UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES DE RIGIDEZ DA MADEIRA A PARTIR DE AVALIAÇÃO ACÚSTICA NA ÁRVORE E EM TORAS RECÉM ABATIDAS

CINTHYA BERTOLDO PEDROSO

CAMPINAS

FEVEREIRO DE 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES DE RIGIDEZ DA MADEIRA A PARTIR DE AVALIAÇÃO ACÚSTICA NA ÁRVORE E EM TORAS RECÉM ABATIDAS

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora para obtenção do titulo de mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração em Construções Rurais e Ambiência

CINTHYA BERTOLDO PEDROSO

Orientadora: Raquel Gonçalves

CAMPINAS

FEVEREIRO DE 2011

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

P343e	Pedroso, Cinthya Bertoldo Estimativa de propriedades de rigidez da madeira a partir de avaliação acústica na árvore e em toras recém abatidas / Cinthya Bertoldo PedrosoCampinas, SP: [s.n.], 2011.
	Orientador: Raquel Gonçalves. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.
	1. Pinus elliottii. 2. Eucalyptus grandis. 3. Ultra- som. I. Gonçalves, Raquel. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Acoustic assessment from the tree and the freshly-felled logs for estimating wood stiffness Palavras-chave em Inglês: Pinus elliottii, Eucalyptus grandis, Ultrasound Área de concentração: Construções Rurais e Ambiência Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola Banca examinadora: Claudio Henrique Soares Del Menezzi, Domingos Guilherme Pelegrino Cerri Data da defesa: 17/02/2011 Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Cinthya Bertoldo Pedroso**, aprovado pela Comissão Julgadora em 17 de fevereiro de 2011, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



AGRADECIMENTOS

À Professora Raquel, minha orientadora, por acreditar em mim e me mostrar o caminho da ciência, estando comigo em muitos momentos, sendo exemplo de profissional e mulher.

Aos amigos do Lab E.N.D. que sempre estiveram presentes não só na realização dos ensaios como também nos momentos de descontração.

Ao Marcus Vinícius Massak, companheiro de pesquisa, pela parceria nos trabalhos, seriedade e comprometimento.

À minha família, em especial aos meus pais, que são tudo na minha vida, por todo amor que sempre me dedicaram e por todas as portas que se abriram graças à educação que me proporcionaram.

Ao Edinho, que está sempre presente, dividindo todos os momentos da minha vida, deixando os felizes ainda mais felizes e os ruins nem tão difíceis.

Aos meus amigos que são minha "válvula de escape" em todos os momentos.

Às Empresas Rota Madeiras e Duraflora e seus funcionários, o engenheiro florestal Manoel Ricardo Jungles e Raul Chaves, que viabilizaram a pesquisa ao disponibilizar e fornecer as árvores de suas florestas e o tempo de seu trabalho para nos acompanhar nas atividades de campo.

Ao engenheiro agrônomo Rommel Alexandre Sauerbronn da Cunha por ter entrado em contato com o produtor florestal Mário Arai, além de ter acompanhado os trabalhos de campo.

À CAPES pela bolsa de estudos e à FAPESP e ao CNPq pelo apoio financeiro à pesquisa.

iv

Uma paixão forte por qualquer objeto assegurará o sucesso, porque o desejo pelo objetivo mostrará os meios.

William Hazlitt

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOSiv		
LISTA DE FIGURAS viii		
LISTA DE TABELASx		
RESUMO		
ABSTRACT		
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DE ESTUDO1		
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA		
2.1 Introdução		
2.2 Classificação visando a detecção de defeitos e sua correlação com propriedades4		
2.3 Classificação mecânica		
2.4 Aspectos relativos à propagação de ondas em meios materiais10		
2.5 Madeira juvenil e tratamentos silviculturais11		
2.6 Conclusão da revisão bibliográfica14		
3. MATERIAL E MÉTODOS15		
3.1 Material15		
3.2 Principais Equipamentos15		
3.3 Metodologia		
3.3.1 Retirada das toras		
Figura 3.5- (a) Representação da retirada das toras de Pinus eliiottii (Fonte: Massak, 2010). (b) Representação da retirada das toras de Eucalipto grandis (Fonte: Massak,		
2010)		
3.3.2 Retirada das vigas		
3.3.3 Ensaios		
3.3.4 Análise dos resultados		
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES		
4.1 Apresentação e análise geral dos resultados		
4.2 Avaliação acústica na árvore como parâmetro de previsão de propriedades da madeira dela proveniente		
4.3 Avaliação acústica na tora como parâmetro de previsão de propriedades da madeira dela proveniente		

Z	1.4 Velocidade de ultrassom na árvore, na tora e na viga saturada	51
5.	CONCLUSÕES	57
6.	SUGESTÃO PARA CONTINUIDADE DOS ESTUDOS	58
RE	FERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
AN	IEXOS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Equipamento de ultrassom (USLab)16
Figura 3.2- (a) Transdutores de faces planas. (b) Transdutores de faces exponenciais16
Figura 3.3- Pórtico com atuador hidráulico para ensaio de estruturas17
Figura 3.4- Medidor de umidade Merlin (PM1-E)17
Figura 3.5- (a) Representação da retirada das toras de Pinus eliiottii (Fonte: Massak, 2010). (b)
Representação da retirada das toras de Eucalipto grandis (Fonte: Massak, 2010)19
Figura 3.6 - Identificação do número da árvore e da posição de retirada em relação ao
comprimento (Eucalyptus grandis)19
Figura 3.7- Esquema de retirada das vigas de uma tora (Fonte: Massak, 2010)20
Figura 3.8- Medição indireta com propagação da onda na direção paralela às fibras21
Figura 3.9- Furação no tronco para a introdução do transdutor de face exponencial22
Figura 3.10- Medição na árvore com o uso do transdutor exponencial23
Figura 3.11- Medição de ultrassom nas toras25
Figura 3.12- Medições na seção transversal (Fonte: NBR 15521/2007)26
Figura 3.13- Esquema do ensaio da viga. Fonte: ASTM D198-08 (2008)28
Figura 4.1 – Exemplo de gráfico de probabilidade normal. Dados: E _M das vigas de Eucalipto
grandis35
Figura 4.2- Comportamento da relação entre a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore
(V _{a.L}) e o módulo de elasticidade (E _M) considerando as diferentes espécies avaliadas36
Figura 4.3- Comportamento da relação entre a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore
(V _{a.L}) e o módulo de ruptura (f _m), considerando as diferentes espécies avaliadas36
Figura 4.4- Regressão entre a velocidade de ultrassom longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$) e o
módulo de elasticidade (E _M) na viga para o Pinus Elliottii e o Eucalipto grandis40
Figura 4.5- Regressão entre a velocidade de ultrassom longitudinal na árvore ($V_{a,L}$) e o
módulo de ruptura (f _m) na viga para o Pinus Elliottii e o Eucalipto grandis40
Figura 4.6- Número de vigas classificadas e não classificadas (N. C.), de acordo com as faixas
da AS 2878 (SAA, 1986b)43
Figura 4.7- Relação entre a velocidade longitudinal na árvore (V _{a.L.}) e a classificação das vigas

segundo as faixas da norma australiana (AS2878 - SAA,1986b)......43

- Figura 4.8- Comportamento da relação entre a velocidade de ultrassom longitudinal na tora (V_T) e o módulo de elasticidade (E_M) considerando as diferentes espécies avaliadas.....45
- Figura 4.9- Comportamento da relação entre a velocidade de ultrassom longitudinal na tora (V_T) e o módulo de ruptura (f_m), considerando as diferentes espécies avaliadas......45

- Figura 4.12- Relação entre a velocidade longitudinal na tora (V_T) e a classificação das vigas segundo as faixas da norma australiana (AS 2878 SAA,1986b)......50

- Figura 4.15- (a) Relação entre a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T) e a velocidade longitudinal de ultrassom na viga saturada (V_{LLsat}). (b) Regressão linear entre a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T) e a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T) e a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_{LLsat}).

LISTA DE TABELAS

saturada (V_{LLsat}) e entre a velocidade longitudinal na tora (V_T) e na viga saturada Tabela 4.13- Valores das relações obtidas a partir da velocidade longitudinal média na árvore e na tora $(V_{a,L}/V_T)$, na árvore e na viga saturada $(V_{a,L}/V_{LLsat})$ e na tora e na viga saturada Tabela A 1 - Velocidade longitudinal na árvore (V_{a.L.}), velocidade longitudinal na tora (V_T), velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}), velocidade longitudinal na viga seca (V_{LLseca}), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de ruptura (f_m), módulo de elasticidade (E_M), densidade (p), coeficientes de variação (C. V.) de cada um dos parâmetros e Tabela A 2 - Velocidade longitudinal na tora (V_T) , velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}) , velocidade longitudinal na viga seca (V_{LLseca}) , coeficiente de rigidez (C_{LL}) , módulo de ruptura (fm), módulo de elasticidade (EM), densidade (p), coeficientes de variação (C. V.) de cada um dos parâmetros e número de vigas retiradas de cada tora de Tabela A 3 - Velocidade longitudinal na árvore (V_{a.L.}), velocidade longitudinal na tora (V_T), velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}), velocidade longitudinal na viga seca (V_{LLseca}), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de ruptura (f_m), módulo de elasticidade (E_M) , densidade (ρ), coeficientes de variação (C. V.) de cada um dos parâmetros e número de vigas retiradas de cada árvore de Eucalipto grandis.64 Tabela A 4 - Velocidade longitudinal na tora (V_T), velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}), velocidade longitudinal na viga seca (V_{LLseca}), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de ruptura (fm), módulo de elasticidade (EM), densidade (p), coeficientes de variação (C. V.) de cada um dos parâmetros e número de vigas retiradas de cada tora de Tabela A 5 - Dados de velocidade longitudinal na árvore (Va.L.), velocidade radial na árvore (Va.r.), velocidade longitudinal na tora (VT), velocidade longitudinal na viga saturada (VLLsat), velocidade longitudinal na viga seca (VLLseca), coeficiente de rigidez (CLL), módulo de ruptura (fm), módulo de elasticidade (EM) e a densidade (p) para cada Tabela A 6 - Dados de velocidade longitudinal na árvore ($V_{a,L}$), velocidade longitudinal na tora (V_T), velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}), velocidade longitudinal na viga seca (V_{LLseca}), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de ruptura (f_m), módulo de

RESUMO

Recentes avanços internacionais indicam a possibilidade de prever, a partir da árvore viva ou em toras recém abatidas, informações estratégicas que podem auxiliar a tomada de decisões econômicas e ambientais e possibilitar utilização mais eficaz da madeira. Estas informações podem ser usadas para classificar as árvores de acordo com as possibilidades de aplicações. Na prática as empresas podem atingir benefícios por meio da aplicação de estratégias baseada na qualidade dos recursos florestais que possuem e nos produtos que desejam comercializar. O objetivo da pesquisa foi verificar a existência de correlações entre propriedades da madeira de espécies florestais plantadas no Brasil (Pinus elliottii, Eucalyptus grandis, Toona ciliata, Clone de Eucalyptus), em termos de rigidez e de resistência, com a velocidade de propagação da onda de ultrassom na árvore e/ou nas toras recém abatidas das quais foram retiradas. Para atingir este objetivo foram realizadas medições de ultrassom em árvores e em toras recém abatidas. As toras foram, então, desdobradas em vigas, as quais foram ensaiadas por ultrassom na condição saturada. As vigas passaram por processo de climatização até atingirem 12% de umidade e novas medições de ultrassom foram realizadas. Após as inferências não destrutivas, as vigas foram ensaiadas à flexão estática com a finalidade de determinar o módulo de elasticidade (E_M) e o módulo de ruptura (f_m). Os resultados foram avaliados de forma estatística buscando-se correlações entre as respostas de propagação de ondas nas árvores e nas toras recém abatidas com as propriedades de resistência e de rigidez das vigas. Para exemplificar a classificação da madeira a partir do ensaio de ultrassom na árvore ou na tora recém abatida foram utilizadas as faixas de classificação da Norma Australiana AS 2878 (SAA, 1986b). Além disso, verificou-se a existência de correlação entre as velocidades de ultrassom na árvore-tora, árvore-viga e tora-viga, todas na condição saturada. Os resultados obtidos mostraram que é possível obter as propriedades de resistência e de rigidez, assim como, estimar faixa de classificação da madeira a partir da velocidade longitudinal de ultrassom na árvore e/ou da velocidade longitudinal de ultrassom na tora, desde que as mesmas não sejam constituídas essencialmente por madeira juvenil, como foi o caso do clone de eucalipto e do Cedro australiano nessa pesquisa. O modelo de regressão da velocidade árvore-tora foi o que apresentou maior coeficiente de correlação, seguido do modelo de regressão da velocidade tora-viga saturada e, por último, do modelo de regressão da velocidade árvore-viga saturada.

Palavras-chave: Pinus elliottii, Eucalyptus grandis, Toona ciliata, Clone de Eucalyptus.

