. 55-62, março 2007

TSEHAYE, A.; BUCHANAN, A. H.; WALKER, J. C. F. **Selecting trees for structural timber.** *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 58, p. 162-167, 2000.

WANG, X.; ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PUNCHES, J.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; PELLERIN, F. R. **Diameter effect on stress-wave evaluation of modulus of elasticity of logs.** *Wood Science and Technology*, v. 36, p. 368-377, 2004.

WANG, X.; ROSS, R. J.; CARTER, P.; HARVEY, C. H. **Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. part I . ACOUSTIC WAVE BEHAVIOR.** *Wood Science and Technol*, v. 39, n. 1, p. 28-38, 2007.

WANG, X.; ROSS, R. J.; MATTSON, J. A.; ERICKSON, J.R.; GAESKE, E. A.; FORSMAN, J. W. **Nondestructive evaluation techniques for assessing modulus of elasticity and stiffness of small-diameter logs**. Forest Products Journal, v. 52, n. 2, p. 79-85, 2002.

WANG, X.; ROSS, R. J.; McCLELLAN, M.; BARBOUR, R.J.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; MCGINNIS, G. D. **Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method**¹. Wood And Fiber Science, v. 33, n. 4, p. 522-533, 2001.

WU, S.; XU, J.; LI, G.; RISTO, V. **Genotypic variation in wood properties and growth traits of Eucalyptus hybrid clones in southern China**. New Forests, v. 42, p.35-50, 2011.