ABSTRACT

Recent international advances have pointed out the possibility of estimating, from a live tree or freshly-felled logs, strategic information that may assist in economic and environmental decision making, as well as allowing a more effective application of wood. Such information may be used to classify trees according to their application range. In practice, companies may benefit from that through employing strategies based on the quality of the forest resources they have available and also from the products they intend to market. The aim of this research is to establish whether there is an correlation between the properties of exotic trees growing in Brazil (Pinus elliottii, Eucalyptus grandis, Toona ciliata, Eucalyptus clone) - regarding stiffness and strength – and the velocity of ultrasound wave propagation in the tree and/or freshly-felled logs from which they have been drawn. In order to do so, ultrasound measurements were performed in trees and recently cut logs. Afterwards, logs were unfolded in beams, which in their turn were tested by ultrasound in green condition. Beams underwent an acclimatation process until reaching 12% of moisture content and new ultrasound measurements were performed. Following the nondestructive tests, the beams were tested in static bending in order to establish the modulus of elasticity (E_M) and the modulus of rupture (f_m). Results were statistically evaluated, seeking correlation between the responses of wave propagation in trees and freshly-felled logs and the beams stiffness and strength properties. As to exemplify wood classification from tree or recently cut log, the Australian Norm AS 2878 (SAA, 1986b) was applied. Further, it was also possible to establish a correlation between ultrasound velocities in tree-log, tree-beam and log-beam, all in green condition. Results obtained showed to be possible to determine stiffness and strength properties as well as to estimate a wood classification layer from ultrasound longitudinal velocity in the tree, and/or ultrasound longitudinal velocity in the freshly-felled logs, unless the wood are essentially made up by juvenile wood, as happened with the *eucalyptus* clone and the Australian Cedrus in the present research. The model regression tree-log velocity was the one that presented the highest correlation coefficient, followed by the regression saturated log-beam velocity and, lastly, the regression saturated tree-beam velocity.

Keywords: Pinus elliottii, Eucalyptus grandis, Toona ciliata, Eucalyptus clone.

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DE ESTUDO

Recentes avanços na Europa, nos Estados Unidos e na Nova Zelândia indicam a possibilidade de prever, a partir da árvore viva ou em toras recém abatidas, informações estratégicas que podem auxiliar a tomada de decisões econômicas e ambientais, e possibilitar a utilização mais eficaz do material. Estas informações podem ser usadas para classificar as árvores de acordo com as possibilidades de aplicações estruturais ou ainda por uma gama de propriedades de fibra, de interesse para diferentes setores. Outro exemplo de aplicação é a determinação das relações entre condições ambientais e tratamentos silviculturais com as propriedades da madeira, de forma a ser possível realizar planejamentos para plantações futuras, visando uma determinada propriedade ou qualidade de fibra desejada.

A avaliação da madeira através do uso de propagação de ondas está crescendo a cada dia, e se tornando importante método de classificação de peças para diversos usos, além de ferramenta de controle de qualidade no setor florestal.

No Brasil foi aprovada, recentemente, a norma brasileira para classificação de madeira dicotiledônea por meio de ultrassom, a NBR 15521/2007. Essa classificação se baseia em medições de ultrassom realizadas em vigas estruturais, com as quais se determina a velocidade longitudinal de propagação na direção das fibras (V_{LL}) e também o coeficiente de rigidez (C_{LL}). Esses valores (V_{LL} ou C_{LL}) são então utilizados para separar as vigas em classes de rigidez, as quais são também associadas à parâmetros de resistência. Para coníferas a norma de classificação por ultrassom encontra-se em elaboração, de forma que a classificação de peças para fins estruturais no Brasil quando utilizada, é realizada, ainda, utilizando-se somente avaliação visual.

Para que a madeira possa ser utilizada de forma adequada, como matéria prima em estruturas, móveis e outras aplicações, é necessário que a mesma passe por diversos processos de beneficiamento (desdobro, secagem, aparelhamento), os quais são onerosos. Contudo, verifica-se que, muitas madeiras após passarem por todo este processo, não possuem propriedades adequadas para utilizações que justifiquem todos estes custos de beneficiamento.

Dessa forma, na prática as empresas podem atingir benefícios por meio da aplicação de estratégias de classificação baseadas na qualidade dos recursos que possuem e nos produtos que desejam comercializar. Assim, por exemplo, caso a velocidade de propagação de ondas de

ultrassom esteja sendo utilizada como parâmetro de classificação, o valor limite pode ser determinado para cada empresa em função da seleção dos tipos de aplicações que deseja, separando as toras com maiores velocidades para aplicações estruturais, por exemplo. Em termos do processo produtivo, quanto mais antecipadamente a aplicação dessa classificação for realizada (na árvore ou na tora ao invés de após o desdobro) mais significativos os retornos econômicos ou a redução dos desperdícios.

Assim, a hipótese da pesquisa é a de que é possível utilizar a velocidade de propagação de ondas de ultrassom, obtidas na árvore viva ou na tora recém abatida, como critério de seleção de árvores/toras visando aplicações específicas da madeira delas proveniente.

Levando em consideração os aspectos mencionados, o objetivo principal da pesquisa foi avaliar a possibilidade de se correlacionar as propriedades da madeira, em termos de rigidez e de resistência, com a velocidade de propagação da onda de ultrassom na árvore e em nas toras recém abatidas das quais foram retiradas.

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- Correlacionar os parâmetros dos ensaios não destrutivos medidos na árvore, na tora e na viga (na umidade de equilíbrio) com as propriedades de resistência e rigidez das vigas após passarem por processo de climatização.

- Verificar a existência de correlação entre as velocidades nas árvores e/ou nas toras recém abatidas com as velocidades nas vigas (na condição saturada).

- Realizar estudo de caso, utilizando-se as faixas de classificação da Norma Australiana AS 2878 (SAA, 1986b), para exemplificar a classificação da madeira a partir do ensaio de ultrassom na árvore ou na tora recém abatida.

2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Levando em conta os objetivos da pesquisa, a revisão bibliográfica será focada nas várias formas de classificação da madeira para fins estruturais, bem como nas possibilidades de antecipação dessa classificação, por meio da utilização de ensaios na tora ou na árvore e não na madeira serrada. Esse aspecto está diretamente relacionado à competitividade da madeira, bem como das empresas florestais voltadas à produção de madeira serrada.

Tendo em vista que grande parte do material utilizado nessa pesquisa é proveniente de florestas jovens, e que essa questão teve influência nas avaliações dos resultados, foram incluídas algumas referências que tratam do tema madeira juvenil.

A proposta de avaliar as propriedades da madeira à partir da árvore pode ter grande significado e importância para o planejamento de tratamentos silviculturais e, por essa razão, também foram inseridos nesse capítulo algumas referências que tratam desse assunto.

Conhecimentos estratégicos sobre as propriedades da madeira poderiam ser utilizados como um meio de programação do plantio e da comercialização de madeira baseado em propriedades de interesse para a produção de um determinado produto.

Para serem competitivas, as empresas florestais precisam controlar custos, escolher e alocar as toras de forma mais apropriada ao tipo de mercado e maximizar o valor das árvores na época da colheita (AMISHEV e MURPHY, 2008).

Segundo Wang *et al.* (2007) a precisão obtida com a tecnologia de ultrassom permite prever, a partir das medições realizadas na árvore viva, a qualidade intrínseca e as propriedades da madeira e correlacionar com o desempenho estrutural dos produtos finais. Além disso, os autores também afirmam que, com os avanços e aperfeiçoamentos contínuos, esta tecnologia poderia auxiliar na gestão da qualidade da madeira, permitindo avaliar os povoamentos florestais e melhorar a qualidade de futuros plantios.

2.2 Classificação visando a detecção de defeitos e sua correlação com propriedades

A classificação visual é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça estrutural diferem das propriedades mecânicas de corpos de prova isentos de defeitos em função da presença de características de crescimento, e que tais características podem ser notadas e avaliadas pelo olho humano. Com o auxílio de regras de classificação, estas características de crescimento são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade.

Embora essas categorias possam ser suficientes quando a aparência é a principal preocupação, a adequação de classificações visuais para aplicações envolvendo rigidez e resistência é questionável, uma vez que nenhuma medida dessas propriedades é efetivamente obtida. A preocupação com a confiabilidade e com os resultados conservadores associados com classificações visuais para aplicações estruturais levaram ao desenvolvimento da máquina de classificação de rigidez (WANG *et al.*, 2007).

Segundo Tsehaye *et al.* (2000b) atualmente as toras são classificadas em classes de acordo com o seu comprimento, diâmetro, conicidade e quanto as características visuais relacionadas aos defeitos (tamanho e distribuição dos nós e outros defeitos). Além disso, as toras podem também ser agrupadas de acordo com a idade ou o tipo de tratamento a que as árvores foram submetidas. Desta forma, todas as toras alocadas em uma mesma pilha são consideradas como idênticas, uma vez que não há uma base para uma diferenciação mais eficaz.

Segundo Wang *et al.* (2001) várias pesquisas vêm sendo feitas para a investigação de materiais de madeira, porém pouco esforço tem sido gasto para desenvolver técnicas de ensaios não destrutivos (END) para a avaliação das propriedades da madeira a partir da árvore. Os procedimentos existentes de classificação de árvores nos Estados Unidos consistem apenas de avaliações visuais da qualidade da árvore. Estes procedimentos não incorporam estimativas de rigidez da madeira em uma árvore. Os procedimentos de classificação visual atualmente utilizados em avaliação de árvores são questionáveis pois não mensuram adequadamente o potencial de qualidade dos produtos estruturais a serem fabricados a partir dessa árvore, especialmente aqueles em que a rigidez é a principal preocupação. A previsão é de que o

emprego de ensaios não destrutivos para determinar o módulo de elasticidade da madeira na árvore ainda em pé é uma grande promessa para a melhoria a capacidade de selecionar as árvores maduras que têm potencial superior para a produção de produtos estruturais.

Ballarin e Nogueira (2006) estudaram a correlação entre a classificação visual e a velocidade de propagação de ondas de ultrassom na madeira de *Pinus taeda* provenientes de florestas plantadas de Manduri, São Paulo. No trabalho os autores realizaram classificação visual e ensaio de ultrassom em 24 peças de *Pinus taeda* retiradas da prancha central da tora. O objetivo dos autores era avaliar se o aumento ou a diminuição da velocidade de propagação da onda de ultrassom estava associado à presença de defeitos. Os autores concluíram que o método do ultrassom se mostrou adequado para ser aplicado à madeira proveniente de florestas de *Pinus taeda*, com o intuito de subsidiar classificação mais rápida das peças, em detrimento à classificação visual, que é uma atividade complexa e demorada.

Puccini *et al.* (2002) comprovaram estatisticamente que, em relação à velocidade de propagação da onda, o grupo de peças de madeira com defeitos foi significativamente diferente que o grupo de peças de madeira sem defeitos. Com os resultados os autores estabeleceram intervalo de velocidade que, para as peças defeituosas, possibilita a chance de confirmação de defeito, de 74,32%. Para as peças sem defeito, a chance de o ultrassom indicar que a peça é defeituosa foi de 18,87%.

As propriedades físicas e mecânicas (densidade, resistência e rigidez) de 82 peças de madeira serrada de Tali (*Ivorense erythrophleum, Erythrophleum suaveolens*) da Guiné e Camarões foram classificadas utilizando a norma EN 408 . Algumas vigas de madeira tinham seção transversal de 0,08 m x 0,08 m e outras seção de 0,20 m a 0,25 m e foram visualmente classificados de acordo com a norma britânica BS 5756. Após a classificação visual, as vigas passaram por ensaio de ultrassom. Os resultados da classificação visual mostraram-se ruins, com um percentual excessivo de peças rejeitadas, resultado conservador citado por Wang *et al.* (2007a). Por outro lado, o uso de medidas ultrassônicas mostrou precisão suficiente para a avaliação das propriedades de rigidez, mas não para as propredades de resistência (ARRIAGA *et al.* 2006).

Huang *et al.* (2003) utilizaram método de propagação de ondas em toras que passaram por avaliação visual e que, aparentemente eram iguais. As velocidades de propagação foram diferentes em toras provenientes de árvores de uma mesma idade e da

mesma floresta, como também para toras provenientes de clones e de uma mesma árvore. Os resultados dessa classificação utilizando velocidade de propagação de ondas foram posteriormente comprovados por métodos destrutivos. Dyck (2002) reforça esta visão relatando que todas as toras são diferentes ainda que sejam provenientes de clones ou que venham de uma mesma árvore.

2.3 Classificação mecânica

A necessidade de antecipar o conhecimento das propriedades da madeira a ser retirada da floresta tem feito com que haja muitas pesquisas visando o desenvolvimento de tecnologias em várias frentes e utilizando vários métodos tais como laser, raio-X, microondas, ultrassom, espectrometria de infravermelho próximo (NIR) (CARTER *et al.*, 2005).

Há décadas as tecnologias acústicas estão bem estabelecidas como ferramentas para a avaliação de materiais, principalmente metálicos, e seu uso está se tornando amplamente aceito na indústria madeireira e no setor florestal, para inspeções, controle de qualidade e classificação de produtos, como laminados, madeira serrada e toras. Para Wang *et al.* (2007b) os desafios para aplicação dessa tecnologia na árvore em pé é a obtenção de um valor correto para a velocidade de percurso da onda e a implicação desse resultado nas propriedades da madeira.

Os métodos de propagação de ondas não são os únicos métodos não destrutivos com potencialidade para serem utilizados em árvores, mas assim como outros métodos tais como a tomografia, tem reconhecido potencial e têm sido amplamente estudados, como fica evidenciado quando se verifica a atualidade dos artigos em periódicos indexados e reconhecidos na área. O ultrassom é um método de propagação de ondas mecânicas e, por meio dele podem ser obtidas informações sobre o tempo de percurso e também sobre a amplitude do sinal. Tais informações podem gerar, portanto, a velocidade de propagação da onda no material e a atenuação da mesma durante o percurso. Adicionalmente podem-se utilizar esses resultados para gerar imagens, sendo a técnica nesse caso denominada tomografia ultrassônica, bastante apropriada quando se deseja avaliar defeitos internos, mas não necessária quando o objetivo é a correlação com propriedades mecânicas. Andrews (2000) e Dyck (2002) comprovaram que utilizando velocidade de propagação de ondas foi possível detectar variação de propriedades existente entre troncos aparentemente similares. No caso de Andrews (2000) o estudo foi realizado com pinus radiata (*Pinus radiata*) proveniente de duas regiões geográficas distintas na Nova Zelândia.

Estudo realizado por Tsehaye *et al.* (2000a) avaliaram três classes de propriedades acústicas em toras consideradas idênticas, em uma floresta de pinus radiata (*Pinus radiata*) na Nova Zelândia, tendo sido verificada variações intrínsecas das propriedades da madeira. Os 30% dos troncos com velocidades maiores produziram madeira que tinham rigidez 90% superiores do que as 30% de toras com velocidades menores.

Segundo Wang *et al.* (2007a) pesquisas realizadas por Aratake *et al.* (1992), Aratake e Arima (1994), Ross *et al.* (1997), Iijima *et al.* (1997), Wang (1999), Wang e Ross (2000) demonstraram que a aplicação de métodos acústicos em toras pode ser utilizada para predizer a resistência e a elasticidade de peças estruturais que serão produzidas a partir deste tronco.

Ross *et al.*, (1997) desenvolveram trabalho com o objetivo de avaliar, por meio de técnica não destrutiva, toras de madeira antes destas serem desdobradas em vigas. Para a pesquisa foram utilizadas 193 toras de abeto balsâmico (*Abies balsamea*) e abeto oriental (*Abies chensiensis*) os quais passaram por ensaio não destrutivo por meio do qual determinouse, a partir da velocidade longitudinal e da densidade, o módulo de elasticidade dinâmico ($E_{Md} = V^2.\rho$) das toras. Após os ensaios não destrutivos, as toras foram desdobradas e as vigas tiveram seu módulo de elasticidade (E_M) determinado utilizando-se a técnica de vibração transversal. Os resultados indicaram forte relação entre E_{Md} das toras e o E_M das vigas, sendo que o E_{Md} da tora se correlacionou melhor com o E_M médio obtido das vigas provenientes do mesmo tronco.

Tsehaye *et al.* (2000b) pesquisaram a possibilidade de agrupar toras de acordo com classes de resistência e determinar a porcentagem de madeira classificada para fins estruturais. Os resultados mostraram que a triagem das toras através da propagação de ondas possibilitou a classificação da madeira para fins estruturais. Tendo em vista os resultados, os autores sugeriram que o método poderia ser utilizado para que as empresas enviassem, para o desdobro de peças estruturais, apenas as toras com chance de produzirem madeira classificada em classes superiores à F5, que representa uma das 7 classes da Norma Australiana para coníferas. Abaixo da classe F5 existem 3 classes e acima outras 3. Os autores sugerem que as

toras com menores chances de classificação poderiam ser aproveitadas apenas para o corte visando a confecção de molduras, por exemplo, evitando diversos custos envolvidos no corte de peças para fins mais nobres.

Segundo Amishev e Murphy (2008) o módulo de elasticidade à flexão (E_M) é uma das mais importantes propriedades mecânicas e a mais frequentemente utilizada, no caso da madeira, como indicador da capacidade para suportar os carregamentos. Por meio de parceria com 6 empresas florestais esses autores realizaram pesquisa envolvendo uma grande de quantidade de toras (3000), todas da espécie Douglas Fir (Pseudotsuga menziesii), provenientes de 7 regiões dos Estados Unidos. Após os ensaios de propagação de ondas nas toras as mesmas foram desdobradas e transformadas em lâminas. As lâminas foram classificadas em 9 classes de rigidez utilizando ultrassom. As velocidades nas toras variaram de 2730 m.s⁻¹ a 4690 m.s⁻¹. Por limitações operacionais os pesquisadores não tiveram condições de identificar e relacionar as lâminas provenientes de cada tora, limitando-se apenas à identificação da região de procedência. Os resultados indicaram que as lâminas mais bem classificadas tinham procedência nas regiões A, B, D e E, com distribuição aproximadamente igual. As outras três regiões (C, F e G) tinham quantidade bem inferior de lâminas melhor classificadas, sendo a região C a pior. Comparando esses resultados aos valores médios de velocidade obtidas nas toras dessas regiões os autores observaram haver coerência, ou seja, a região C foi a que apresentou menor velocidade média nas toras (3460 m.s⁻¹) enquanto as regiões A, B, D e E os maiores valores ($3820 \text{ a } 3920 \text{ m.s}^{-1}$).

Carter *et al.* (2005) em sua pesquisa utilizou equipamento de ressonância (Fibre-gen, HM-200TM, Nova Zelândia) em toras para avaliar as propriedades de resistência e de rigidez da madeira e concluiu que essa tecnologia não destrutiva é uma forma confiável de obtenção de resultados de resistência e de rigidez da madeira a partir do ensaio em toras. O mesmo autor utilizou equipamento de ondas de tensão (Fibre-gen, ST-300TM, Nova Zelândia) em árvores em pé e verificou que esse método forneceu um indicativo da rigidez da madeira, constituindo assim um novo meio para a inferência não destrutiva da madeira para o mercado e, para os produtores, uma forma de planejamento das ações silviculturais e programação das culturas.

Yin *et al.* (2010) realizaram estudo com o objetivo de avaliar métodos de obtenção de propriedades mecânicas da madeira por meio de ensaios não destrutivos em árvores em pé e em toras de um plantio de abeto chinês (*Abies cunninghamia*). Os autores compararam três

métodos de medição acústica para avaliar o módulo de elasticidade e módulo de ruptura na flexão estática e também, a resistência à compressão paralela às fibras da madeira. Quinze árvores de abeto chinês com 36 anos de idade foram selecionadas. Cada árvore foi cortada em quatro toras, das quais foram obtidos três valores do módulo de elasticidade dinâmico, um baseado no ensaio de ondas de tensão (simulando o ensaio na árvore em pé), outro baseado em vibração longitudinal e outro através de onda ultrassônica. Todas as medições foram feitas com madeira na condição saturada. Após as medições das toras, pequenas amostras foram cortadas e secas ao ar até atingirem a umidade de 12%. Ensaios de flexão estática foram realizados para determinar o módulo de elasticidade e de ruptura, e ensaios de compressão paralela às fibra foram feitos para determinar a resistência à compressão. O módulo de elasticidade dinâmico das toras, calculado utilizando tanto a velocidade quanto a densidade saturada ($E_{Md} = V^2$. ρ), foi determinado pelos três métodos acústicos. Correlações estatisticamente significativas foram obtidas das regressões entre os módulos de elasticidade dinâmicos, obtido a partir do ensaio de vibração longitudinal, do ensaio de ondas de tensão e do ensaio de ultrassom e o módulo de elasticidade estático, com R = 0,77, 0,57 e 0,45 respectivamente. Os autores concluem que, dentre os três métodos não destrutivos avaliados, a vibração longitudinal foi a mais precisa e confiável para avaliar as propriedades mecânicas das toras. Além disso, os resultados indicam que a tecnologia da onda de tensão foi eficaz para avaliar as propriedades mecânicas da madeira, tanto à partir das toras quanto à partir das árvores vivas.

Segundo Tsehaye *et al.* (2000a) a densidade da madeira é o parâmetro mais utilizado para sua seleção, com o pressuposto de que a densidade é um bom indicador de resistência, de rigidez e de outras propriedades. Assim, os autores realizaram pesquisa para avaliar essa hipótese. Para os ensaios foram utilizadas 28 m³ (2248 pranchas) de madeira estrutural, provenientes de 108 árvores de pinus radiata (*Pinus radiata*) obtidos de duas florestas diferentes. As pranchas foram ensaiadas à flexão estática para a determinação da rigidez. A comparação entre a densidade e a rigidez, para a seleção de árvores que possuíam madeira apta a ser utilizada em estruturas, indicou que a rigidez é o melhor parâmetro para a seleção de árvores superiores em uma população natural de uma floresta em pé. Considerando as diferenças de rigidez e de densidade para as duas populações, essa foi 46% para a rigidez e de apenas 6% para a densidade. Considerando as bases teóricas do ensaio de ultrassom, sabe-se

que, por meio dele, é possível determinar, com eficiência, a rigidez da madeira. Assim, as conclusões de Tsehaye *et al.* (2000a), de que a rigidez é um dos melhores parâmetros para se classificar a madeira estrutural, indicam que o ultrassom é uma ferramenta adequada para essa finalidade.

Wang *et al.* (2007a) avaliaram 5 espécies de coníferas e comparou a velocidade de percurso da onda em árvores e em toras. Para os ensaios os transdutores foram colocados alinhados em um plano vertical na mesma face. O transdutor inferior foi colocado de 0,4 m a 0,6 m do solo e a distância entre os transdutores inferior e superior foi de 1,22 m. Para promover a propagação das ondas longitudinais de compressão os transdutores foram inseridos inclinados na árvore. Para a maioria das árvores ensaiadas a velocidade foi significativamente superior do que na tora. Esse resultado levou os autores a discutirem a forma diferenciada de propagação das ondas nas toras e nas árvores.

2.4 Aspectos relativos à propagação de ondas em meios materiais

Segundo Wang *et al.* (2007b) a propagação de ondas na madeira é um processo dinâmico e complexo, controlado pelas propriedades, pela orientação e pela microestrutura da fibra da madeira e, talvez, mais importante, pela forma geométrica do material.

No caso da árvore em pé, onde não se tem acesso aos extremos para a colocação dos transdutores, a onda é induzida à partir da superfície do tronco, gerando um estado não uniaxial. Além disso, a distância entre os transdutores normalmente é menor do que no caso do ensaio na tora, uma vez que tem que ser adotada de forma que o ensaio em campo possa ser viável. Essas condições, que não ocorrem na tora, onde os transdutores podem ser colocados nas extremidades, faz com que no caso da árvore se tenha, inicialmente, a onda superficial (onda Rayleigh) e a de cisalhamento e, posteriormente, a onda longitudinal.

A onda superficial, normalmente restrita à região adjacente à superfície, faz com que o movimento das partículas se dê para cima, para baixo, para frente e para trás, produzindo um traçado elíptico. A onda de cisalhamento faz com que o movimento das partículas seja perpendicular à direção de propagação. Esses distúrbios na propagação das ondas afetam a velocidade de tal forma que a onda final gerada é uma mescla desses vários tipos de onda.

Embora a maior parte da energia resultante de um impacto seja para gerar ondas de cisalhamento e de superfície, a onda longitudinal viaja mais rápido e é mais fácil de ser detectada em aplicações em campo (MAYERS¹, 1994 apud WANG *et al.*, 2007). Assim a onda longitudinal é, de longe, a mais comumente utilizada para a caracterização das propriedades da madeira.

Bartholomeu *et al.* (2003) estudaram a dispersão das ondas de ultrassom em peças de madeira utilizando ondas de superfície e ondas de compressão (longitudinais). Os autores concluíram que para comprimentos de percurso da onda, correspondentes a pelo menos 5 vezes o comprimento de onda, as ondas de superfície se transformam em ondas de compressão, com mesma velocidade de propagação, de forma que tanto ondas de superfície como de compressão poderiam ser utilizadas para a avaliação de peças de madeira.

Lindström *et al.* (2002) realizaram estudo visando investigar a possibilidade de selecionar árvores jovens que possuíam madeira com altos valores de módulos de elasticidade. Para isso foram utilizados sete clones de pinus radiata (*Pinus radiata*), de 4 anos de idade. Vários meios de obtenção do módulo de elasticidade (E_M) foram utilizados: flexão estática, compressão paralela em corpos de prova, método acústico (ondas de tensão) para obtenção da velocidade longitudinal na árvore e posterior correlação com o E_M , bem como uma ferramenta especialmente confeccionada para realizar ensaio de ressonância em pequenos corpos de prova. As características da madeira e o ângulo das microfibrilas foram medidos a partir de discos retirados de cada árvore. Os resultados mostraram boa correlação entre as medições acústicas na árvore e o módulo de elasticidade. As propriedades de rigidez desses clones foram dependentes do ângulo das microfibrilas.

2.5 Madeira juvenil e tratamentos silviculturais

Zhu *et al.* (2005) avaliaram as diferenças entre as propriedades mecânicas (módulo de ruptura e módulo de elasticidade à flexão, módulo de cisalhamento, resistência a compressão paralela e resistência ao cisalhamento) e físicas (densidade) considerando a variação da idade. Para isso utilizaram a posição radial e longitudinal de retirada das peças. A espécie utilizada foi a *Cryptomeria japonica*, proveniente de Akita, Japão. Durante o estudo foram avaliadas 4

¹ MEYERS, M. A.. Dynamic behavior of materials. New York: John Wiley & Sons, 1994.

árvores de 75 anos de idade. A amostragem foi realizada retirando-se toras de 0,5 m de comprimento a cada 2m do tronco, até aproximadamente 13 m de altura (as árvores tinham em média 28 m de altura), totalizando 25 toras. Em cada altura foram também retirados discos, dos quais se retiraram corpos de prova no terceiro, sexto, nono, décimo segundo e vigésimo anéis de crescimento anual, e a cada 10 anos depois do vigésimo anel, a partir da medula. Esses discos foram utilizados para avaliar a variação de algumas propriedades anatômicas. Os corpos de prova para os ensaios de rigidez tinham dimensão de 0,02 m x 0,02 m x 0,40 m. A umidade média dos corpos de prova foi de 13,1%. Os autores destacam que o comprimento do traqueíde e o ângulo de inclinação da microfibrila são parâmetros muito importantes na determinação da transição entre a madeira juvenil e adulta. Na madeira juvenil o ângulo da microfibrila é maior e o comprimento do traqueíde menor. Por meio de análises anatômicas nos discos retirados nas várias alturas do tronco, os autores verificaram que comportamento similar ao descrito em relação às propriedades mecânicas (número do anel de crescimento que indica a transição) ocorre quando o parâmetro de análise dessa transição é a variação do comprimento do traqueíde e do ângulo da microfibrila. Além disso, os autores verificaram que, na direção vertical (da base do tronco até 13,2 m) o comprimento do traqueíde é pequeno e o ângulo de inclinação da microfibrila é grande comparado aos valores das partes mais altas do tronco. Análise de regressão entre E_M e f_m com as propriedades anatômicas (ângulo de microfibrila e comprimento do traqueíde) mostrou que o E_M tem maior correlação com o ângulo da microfibrila (R = 0,657) e com o comprimento do traqueíde (R = 0,726) enquanto o f_m tem maior correlação com a densidade (R = 0,837).

Wang *et al.* (2001) realizaram estudo para verificar a utilização da técnica de ondas de tensão na avaliação da resistência e da rigidez da madeira proveniente de árvores com diferentes idades (15, 20, 25 e 45 anos) de duas espécies (*Tsuga heterophylla* e *Picea sitchensis*). Durante a pesquisa 168 árvores foram ensaiadas. Um segundo objetivo dessa pesquisa foi verificar se os efeitos das práticas silviculturais, principalmente controle de densidade de povoamento, podem ser identificados a partir do mesmo método de propagação de ondas. Após os ensaios de propagação de ondas em campo, foi retirada uma peça de 0,61 m de comprimento do tronco de 56 árvores para a realização de ensaio de flexão estática, possibilitando a determinação das propriedades de resistência e de rigidez. Os resultados deste estudo indicaram que as velocidades obtidas a partir de ensaios de ondas de tensão em árvores

em pé fornecem informações precisas e confiáveis a respeito das propriedades da madeira dela provenientes. As análises de regressão dos resultados revelaram correlação estatisticamente significativa entre a velocidade longitudinal na árvore e as propriedades obtidas a partir do ensaio de flexão estática (resistência e rigidez). Os modelos de regressão apresentaram significância estatística com P-valor de 0,01. Os resultados também indicaram que os efeitos das práticas silviculturais podem ser identificados através do ensaio não destrutivo na árvore. Isto mostra que a técnica não destrutiva pode ser utilizada para controlar alterações de propriedades em árvores e ajudar a determinar qual a melhor forma de manejo para a obtenção da qualidade da madeira desejada.

Autry e Achim (2008) descreveram os estudos que foram realizados para testar a hipótese de que as tecnologias não destrutivas oferecem previsões confiáveis das propriedades mecânicas de pinheiro silvestre (*Pinus sylvestris L.*), permitindo comparações entre a qualidade da madeira de amostras com diferentes histórias silviculturais. Para isso, foram realizadas avaliações acústicas em árvores de florestas localizadas em duas fazendas e em árvores jovens provenientes de reflorestamento no norte da Escócia. No total foram ensaiadas 100 árvores e 11 delas foram derrubadas para a confecção de 40 corpos de prova. Estes corpos de prova foram então submetidos a flexão estática. A partir deste estudo, os autores concluíram que as velocidades medidas em árvores são um indicador confiável do módulo de elasticidade e do módulo de ruptura da madeira. No entanto, leituras acústicas não devem ser aceitas pelo seu valor nominal, sem nenhuma consideração de fontes de variação das propriedades mecânicas, tais como idade. Além disso os autores também concluíram que os métodos acústicos podem ser utilizados para comparar a qualidade da madeira de diferentes plantios e assim desenvolver diferentes estratégias de manejo silviculturais.

Bucur (2006) indica que a zona de madeira juvenil é uma zona de crescimento contínuo da velocidade longitudinal de propagação de ondas de ultrassom e que, na madeira adulta a velocidade se estabiliza. A mesma autora indica que, para muitas espécies, principalmente de reflorestamento, na região juvenil as velocidades podem ser elevadas sem que haja uma correspondência da rigidez. Esse comportamento pode estar ligado às dimensões dos elementos estruturais em madeiras jovens, as quais afetam de forma mais significativa a rigidez do que a velocidade. Pesquisa de Massak (2010) demonstra que esse comportamento foi observado para o Eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*), o qual apresentou velocidades

elevadas nas vigas ensaiadas por ultrassom, mas os valores de rigidez (módulo de elasticidade em flexão estática) não corresponderam aos esperados pelas faixas de classificação da NBR 15521 (2007). Esse autor concluiu que a discrepância nas faixas de classificação foram constantes e de 12%, de forma que, aplicando-se uma redução dessa ordem (12%) as velocidades correspondiam adequadamente às faixas de classificação.

2.6 Conclusão da revisão bibliográfica

Na prática, há grandes vantagens comerciais em se determinar, através de ensaios de ultrassom nas árvores e/ou nas toras, as propriedades da madeira, o que resulta em otimização dos recursos a partir da triagem da matéria-prima.

As referências apresentadas nesse capítulo permitem verificar que o tema desse trabalho tem sido foco de pesquisas recentes no exterior e que o assunto não tem resultado conclusivo.

No Brasil não foi possível encontrar pesquisas que utilizam o ultrassom como forma de antecipação da determinação da rigidez da madeira a partir da árvore e/ou da tora, sendo, portanto um nicho importante para pesquisas nacionais. Além disso, o equipamento de ultrassom utilizado nessa pesquisa é de origem nacional, sendo um aspecto que pode ser considerado como importante para acrescentar conhecimento científico com possibilidade de ser repassado para o setor produtivo brasileiro.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas árvores do gênero *Pinus* e espécie *elliottii* (Pinus elliottii), do gênero *Toona* e espécie *ciliata* (Cedro australiano), do gênero *Eucalyptus* e espécie *grandis* (Eucalipto grandis) e árvores desse mesmo gênero, porém proveniente de clonagem (clones de eucalipto). Para facilitar a leitura do texto, a partir desse item se adotará o nome comum das espécies e o tratamento será realizado como se fossem quatro diferentes espécies de árvores.

A amostragem de Pinus elliottii foi composta de 12 árvores, com idades variando de 8 a 23 anos, provenientes de florestas situadas em Caçador/SC, fornecidas pela empresa Rotta Madeiras. A de Eucalipto foi composta, no caso do Eucalipto grandis, de 5 árvores de 34 anos provenientes de floresta localizada em Lençóis Paulista/SP e, no caso dos clones, de 133 árvores com 3,5 anos provenientes de floresta localizada em Agudos/SP, ambas cedidas pela empresa Duraflora. No caso do Cedro australiano a amostragem foi composta de 50 árvores de 4 anos oriundas de floresta particular situada em Pariquera-Açu/SP. Tanto o número de árvores quanto as espécies utilizadas foram adotadas em função da disponibilidade das empresas ou do proprietário da área em ceder o material para a pesquisa.

3.2 Principais Equipamentos

- Equipamento de ultrassom (AGRICEF, USLab, Brasil) (Figura 3.1) desenvolvido na Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP em parceria com a empresa AGRICEF Soluções Tecnológicas.



Figura 3.1- Equipamento de ultrassom (USLab).

- Transdutores de 45 kHz de faces planas (Figura 3.2a) e de faces exponenciais (Figura 3.2b).



(a) (b) Figura 3.2- (a) Transdutores de faces planas. (b) Transdutores de faces exponenciais.

- Câmara de secagem (MA-835, Marconi, Brasil) com controle de temperatura +/- 2° Celsius e controle de Umidade Relativa de +/- 5% controlada por Programa de Rampas e Patamares.
- Pórtico com atuador hidráulico para ensaio de estruturas (Figura 3.3). Capacidade de carga de 500 kN, movimentado por servo válvula.



Figura 3.3- Pórtico com atuador hidráulico para ensaio de estruturas.

- Sistema de aquisição de dados (Quantun, HBM, Alemanha) com 8 canais.

- Medidor de umidade (PM1-E, Merlin, Brasil) sem pinos ou eletrodos com regulagem da densidade de 0,3 g.cm⁻³ a 1,1 g.cm⁻³ de 0,01 em 0,01 g.cm⁻³ e faixa de medição de 1 a 100% (Figura 3.4).



Figura 3.4- Medidor de umidade Merlin (PM1-E).

- Outros instrumentos: balança de precisão, paquímetros digitais, estufa normal com controle de temperatura.

3.3 Metodologia

3.3.1 <u>Retirada das toras</u>

No caso das árvores de Pinus elliottii foram retiradas de forma consecutiva de uma a três toras de 3,5 m (Figura 3.5a). O número de toras obtidas de cada árvore dependeu do diâmetro da árvore, pois esse diâmetro teria que ser suficiente para a retirada de peças de seção transversal mínima de 0,05 m x 0,10 m. Essa seção foi adotada em função da NBR 7190/97 que propõe que peças estruturais principais tenham área mínima de 0,005 m² e dimensão mínima da seção transversal de 0,05 m.

No caso das árvores de Eucalipto grandis foram retiradas sempre 3 toras de 3,5 m sendo a primeira a partir da base, a segunda a partir de 7 m e a terceira a partir de 14 m (Figura 3.5b).

Para as árvores de Cedro australiano e as provenientes de clones de eucalipto, foi retirada apenas uma tora com comprimento de aproximadamente 2,0 m, pois as árvores dessas espécies eram ainda jovens e em alturas superiores os diâmetros eram muito pequenos.

Todas as toras foram identificadas segundo a árvore de procedência e a posição de retirada no tronco (base - B, meio - M ou topo - T). A Figura 3.6 exemplifica a identificação de uma tora de Eucalipto grandis retirada da base (B) da árvore denominada "1" (1B)



(a) (b) Figura 3.5- (a) Representação da retirada das toras de Pinus eliiottii (Fonte: Massak, 2010). (b) Representação da retirada das toras de Eucalipto grandis (Fonte: Massak, 2010).



Figura 3.6 - Identificação do número da árvore e da posição de retirada em relação ao comprimento (Eucalyptus grandis).

3.3.2 Retirada das vigas

Para as espécies de Pinus elliotti e Eucalipto grandis, após o corte das toras foi feito o desdobro das mesmas, retirando-se o maior número possível de vigas com seções estruturais (mínimo de 0,10 m x 0,05 m) e comprimento de 2,5 m (Figura 3.7). Para o caso das toras provenientes das árvores de Cedro australiano e de clones de eucalipto, devido ao pequeno diâmetro, só foi possível a retirada de uma viga de cada tora. Além disso, para as vigas dessas duas espécies (Cedro australiano e de clones de eucalipto) utilizou-se a seção recomendada pela norma brasileira para ensaios em corpos de prova de flexão (0,05 m x 0,05 m) e comprimento mínimo de 1,15 m, porque o diâmetro das toras não possibilitou a retirada de peças com seção estrutural (0,05 m x 0,10 m).

Em virtude do processo de desdobro e da dimensão das peças, as vigas foram numeradas de forma consecutiva durante o processo de desdobro, não sendo identificadas segundo a posição de retirada na seção transversal da tora. Assim, cada viga recebeu a identificação correspondente ao número da árvore, à posição de retirada da tora ao longo do tronco da árvore (B, M ou T) e à ordem de retirada na tora.



Figura 3.7- Esquema de retirada das vigas de uma tora (Fonte: Massak, 2010).

3.3.3 Ensaios

3.3.3.1 Medições de ultrassom nas árvores

As árvores passaram por medições de ultrassom para determinação do tempo de propagação das ondas. A Figura 3.8 ilustra o posicionamento dos transdutores durante as medições na árvore, na qual os transdutores são posicionados na mesma face.



Figura 3.8- Medição indireta com propagação da onda na direção paralela às fibras.

A medição foi realizada posicionando um dos transdutores de faces exponenciais na altura do DAP (diâmetro na altura do peito, aproximadamente 1,30 m) enquanto o outro foi posicionado ora 0,50 m abaixo ora 0,50 m acima do DAP. Assim, foram realizadas medições em 8 diferentes pontos em torno da circunferência do tronco da árvore.

Ensaios preliminares indicaram que a velocidade longitudinal nas toras recém abatidas (V_{LL}) variou de 1500 a 3000 m.s⁻¹. Dessa forma, com o uso dos transdutores de frequência (f) de 45 kHz, foi possível calcular o comprimento da onda (λ =V_{LL}/f), que está em torno de 0,03 m a 0,07 m. Assim, adotou-se 0,5 m como comprimento de percurso de forma que a relação entre o comprimento de percurso e o comprimento de onda estaria entre aproximadamente 7 e 17 vezes. Com essa relação entre comprimento de onda e comprimento de percurso, segundo Bartholomeu *et al.* (2003), espera-se que a onda superficial percorra a árvore com comportamento e velocidade aproximadamente igual à onda de compressão.

Transdutores de 45 kHz de frequência foram adotados na pesquisa uma vez queensaios preliminares demonstraram que os mesmos permitiram a obtenção de sinal adequado, em termos de amplitude, quando utilizado em equipamento de grande potência, como é o caso do USLab. Além disso, conforme verificado anteriormente, esse transdutor é adequado em termos de relação comprimento de onda (λ)/comprimento de percurso (L), permitindo atender a aspectos teóricos relacionados à consideração de propagação de ondas em meios infinitos.

Carter *et al.* (2005), Yin *et al.* (2010), Wang *et al.* (2001), Wang *et al.* (2007) e Autry e Achim (2008), que também realizaram medições em árvores, utilizaram, para o caso das medições indiretas, transdutores de faces exponenciais e os posicionaram de forma inclinada (aproximadamente 45°). O posicionamento dos transdutores a 45° favorece a obtenção de ondas longitudinais dentro de um percurso menor, além de permitir maior profundidade de medição.

Para que o contato entre o transdutor e o tronco se desse de forma adequada, foram feitos, utilizando-se furadeira, pequenos furos nos pontos de medição, os quais permitiram que a ponta do transdutor exponencial ficasse adequadamente posicionada (Figura 3.9).



Figura 3.9- Furação no tronco para a introdução do transdutor de face exponencial.
O transdutor exponencial é inserido no orifício de forma inclinada (aproximadamente 45°) favorecendo o percurso da onda na direção longitudinal (Figura 3.10).



Figura 3.10- Medição na árvore com o uso do transdutor exponencial.

A velocidade de propagação das ondas de ultrassom foi calculada utilizando-se a equação 3.1.

$$V = \frac{L}{t} \ge 10^6$$
 Equação 3.1

Onde:

V = velocidade de propagação da onda em uma determinada direção (m.s⁻1);

L = comprimento de percurso da onda (m).

t = tempo de propagação da onda em uma determinada direção (μ s).

Para o valor de L se considerou a distância entre os furos = 0,50 m. Para garantir esta distância e facilitar as medições na floresta, foi confeccionado um gabarito no qual esta medida foi fixada.

3.3.3.2 Medições de ultrassom nas toras

Após as medições na árvore viva, a mesma era abatida e do tronco eram retiradas toras com o comprimento variando de 1,8 a 3,5 m, conforme item 3.3.1. O número de toras retiradas de cada árvore foi dependente da altura e do diâmetro da árvore. As toras foram retiradas a partir da base até que fosse possível obter diâmetro que permitia a retirada de vigas de, no mínimo, 0,05 m x 0,10 m (Pinus elliottii e Eucalipto grandis) ou 0,05 m x 0,05 m (clones de eucalipto e Cedro australiano).

Para todas as árvores de Eucalipto grandis foi possível a retirada de três toras, nas diferentes alturas. Para o Pinus elliottii a tora da base sempre existiu, mas a existência das demais toras (M e T) dependeu do diâmetro da árvore. No caso das árvores de Cedro australiano e de clones de eucalipto, por estas apresentarem um pequeno diâmetro, somente foi possível a retirada da tora da base.

Medições de tempo de propagação de ondas de ultrassom foram realizadas na tora recém abatida utilizando-se transdutores de faces planas de 45 kHz de frequência.

As medições nas toras foram realizadas na direção longitudinal e de forma direta, ou seja, com os transdutores posicionados nas extremidades.

Para que se tivesse uma avaliação global da tora as medições foram realizadas em pelo menos 5 pontos da seção transversal (Figura 3.11). O acoplamento do transdutor de faces planas foi realizado utilizando-se gel medicinal.



Figura 3.11- Medição de ultrassom nas toras.

De posse do comprimento da tora (L) e do tempo de propagação da onda foi calculada a velocidade de propagação utilizando-se a Equação 3.1.

3.3.3.3 Medições de ultrassom e ensaios de flexão estática nas vigas

Após as medições as toras foram desdobradas em vigas de seção estrutural – seção transversal mínima de 0,05 m x 0,10 m (0,005 m²) – de acordo com a NBR 7190/97 ou peças com seção de 0,05 m x 0,05 m (seção de corpos de prova de flexão - NBR 7190/97) e comprimento variando de 1,8 m a 2,5 m. Os comprimentos foram adotados em função da altura da peça, de forma a ser possível sempre garantir que o vão livre da viga fosse, pelo menos, 21 vezes a altura, minimizando-se a influências das tensões de cisalhamento no ensaio de flexão estática.

As vigas foram então ensaiadas por ultrassom (condição saturada) e, em seguida, encaminhadas ao SENAI de Itatiba para secagem em câmara de secagem, com controle de umidade relativa e de temperatura, até atingirem umidade em torno de 12% - umidade de referência da NBR 7190/97. O programa de secagem utilizado não foi fornecido pela empresa contratada.

Ao atingirem a umidade de referência as vigas foram novamente ensaiadas por ultrassom. As medições de tempo de propagação das ondas foram realizadas utilizando-se transdutores de faces planas de 45 kHz. Para as medições os transdutores foram posicionados nas extremidades (propagação longitudinal) em três pontos da seção transversal, de acordo com a NBR 15521/2007 (Figura 3.12).



Figura 3.12- Medições na seção transversal (Fonte: NBR 15521/2007).

Também de acordo com a NBR 15521/2007, após a determinação da velocidade (V_{LL}) nos diferentes pontos da seção transversal, o valor de V_{LL} final adotado foi o valor intermediário, ou seja, no caso de três medições foram eliminados os valores máximo e mínimo. Caso as diferenças de velocidades nos pontos de medição fossem maiores que 10 %, ou se tenha utilizado somente duas medições, tomou-se, por segurança, o valor mínimo.

Com o tempo de propagação das ondas de ultrassom a velocidade na viga, na direção longitudinal (V_{LL}), foi determinada utilizando-se a Equação 3.1.

A densidade aparente de cada uma das vigas foi calculada através da Equação 3.2.

$$\rho = \frac{m_u}{V_u}$$
 Equação 3.2

Onde: ρ = densidade aparente (kg.m⁻³); m_u = massa da viga na umidade de 12% e V_u = volume da viga na umidade de 12%.

As velocidades de propagação das ondas (V_{LL}) e a densidade aparente (ρ) na condição seca foram utilizadas para determinar o coeficiente da matriz de rigidez (C_{LL}) por meio da equação 3.3

$$C_{LL} = \rho V_{LL}^{2} (x \ 10^{-6})$$
 Equação 3.3

Onde: C_{LL} = coeficiente da matriz de rigidez (MPa); ρ = densidade aparente da peça (kg.m⁻³) e V_{LL} é a velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal (m.s⁻¹).

Após as medições por ultrassom as vigas foram ensaiadas à flexão estática para a determinação do módulo de elasticidade (E_M) e do módulo de ruptura (f_m). Os ensaios nas vigas de seção estrutural (Pinus elliottii e Eucalipto grandis) foram realizados de acordo com a ASTM D198-08 (2008), uma vez que a norma brasileira NBR 7190/1997, não utiliza ensaios em peças estruturais. Os ensaios nos corpos de prova de flexão de Cedro australiano e de clones de eucalipto foram realizados de acordo com a NBR 7190/1997.

Os ensaios foram realizados em pórtico de capacidade de 50 kN e as medições dos deslocamentos verticais foram realizadas no ponto central por meio de transdutor de posição linear eletrônico de 0,001 mm de resolução, acoplado a um sistema de aquisição de dados que permite a realização das leituras de carga e de deformação automatizadas. Assim, para cada ensaio foi criado um arquivo de dados que posteriormente foi utilizado para o cálculo de f_m e E_M .

De acordo com a ASTM D198-08 (2008) o ensaio em vigas estruturais pode ser realizado com aplicação de carga no centro (Figura 3.13) desde que a seção transversal e o vão não sejam muito grandes. A definição da magnitude encontra-se no Apêndice X5.1.1, indicando que para que neste tipo de ensaio (carga centrada) não se tenha influência do cisalhamento, o vão livre mínimo da viga deverá ser pelo menos 15 vezes a sua altura. No mesmo item a referida norma especifica que o ensaio com carga centrada não deve ser realizado se a largura da peça a ser ensaiada for maior que 4 polegadas (0,1016 m). Considerando a seção de 0,05 m x 0,10 m e comprimento de 2,5 m adotado para as vigas de Eucalipto grandis e Pinus elliottii e, seção de 0,05 m x 0,05 m e comprimento de 1,15 m para as vigas de Cedro australiano e clones de eucalipto, o ensaio com carga centrada pôde ser realizado sem prejuízo para os resultados, pois em ambos os casos utilizou-se a relação mínima L/h de 21.



Figura 3.13- Esquema do ensaio da viga. Fonte: ASTM D198-08 (2008).

O f_m e E_M foram determinados também de acordo com a ASTM D198-08 (2008). Nesta norma o f_m é calculado utilizando o momento máximo, o qual é obtido com a máxima carga (P_{max}) absorvida pela viga, embora não necessariamente a ruptura ocorra com esta carga, principalmente no caso de carga centrada. O f_m foi determinado utilizando a Equação 3.4.

$$f_m = \frac{3P_{\text{max}}L}{2bh^2} \qquad \text{Equação 3.4}$$

Onde: L = vão livre (distância entre os apoios); b = largura da viga; h = altura da viga

O E_M foi determinado utilizando-se o trecho linear do gráfico carga x deslocamento vertical. De acordo com a ASTM D198-08 (2008) usualmente se utiliza a inclinação do gráfico no trecho linear do gráfico carga x deslocamento vertical, mas se os dados são obtidos utilizando sistema de aquisição o cálculo pode ser realizado utilizando dois diferentes níveis de tensão abaixo do limite de proporcionalidade. Esta norma indica que os níveis adotados são de responsabilidade do usuário do método, mas que se pode utilizar o trecho entre 10% e 30% ou 20% e 40% do f_m. A ASTM D198-08 (2008) alerta que o valor do E_M pode estar afetado pelo cisalhamento, principalmente se a relação vão livre/altura for pequena (não obedecer os limites estabelecidos anteriormente). Neste caso esta norma se refere ao E_M como sendo aparente e não real. O módulo aparente pode ser corrigido por meio de expressões que levam em conta o módulo de elasticidade transversal da madeira (G). No entanto, infelizmente, para as madeiras brasileiras não são conhecidos os valores de G das espécies, dificultando a obtenção desta correção. O cálculo de G utilizando as indicações da NBR 7190/97 (E longitudinal/20) não permite a obtenção de valores confiáveis, como já observado em outras

pesquisas desenvolvidas no LabEND. Desta forma, como nessa pesquisa foram obedecidos os limites de L/h para minimização deste efeito, o E_M foi determinado utilizando-se a Equação 3.5.

$$E_{M} = \frac{(P_{40\%} - P_{20\%})L^{3}}{4bh^{3}(\Delta_{40\%} - \Delta_{20\%})}$$
Equação 3.5

Onde: $P_{20\%}$ e $P_{40\%}$ são as cargas correspondentes a 20% e 40% da carga P_{max} ; $\Delta_{20\%}$ e $\Delta_{40\%}$ são os deslocamentos correspondentes às cargas $P_{20\%}$ e $P_{40\%}$; L = vão livre; b = largura da viga; h = altura da viga.

Outro problema que pode surgir nos ensaios de flexão em vigas é a perda de estabilidade. De acordo com a ASTM D198-08 (2008) vigas que tenham altura da seção transversal maiores do que 3 vezes a largura deverão ter suporte lateral para impedir a instabilidade. Estes suportes devem ser colocados pelo menos em pontos localizados na metade da distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga. No caso dessa pesquisa a altura máxima da viga foi de 2 vezes a largura, de forma que não ocorreram problemas de estabilidade lateral.

Para a aplicação do carregamento a ASTM D198-08 (2008) indica que, para vigas retangulares, a superfície do bloco de carregamento tenha raio de curvatura de 2 a 4 vezes a largura da viga. Essa indicação foi considerada na construção do bloco de aplicação de cargas utilizado nessa pesquisa.

3.3.4 Análise dos resultados

Do ponto de vista prático, as medições de ultrassom nas árvores só foram realizadas nas proximidades do DAP, de forma que a comparação com os resultados dos ensaios estáticos de flexão foram realizados utilizando-se as peças provenientes de todas as toras retiradas da árvore, independente de sua posição longitudinal. No entanto, no caso das toras a comparação pode evidenciar as diferenças em relação à posição na árvore, já que todas as toras passaram por medições de ultrassom. Antes de iniciar as avaliações estatísticas relativas ao objetivo principal da pesquisa, foi verificada a normalidade dos dados. Essa avaliação foi importante para a validação dos testes estatísticos utilizados.

Para a avaliação considerando os ensaios na árvore foram utilizadas as médias, para cada árvore, dos resultados de densidade, coeficiente de rigidez, módulo de elasticidade e de resistência e velocidades longitudinais nas toras e nas vigas. O mesmo procedimento foi realizado no caso dos ensaios nas toras.

Para a avaliação da relação entre as velocidades árvore-tora e tora-viga, na condição saturada, foram utilizadas regressões. Todas as análises estatísticas foram feitas utilizando-se o programa computacional Statigraphics Centurion XV.

Além das análises estatísticas realizou-se um estudo de caso, utilizando-se as faixas de classificação da Norma Australiana AS 2878 (SAA, 1986b), para exemplificar a classificação da madeira a partir do ensaio de ultrassom na árvore ou na tora recém abatida.

4. **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

4.1 Apresentação e análise geral dos resultados

A Tabela 4.1 apresenta o número de árvores, por espécie, suas respectivas idades, diâmetros médios no DAP (Φ m), número de toras e número de vigas que constituíram a amostragem utilizada na pesquisa.

Tabela 4.1- Quantidade de árvores e seus respectivos diâmetros médios no DAP(Φ m), número de toras e número de vigas da amostragem.

		Idade	Φm		
Espécie	Árvores	(anos)	(m)	Toras	Vigas
Pinus elliottii	12	8-23	0,26	28	90
Eucalipto grandis	5	34	0,54	15	255
Clones de eucalipto	133	3,5	0,16	133	133
Cedro australiano	50	4	0,16	50	56
Total	201	-	-	226	534

Os valores de velocidade longitudinal média na árvore ($V_{a.L.}$), velocidade longitudinal média na tora (V_T) e velocidade longitudinal média na viga saturada (V_{LLsat}), obtidas a partir do ensaio de ultrassom, estão apresentados na Tabela 4.2. Os resultados completos podem ser vistos no Anexo.

Observa-se que os coeficientes de variação são muito superiores no caso do Pinus elliottii. Isso ocorreu porque no caso dessa espécie havia variação de idade entre as árvores, o que não ocorreu no caso das demais espécies avaliadas.

	$V_{a.L.}$	V_{T}	V _{LLsat}
	(ms^{-1})	(ms^{-1})	(ms^{-1})
Dinus alliattii	2022	2157	2858
I mus chiotan	(52)	(19)	(20)
Eucolinto grandia	4832	4618	4764
Eucanpio granuis	(4)	(5)	(4)
Clones de eucolinto	4348	3892	4006
Ciones de edeanplo	(5)	(5)	(5)
Cedro australiano	4339	3910	4420
	(6)	(6)	(5)

Tabela 4.2- Valores médios de velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$), velocidade longitudinal na tora (V_T) e velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}).

*Valores entre parêntesis indicam o coeficiente de variação (%).

Pesquisas realizadas por Lindström *et al.* (2002) em sete clones de pinus radiata (*Pinus radiata*), de 4 anos de idade, apresentaram valores médios para a velocidade longitudinal na árvore de 1943 m.s⁻¹, superior à média obtida para o mesmo parâmetro ($V_{a.L.}$) para o Pinus elliotti dessa pesquisa (1874 m.s⁻¹). Considerando as árvores de Pinus elliottii com idades de 15, 22 e 23 anos, a média da velocidade longitudinal na árvore foi de 2986 m.s⁻¹, enquanto para as árvores mais jovens (8, 9 e 13 anos) essa velocidade foi de 1148 m.s⁻¹.

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores médios, para as vigas, de densidade (ρ), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de resistência na flexão (f_m) e módulo de elasticidade na flexão (E_M), para cada uma das amostragens utilizadas na pesquisa. Os resultados completos podem ser vistos no Anexo.

Tabela 4.3- Valores médios de densidade (ρ), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de resistência na flexão (f_m) e módulo de elasticidade na flexão (E_M) para as vigas, considerando as diferente<u>s</u> espécies.

	ρ (kg.m ⁻³)	C _{LL} (MPa)	f _m (MPa)	E _M (MPa)
Dipus alliattii	437	9008	41	5753
r mus cinotui	(11)	(26)	(22)	(30)
Eucolipto grandis	725	25098	70	15503
Eucampio grandis	(16)	(7)	(12)	(12)
Clanas da avaslinta	550	15818	54	5516
Ciones de edeanplo	(8)	(13)	(11)	(16)
Cadro australiano	326	8701	30	3372
Ceuro australiano	(12)	(15)	(20)	(23)
Média	512	14656	49	7536

*Valores entre parêntesis indicam o coeficiente de variação (%).

A velocidade longitudnal média na árvore, obtida por Wang *et al.* (2001) em 168 árvores de duas diferentes espécies (*Tsuga heterophylla e Picea sitchensis*) foi de 3462 m.s⁻¹ para uma das espécies e para a outra apresentou valor de 3604 m.s⁻¹. O módulo de elasticidade obtido de ensaio de flexão estática com madeira proveniente de 56 das 168 árvores ensaiadas pelos autores apresentou valores de 7894 MPa e 7308 MPa, respectivamente. Esses valores são compatíveis, em termos de ordem de grandeza, com os valores de velocidade longitudinal na árvore (V_{a.L.}) e módulo de elasticidade nas vigas (E_M) encontrados nessa pesquisa.

Como consequência da variabilidade da amostragem, já comentada anteriormente, o Pinus elliotti foi, novamente, a espécie que apresentou maior variabilidade nos resultados de flexão estática. Verifica-se, na Tabela 4.3, que a variabilidade da densidade do Eucalipto grandis e do Cedro Australiano foi superior à do Pinus elliotti, mesmo se tratando de árvores de mesma idade. A variabilidade de densidade do Eucalipto grandis não se refletiu no C_{LL} nem em f_m e E_M, enquanto que no Cedro Australiano se verifica maior reflexo nessas mesmas propriedades. Esse resultado indica que a densidade nem sempre tem uma relação tão direta com a rigidez e a resistência da madeira.

As propriedades da madeira de Pinus elliottii, ensaiada nessa pesquisa, apresentou valores inferiores aos indicados pela NBR 7190 (1997) para todos os parâmetros (Tabela 4.3). A densidade foi 22% inferior, o E_M 43% inferior e o f_m 38% inferior. Esse resultado pode estar relacionado à questão do manejo da floresta, uma vez que, no caso das florestas mais velhas, não havia, por parte desse proprietário, essa preocupação. As florestas mais jovens, no entanto, estão sendo manejadas, de forma que é provável que as propriedades das mesmas sejam superiores ao atingirem 23 anos.

Por outro lado, a madeira de Eucalipto grandis, apresentou valores superiores aos indicados pela NBR 7190 (1997) para a densidade (12% superior) e para o E_M (26% superior) e, valor igual ao da norma para o f_m . Mesmo considerando que as relações da NBR 7190 (1997) não são as mais adequadas, uma vez que foram estabelecidas para corpos de prova isentos de defeito e, no caso dessa pesquisa foram utilizadas vigas de tamanho estrutural com e sem defeitos, esses resultados mostram que é muito difícil, para a madeira, estabelecer valores de propriedades ou ainda relações fixas de variação dessas propriedades.

Antes de iniciar as avaliações estatísticas relativas ao objetivo principal da pesquisa (avaliação das propriedades da madeira a partir da árvore e toras recém abatidas), verificou-se

se os resultados de velocidade radial e de velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.r.} e V_{a.L.}$), de velocidade longitudinal na tora (V_T), de velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}), de densidade (ρ), de coeficiente de rigidez (C_{LL}), de módulo de elasticidade (E_M) e de módulo de ruptura (f_m) apresentavam distribuição normal. Essa avaliação é importante para a validação dos testes estatísticos posteriormente utilizados.

Para essa análise foram utilizados os parâmetros de assimetria e de curtose e o gráfico de probabilidade normal. Para o caso dessas estatísticas (assimetria e curtose) os valores devem estar entre -2 e +2 para que os dados sejam considerados como tendo distribuição normal e, para o caso do gráfico, quanto mais se aproximar de uma reta, mais os dados se aproximam da distribuição normal. As Tabelas 4.4 e 4.5 resumem os resultados obtidos para essas estatísticas. A Figura 4.1 exemplifica, para o E_M das vigas de Eucalipto grandis, o gráfico da distribuição normal.

Tabela 4.4- Valores dos parâmetros de assimetria e de curtose para os resultados de velocidade radial na árvore ($V_{a.r.}$), velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$), velocidade longitudinal na tora (V_T) e velocidade longitudinal na viga saturada ($V_{LL sat}$).

	Pinus elliottii					
	V _{a.r.}	V _{a.L.}	VT	V _{LL sat}		
assimetria	-0,14	0,95	-0,64	-1,68		
curtose	-0,18	-0,87	0,32	-0,25		
		Eucalipto grandis				
assimetria	0,66	-0,38	-1,43	-0,84		
curtose	0,31	-0,39	0,24	-0,85		
	Clone de eucalipto					
assimetria	-1,95	0,54	0,20	1,08		
curtose	-0,31	1,09	-0,75	-1,20		
	Cedro australiano					
assimetria	0,35	-0,56	-0,12	0,19		
curtose	-1,28	-0,63	-1,15	-0,38		

	Pinus elliottii				
	ρ	C _{LL}	E _M	f _m	
assimetria	1,59	-0,20	-0,04	0,03	
curtose	-0,53	-1,53	-0,89	-0,60	
		Eucalipto	grandis		
assimetria	-1,06	-0,06	1,08	-0,87	
curtose	-0,15	-0,80	0,88	-0,55	
		Clone de d	eucalipto		
assimetria	0,36	2,56	1,92	0,30	
curtose	-0,77	-1,04	-1,57	-1,21	
	Cedro australiano				
assimetria	-1,45	-1,53	0,92	0,25	
curtose	-0,32	1,08	-1,16	-0,60	

Tabela 4.5- Valores dos parâmetros de assimetria e de curtose para os resultados de densidade (ρ), de coeficiente de rigidez (C_{LL}), de módulo de elasticidade (E_M) e de módulo de ruptura (f_m), por espécie.



Figura 4.1 – Exemplo de gráfico de probabilidade normal. Dados: E_M das vigas de Eucalipto grandis.

Verifica-se, por meio dos valores das estatísticas, que a hipótese de normalidade pode ser aceita para todos os parâmetros, pois em todos os casos as duas estatísticas apresentaram valores dentro do intervalo de aceitação da hipótese.

4.2 Avaliação acústica na árvore como parâmetro de previsão de propriedades da madeira dela proveniente

As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram o comportamento da relação entre a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore $(V_{a,L})$ e os parâmetros destrutivos, módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) , respectivamente, obtidos a partir do ensaio de flexão estática nas vigas das diferentes espécies avaliadas. Para essa avaliação foram considerados os ensaios nas 90 vigas e 12 árvores de Pinus elliottii, 255 vigas e 5 árvores de Eucalipto grandis, 133 vigas e o mesmo número de árvores de clones de eucalipto e 56 vigas e 50 árvores de Cedro australiano.



Figura 4.2- Comportamento da relação entre a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore $(V_{a,L})$ e o módulo de elasticidade (E_M) considerando as diferentes espécies avaliadas.



Figura 4.3- Comportamento da relação entre a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore $(V_{a,L})$ e o módulo de ruptura (f_m) , considerando as diferentes espécies avaliadas.

Ao observar as Figuras 4.2 e 4.3 pode-se perceber que, para ambas as propriedades mecânicas avaliadas (E_M e f_m), os dados de três das quatro amostras ensaiadas, Eucalipto grandis, Cedro australiano e clone de eucalipto, apresentam-se como uma "nuvem de pontos". O mesmo comportamento não é observado para o caso do Pinus elliottii, que apresenta uma distribuição mais espalhada. Isso pode ser explicado pela variação de idade das árvores de Pinus elliottii (de 8 a 23 anos), que se refletiu nas variações de velocidade de ultrassom e nas propriedades mecânicas da madeira (resistência e rigidez).

A velocidade de ultrassom longitudinal nas árvores de Cedro australiano e de clones de eucalipto não refletiu as propriedades de resistência e de rigidez da madeira. Isso pode ser observado pelos elevados valores de velocidade longitudinal na árvore e baixos valores para as propriedades mecânicas (E_M e f_m), quando comparado com as outras duas amostragens (Pinus elliottii e Eucalipto grandis).

Uma explicação para esse comportamento atípico é o fato dessas árvores apresentarem somente madeira juvenil em sua composição, pois as mesmas tinham 4 anos (Cedro australiano) e 3,5 anos de idade (clones de eucalipto).

O modelo que descreve o comportamento das propriedades elásticas e mecânicas em função da velocidade de propagação de ondas de ultrassom é diferente na madeira juvenil e adulta (BUCUR, 2006), fazendo com que a "nuvem de pontos" da madeira juvenil não se enquadre no modelo de variação apresentado pela madeira adulta. Bucur (2006) indica que a zona de madeira juvenil é uma zona de crescimento contínuo da velocidade longitudinal de propagação de ondas de ultrassom e que, na madeira adulta a velocidade se estabiliza. A mesma autora indica que, para muitas espécies, principalmente de reflorestamento, na região juvenil as velocidades podem ser elevadas sem que haja uma correspondência da rigidez.

Além disso, se observa, tanto para o módulo de elasticidade quanto para o módulo de ruptura, que o clone de eucalipto apresentou valores superiores aos do Cedro australiano. No entanto, o ultrassom não detectou essa diferença, apresentando valores de velocidade equivalentes.

Uma das hipóteses para explicar esse comportamento poderia estar ligada à estrutura interna dessas duas espécies. Conforme destacado por Zhu *et al.* (2005) as diferenciações entre madeira juvenil e adulta estão fortemente ligadas ao menor comprimento das fibras e ao maior ângulo de inclinação da microfibrila. Essas propriedades variam muito mais de espécie para

espécie na madeira juvenil do que na adulta, e podem afetar significativamente as propriedades elásticas e mecânicas. Se essas características anatômicas forem muito diferentes na madeira juvenil do clone de eucalipto e do Cedro Australiano, a velocidade poderia ser semelhante, mas as propriedades mecânicas não.

A Tabela 4.6 resume os modelos de correlação e os parâmetros de regressão dos resultados dos ensaios não destrutivos nas árvores (velocidade longitudinal - $V_{a,L}$ e velocidade radial - $V_{a,r.}$), com os parâmetros do ensaio estático na viga (módulo de elasticidade e de ruptura), com o parâmetro físico da viga (densidade - ρ) e com o coeficiente de rigidez da viga (C_{LL}). A significância da correlação foi avaliada pelo P-valor e a adequação do modelo de regressão pelos gráficos de resíduos que não apresentaram tendências. Quando P-valor da tabela de Anova é menor ou igual a 0,05 há correlação estatística entre os parâmetros avaliados com 95% de nível de confiança.

Tabela 4.6- Modelos e parâmetros da regressão entre velocidade longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e o módulo de elasticidade (E_M) , velocidade longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e o módulo de ruptura (f_m) e a velocidade longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e o coeficiente de rigidez (C_{LL}) , para as espécies analisadas.

Pinus elliottii						
Regressão	R	P-valor	Erro			
$E_{M} = 4027,84 + 0,853576 * V_{a.L.}$	0,52	0,0800	1523			
$f_m = 33,4016 + 0,00359374 * V_{a.L.}$	0,43	0,1593	8,2			
$C_{LL} = 6375,69 + 1,30211*V_{a.L.}$	0,58	0,0493	2023			
Eucalipto gra	andis					
$E_{M} = 26511.9 - 2.27831 * V_{a.L.}$	-0,25	0,6826	2034			
$f_{\rm m} = 178,192 - 0,0223071 * V_{\rm a.L.}$	-0,53	0,3543	8,2			
$C_{LL} = 33437,5 - 1,72587*V_{a.L.}$	-0,19	0,7600	2077			
Clone de eucalipto						
$E_{\rm M} = -1271,36 + 1,55225 * V_{\rm a.L.}$	0,37	0,0000	737			
$f_m = 19,0205 + 0,00804001 * V_{a.L.}$	0,25	0,0048	6,0			
$C_{LL} = -2245,7 + 4,11098 * V_{a.L.}$	0,46	0,0000	1498			
Cedro australiano						
$E_{\rm M} = -543,811 + 0,882276 * V_{\rm a.L.}$	0,39	0,0066	484			
$f_m = 10,8521 + 0,00433504 $ *V _{a.L.}	0,19	0,1946	5,1			
$C_{LL} = 4283,95 + 0,982448 * V_{a.L.}$	0,24	0,1020	874			

Ao avaliar a Tabela 4.6 observa-se que a maioria das regressões entre os ensaios de ultrassom na árvore e as propriedades da viga (E_M , f_m , C_{LL}) não foram significativas (P-valor > 0,05).

Para o caso do clone de eucalipto nota-se que todas as regressões foram significativas, enquanto para as outras espécies, com exceção do Eucalipto grandis (não apresentou nenhuma regressão significativa entre os parâmetros), a correlação significativa para a regressão ocorreu em apenas um dos casos.

Para o Pinus elliotti a regressão foi significativa entre o coeficiente de rigidez na viga e a velocidade longitudinal na árvore. Para Cedro australiano entre o modulo de elasticidade na viga e a velocidade longitudinal na árvore.

Mesmo nos casos onde a regressão foi estatisticamente significativa a correlação entre as variáveis, dada pelo coeficiente de correlação (R) foi baixa. Este resultado já era esperado, pois como foi observado nas Figuras 4.2 e 4.3, para 3 das 4 espécies avaliadas a amostragem não apresentou suficiente variabilidade para que se pudesse realizar análise de regressão.

Para que se tivesse maior variabilidade a próxima etapa de análises envolveu o resultado conjunto das espécies.

Tendo em vista que para o clone de eucalipto e para o Cedro australiano há somente madeira juvenil e que, pelas razões já explicadas, na madeira juvenil o comportamento entre as espécies podem se diferenciar muito, não permitindo uma análise em conjunto, nessa etapa as avaliações foram realizadas considerando-se somente o Pinus elliottii e o Eucalipto grandis, os quais apresentavam tanto madeira juvenil como adulta em sua composição. Os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7- Modelos e parâmetros da regressão entre velocidade longitudinal na árvore (V _{a.L.})
e o módulo de elasticidade (E _M), velocidade longitudinal na árvore (V _{a.L.}) e o módulo de
ruptura (f _m) e velocidade longitudinal na árvore (V _{a.L.}) e o coeficiente de rigidez (C _{LL}), para o
Pinus elliottii e o Eucalipto grandis.

Pinus elliottii e Eucalipto grandis							
Regressão R P-valor Erro							
$E_{\rm M} = 1050,2 + 2,65801 * V_{\rm a.L.}$	0,86	0,0000	2546				
$f_{\rm m} = 25,6499 + 0,00834266 * V_{\rm a.L.}$	0,81	0,0001	9,8				
$C_{LL} = 1313,96 + 4,36282 * V_{a.L.}$	0,88	0,0000	3871				

As regressões conjuntas realizadas considerando as árvores de Pinus elliottii e de Eucalipto grandis foram todas estatisticamente significativa (P-valor < 0,05). Os maiores coeficientes de correlação foram obtidos para as regressões entre a velocidade longitudinal na árvore e o módulo de elasticidade (0,86) na viga e entre a velocidade longitudinal na árvore e o coeficiente de rigidez da viga (0,88).

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam os gráficos das regressões feita para o Pinus elliottii e para o Eucalipto grandis considerando a velocidade de ultrassom longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e o módulo de elasticidade (E_M) e a velocidade de ultrassom longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e o módulo de ruptura (f_m) , respectivamente.



Figura 4.4- Regressão entre a velocidade de ultrassom longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e o módulo de elasticidade (E_M) na viga para o *Pinus Elliottii* e o *Eucalipto grandis*.



Figura 4.5- Regressão entre a velocidade de ultrassom longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e o módulo de ruptura (f_m) na viga para o Pinus Elliottii e o Eucalipto grandis.

Como era de se esperar, o parâmetro de rigidez (E_M) é melhor explicado pela velocidade na árvore ($R^2 = 74\%$) do que o parâmetro de resistência (f_m) (66%). O ensaio de ultrassom apresenta maior capacidade preditiva para a rigidez do que para a resistência, principalmente na flexão e na tração, já que nesses casos os defeitos (Ex: nós) e seus posicionamentos na peça têm grande influência nos resultados do módulo de ruptura da viga. Os valores encontrados para os coeficientes de determinação (R^2) da regressão entre a velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$) e o módulo de ruptura (f_m) (66%) nessa pesquisa, foram superiores aos encontrados por trabalho realizada por Autry e Achim (2008) que obtiveram valores de R^2 de 0,53 e de 0,59, respectivamente.

Com os resultados de módulo de elasticidade (E_M) apresentado por cada uma das vigas provenientes de uma mesma árvore, verificou-se a possibilidade de classificá-las, em classes de rigidez, a partir do ensaio de ultrassom na árvore, na direção longitudinal ($V_{a,L}$). Para isso, foram consideradas, a título de exemplo de aplicação, as faixas de classificação da Norma Australiana AS 2878 (SAA, 1986b) apresentadas na Tabela 4.8. Essa norma foi escolhida como parâmetro para este trabalho porque as primeiras faixas de classificação apresentam valores baixos para o módulo de elasticidade (mínimo de 4500 MPa), permitindo incorporar mesmo as vigas com baixo módulo de elasticidade, tais como as de clones de eucalipto, que apresentaram peças com E_M médio de 5516 MPa. Mesmo utilizando essa norma não foi possível classificar nenhuma viga de Cedro australiano, pois todas apresentaram módulo de elasticidade inferior a 4500 MPa.

A classificação das vigas nas classes de resistência da norma australiana não levou em consideração o módulo de ruptura característico das peças (f_m,k) , mas apenas o módulo de elasticidade. Esse procedimento foi realizado porque as propriedades de resistência da madeira, principalmente aquelas ligadas à tração, como é o caso do módulo de ruptura em flexão, são fortemente influenciadas pela posição dos defeitos. Quando o ensaio de ultrassom é realizado e a velocidade média é considerada como parâmetro, um defeito afetará a propagação da onda, diminuindo a velocidade média, independente de sua posição. No entanto, caso esse nó esteja situado em zonas de alta tensão (proximidades do meio do vão da viga) e em zona tracionada (face inferior da viga), a tensão de ruptura será muito mais afetada do que se o mesmo estiver em uma zona comprimida ou com tensões menores. Essa diferença de comportamento do ensaio não destrutivo e destrutivo certamente afetará a correlação entre ambos. Assim, é importante que a classificação por ultrassom seja associada à classificação visual, principalmente no caso das coníferas, onde a ocorrência de defeitos é muito maior e, no caso da madeira de florestas plantadas comercializada mais jovem, cuja seção contenha presença de medula. Essa mesma discussão foi também levantada por Massak (2010).

Classes	f_{mk}	f_{tk}	f_{vk}	$f_{c0,k}$	E _M
F34	34,5	20,7	2,45	26,0	21500
F27	27,5	16,5	2,05	20,5	18500
F22	22,0	13,2	1,70	16,5	16000
F17	17,0	10,2	1,45	13,0	14000
F14	14,0	8,4	1,25	10,2	12000
F11	11,0	6,6	1,05	8,4	10500
F8	8,6	5,2	0,85	6,6	9100
F7	6,9	4,1	0,70	5,2	7900
F5	5,5	3,3	0,60	4,1	6900
F4	4,3	2,6	0,50	3,3	6100
F3	3,4	2,0	0,45	2,6	5200
F2	2,7	1,6	0,35	2,1	4500

Tabela 4.8- Tabela de Faixas de Classificação da Norma Australiana (unidades em MPa). Fonte: Adaptada de AS 2878 (SAA, 1986b).

A Figura 4.6 apresenta o número de vigas que tiveram sua madeira classificada ou não classificada (N. C.), de acordo com as faixas da Norma Australiana AS 2878 (SAA, 1986b). Essa classificação foi feita considerando as diferentes espécies utilizadas nessa pesquisa.



Figura 4.6- Número de vigas classificadas e não classificadas (N. C.), de acordo com as faixas da AS 2878 (SAA, 1986b).

A figura 4.7 apresenta a relação entre a velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$) e a classificação das vigas segundo as faixas da norma australiana (AS2878 - SAA,1986b).



Figura 4.7- Relação entre a velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$) e a classificação das vigas segundo as faixas da norma australiana (AS2878 - SAA,1986b).

Para o Pinus elliottii, devido à variação de idade apresentada pelas árvores, as vigas foram, em sua grande maioria (80%), classificadas em 6 diferentes classes (F2, F3, F4, F5, F7 e F8), em média, 13% das vigas ficaram classificadas em cada uma dessas classes e praticamente a mesma porcentagem (14%) não se classificaram em nenhuma das faixas da AS 2878 (SAA, 1986b). Para essas árvores a velocidade variou de 990 m.s⁻¹ a 3756 m.s⁻¹. Para velocidades até 1200 m.s⁻¹ a classificação máxima foi F5, enquanto para velocidades maiores a classificação máxima passou a ser F8.

Para o Eucalipto grandis, 77% das vigas apresentaram madeira classificada como F14, F17 e F22 e a velocidade nas árvores variou de 4549 m.s⁻¹ a 5037 m.s⁻¹. A classificação foi mais concentrada e a variação da velocidade foi menor do que para o Pinus elliotti.

Para o clone de eucalipto, a maior parte das vigas (78%) apresentou madeira classificada nas faixas F2 e F3. No entanto, a velocidade nas árvores variou de 3786 m.s⁻¹ a 4815 m.s⁻¹, muito superior às velocidades obtidas nas árvores de Pinus elliottii. Esse resultado mais uma vez demonstra que o comportamento da madeira juvenil e adulta é muito diferenciado, não havendo como utilizar mesmas faixas de velocidade nas árvores para classificar ambas.

No caso do Cedro australiano não foi possível classificar nenhuma viga proveniente das árvores, assim 100% das árvores geraram madeira não classificada, segundo a norma utilizada na pesquisa. A velocidade nas árvores variou de 3871 m.s⁻¹ a 4789 m.s⁻¹, muito próximo dos valores obtidos para os clones de eucalipto. Esse resultado confirma a questão já destacada anteriormente de que, para a madeira juvenil, a espécie pode afetar, de forma mais significativa as propriedades mecânicas do que a velocidade (ZHU *et al.*, 2005).

A velocidade longitudinal média nas árvores de Pinus elliottii representou 58% da velocidade longitudinal média nas árvores de Eucalipto grandis, e esta diferença foi muito próxima para os módulos de elasticidade (63%), refletindo na classificação das vigas delas provenientes. Esse resultado indica que é possível, a partir da velocidade longitudinal na árvore, estimar uma faixa de classificação da madeira proveniente dessas árvores, bem como diferenciar essas árvores em termos de propriedades de rigidez, desde que as mesmas não sejam constituídas essencialmente por madeira juvenil, como foi o caso do clone de eucalipto e do Cedro australiano dessa pesquisa.

Além disso, a variação de idade das árvores de Pinus elliottii permitiu concluir que, com o ensaio longitudinal de ultrassom na árvore, é possível, ao produtor florestal, acompanhar o crescimento das mesmas. Essa ferramenta de análise lhes permitiria, portanto, programar tratamentos silviculturais, auxiliar na tomada de decisões econômicas e ambientais a partir do conhecimento da qualidade dos seus recursos florestais e dos produtos que desejam comercializar.

4.3 Avaliação acústica na tora como parâmetro de previsão de propriedades da madeira dela proveniente

As Figuras 4.8 e 4.9 ilustram a relação entre a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T) e os parâmetros destrutivos, módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m), respectivamente, obtidos a partir do ensaio de flexão estática nas vigas das diferentes espécies avaliadas. Para essa avaliação foram considerados os ensaios em 28 toras e 90 vigas de Pinus elliottii, 15 toras e 255 vigas de Eucalipto grandis, 133 toras e o mesmo número de vigas de clones de eucalipto e 50 toras e 56 vigas de Cedro australiano.



Figura 4.8- Comportamento da relação entre a velocidade de ultrassom longitudinal na tora (V_T) e o módulo de elasticidade (E_M) considerando as diferentes espécies avaliadas.



Figura 4.9- Comportamento da relação entre a velocidade de ultrassom longitudinal na tora (V_T) e o módulo de ruptura (f_m) , considerando as diferentes espécies avaliadas.

As avaliações feitas para relação entre a velocidade de ultrassom na tora (V_T) e o módulo de elasticidade (E_M) apresentada no gráfico da Figura 4.8 e a relação entre a velocidade de ultrassom na tora (V_T) e o módulo de ruptura (f_m) apresentada no gráfico da Figura 4.9 são semelhantes às apresentadas para os mesmos parâmetros destrutivos $(E_M e f_m)$ e a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore $(V_{a.L.})$ apresentadas no item 4.1. O comportamento desses gráficos foram semelhantes, indicando que a velocidade longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e a velocidade longitudinal na tora (V_T) predizem, de forma semelhante, as propriedades de rigidez e de resistência da madeira.

A Tabela 4.9 resume os modelos e os parâmetros de regressão dos resultados do ensaio não destrutivo nas toras (V_T), com os estáticos (módulo de elasticidade e de ruptura) e com o coeficiente de rigidez (C_{LL}).

Tabela 4.9- Modelos e parâmetros da regressão entre velocidade longitudinal na tora (V_T) e o módulo de elasticidade (E_M) , velocidade longitudinal na tora (V_T) e o módulo de ruptura (f_m) e velocidade longitudinal na tora (V_T) e o coeficiente de rigidez (C_{LL}) , para as espécies analisadas.

Pinus elliottii					
Regressão	R	P-value	Erro		
$E_{\rm M} = -3420,46 + 4,32024 * V_{\rm T}$	0,77	0,0000	1031		
$f_m = 4,17144 + 0,0168537*V_T$	0,57	0,0035	7,0		
$C_{LL} = -4849,56 + 6,40601 * V_T$	0,79	0,0000	1427		
Eucalipto gra	andis				
$E_{\rm M} = 7570, 14 + 1, 74111 * V_{\rm T}$	0,39	0,1516	1842		
$f_m = 100,926 - 0,00662429 * V_T$	-0,33	0,2363	8,6		
$C_{LL} = 5382,67 + 4,36745 * V_T$	0,76	0,0011	1681		
Clone de eucalipto					
$E_{\rm M} = -1794,75 + 1,87004 * V_{\rm T}$	0,45	0,0000	706		
$f_m = 14,8781 + 0,0100581 * V_T$	0,31	0,0002	5,8		
$C_{LL} = -3074, 17 + 4,80974 * V_T$	0,55	0,0000	1404		
Cedro australiano					
$E_{M} = -1331,94 + 1,1827*V_{T}$	0,52	0,0001	449		
$f_{\rm m} = -3,37944 + 0,00851201 * V_{\rm T}$	0,37	0,0107	4,8		
$C_{LL} = 1257,18 + 1,86924 * V_T$	0,47	0,0008	786		

A partir da Tabela 4.9 verifica-se que as regressões foram todas estatisticamente significativas para três das quatro amostragens utilizadas (P-valor < 0,5). O P-valor para as regressões efetuadas para o Eucalipto grandis demonstrou que as regressões entre a velocidade

na tora (V_T) e os dois parâmetros obtidos a partir do ensaio de flexão estática (E_M e f_m) não foram significativas. Apenas a regressão entre o C_{LL} e a velocidade na tora foi significativa para essa espécie.

Os valores dos coeficientes de correlação (R) foram, em geral, superiores para as correlações com o módulo de elasticidade (E_M) e com o coeficiente de rigidez (C_{LL}) a partir da velocidade longitudinal na tora (V_T). Como já explicado anteriormente, a resistência à flexão está mais associada à posição dos defeitos, afetando as correlações com os ensaios não destrutivos quando esses são realizados de forma isolada (sem avaliação visual).

Além disso, pode-se verificar que os coeficientes de correlação entre os ensaios não destrutivos e destrutivos foram sempre superiores para a conífera (Pinus elliottii). Esse comportamento também já foi observado por outros autores (BUCUR, 2006). A explicação para esse comportamento está ligada à estrutura anatômica das coníferas, que é mais homogênea do que a das dicotiledôneas, aproximando-se mais das condições teóricas da propagação de ondas.

Da mesma forma que o observado para as árvores (item 4.1), o comportamento da velocidade nas toras de madeira juvenil (clones de eucalipto e Cedro Australiano) é diferente do comportamento nas toras de madeira adulta, não sendo possível analisar esses grupos de forma conjunta. Por essa razão a regressão foi realizada somente para as toras e vigas de Pinus elliottii e de Eucalipto grandis. Os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10- Modelos e parâmetros da regressão entre velocidade longitudinal na tora (V _T) e	0
módulo de elasticidade (E _M), velocidade longitudinal na tora (V _T) e o módulo de ruptura (f _m)	e
velocidade longitudinal na tora (V _T) e o coeficiente de rigidez (C _{LL}), para o Pinus elliottii e	0
Eucalipto grandis.	

Pinus elliottii e Eucalipto grandis						
Regressão R P-valor Erro						
$E_{\rm M} = -2028, 13 + 3,7185^* V_{\rm T}$	0,97	0,0000	909			
$f_m = 17,5873 + 0,0110875 * V_T$	0,84	0,0000	9,0			
$C_{LL} = -5193,56 + 6,608 * V_T$	0,98	0,0000	1624			

Os modelos de regressão conjunta, considerando as espécies de Pinus elliottii e de Eucalipto grandis, foram todos estatisticamente significativos (P-valor < 0,05). Como no caso das árvores, os coeficientes de correlação (R) foram superior para as regressões envolvendo o módulo de elasticidade e o coeficiente de rigidez (0,97 e 0,98, respectivamente). Esse

resultado mais uma vez comprova a maior relação entre a velocidade de ultrassom e esses dois parâmetros ($E_M e C_{LL}$) do que com a resistência (f_m), a qual apresentou um valor de 0,84 para o coeficiente de correlação.

Verifica-se que todos os coeficientes de correlação foram superiores para as regressões à partir da velocidade na tora do que da velocidade na árvore. Esse comportamento está, provavelmente, ligado aos mecanismos de propagação das ondas que, no caso das árvores é mais complexo do que nas toras. Essa complexidade é consequência da forma inicial de propagação das ondas nas árvores, que é indireta. Além disso, no caso das árvores, a propagação da onda atinge uma zona mais restrita (próxima da casca) enquanto que para a tora a velocidade abrange todas as regiões, permitindo uma avaliação mais global.

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam os gráficos da regressão feita para o Pinus elliottii e para o Eucalipto grandis considerando a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T) com o módulo de elasticidade (E_M) e a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T) com o módulo de ruptura (f_m), respectivamente.



Figura 4.10- Regressão entre a velocidade de ultrassom longitudinal na tora (V_T) e o módulo de elasticidade (E_M) para o Pinus Elliottii e o Eucalipto grandis.



Figura 4.11- Regressão entre a velocidade de ultrassom longitudinal na tora (V_T) e o módulo de resistência (f_m) para o Pinus Elliottii e o Eucalipto grandis.

Ao comparar as regressões à partir da velocidade longitudinal de ultrassom na árvore $(V_{a.L.})$ e da velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T) com o módulo de elasticidade (E_M) verifica-se que o R² da regressão aumenta, passando de 70% quando essa é feita com a velocidade longitudinal na árvore para 94% quando a mesma é feita com a velocidade na tora (aumento de 26%). O mesmo aumento não é observado ao comparar o R² da regressão entre o módulo de ruptura (f_m) e a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore (V_{a.L.}) e na tora (V_T), pois este coeficiente passa de 66% quando a regressão é feita com a velocidade longitudinal na árvore para 70% quando a mesma é feita com a velocidade na tora (aumento de 6%).

Wang *et al.* (2001) obtiveram coeficiente de determinação (R²) variando de 44% a 89% para a correlação entre o módulo de elasticidade obtido a partir do ensaio não destrutivo de propagação de ondas na tora e o módulo de elasticidade obtido a partir do ensaio de flexão estática.

Da mesma forma como o realizado para a árvore, com os resultados de módulo de elasticidade (E_M) apresentado por cada uma das vigas provenientes de uma mesma tora, verificou-se a possibilidade de se classificá-las, em classes de rigidez, a partir do ensaio longitudinal de ultrassom na tora (V_T). A Figura 4.12 apresenta a relação entre a velocidade longitudinal na tora (V_T) e a classificação das vigas segundo as faixas da norma australiana (AS2878 - SAA,1986b).



Figura 4.12- Relação entre a velocidade longitudinal na tora (V_T) e a classificação das vigas segundo as faixas da norma australiana (AS 2878 - SAA,1986b).

O enquadramento das vigas, proveniente das toras, nas faixas de classificação da AS 2878 (SAA, 1986b) foi semelhante à classificação das vigas provenientes das árvores.

Para o clone de eucalipto, aproximadamente 78% das vigas foram classificadas nas faixas F2 e F3 enquanto a velocidade nas toras variou de 3429 m.s⁻¹ a 4343 m.s⁻¹. Para o Cedro australiano, cujas vigas foram 100% não classificadas, a velocidade nas toras variou de 3413 m.s⁻¹ a 4357 m.s⁻¹ demonstrando, como já ocorrido para a classificação à partir das árvores, não ser possível classificar, utilizando o ultrassom, a madeira de toras juvenis.

Para o Eucalipto grandis, que teve 77% das vigas nas faixas de classificação F14, F17 e F22, a velocidade nas toras foi de 3626 m.s⁻¹ a 5122 m.s⁻¹ enquanto que o Pinus elliottii apresentou a classificação das suas vigas distribuídas entre as faixas F2, F3, F4, F5, F7 e F8, e com velocidade na tora variando de 1659 m.s⁻¹ a 2525 m.s⁻¹. Neste caso, ao contrário do que ocorreu para a classificação a partir da velocidade longitudinal na árvore, a classificação a partir da velocidade na tora foi mais concentrada para o Pinus elliotti do que para o Eucalipto grandis e esse comportamento também foi verificado na variação da velocidade, apresentandose menor para o Pinus elliottii (diferença de 866 m.s⁻¹) do que para o Eucalipto grandis (diferença de 1497 m.s⁻¹).

Considerando os resultados obtidos para o Pinus elliotti e para o Eucalipto grandis, verifica-se que é possível estimar a faixa de classificação da madeira a partir da velocidade longitudinal na tora.

Além disso, foi possível verificar com os resultados do ensaio de ultrassom na árvore ou na tora recém abatida, proveniente de diferentes espécies ou de diferentes idades de uma mesma espécie, que é possível agrupar árvores/toras que possuam propriedades mecânicas semelhantes. Dessa forma é viável o uso do ultrassom para selecionar árvores/toras com melhores propriedades para finalidades que exijam maiores resistência e rigidez, enquanto que aquelas com propriedades inferiores poderiam ser utilizadas para aplicações nas quais não houvesse necessidade de resistências elevadas. Esse procedimento valoriza todo o material e, ao mesmo tempo, permite que maiores investimentos em transformação sejam realizados somente nas peças com maior valor agregado.

4.4 Velocidade de ultrassom na árvore, na tora e na viga saturada

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 ilustram a relação entre a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore ($V_{a.L.}$) e na tora (V_T), a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore ($V_{a.L.}$) e na viga saturada (V_{LLsat}) e a velocidade longitudinal na tora (V_T) e na viga saturada (V_{LLsat}), respectivamente.



Figura 4.13- (a) Relação entre a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore ($V_{a.L.}$) e a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T). (b) Regressão linear entre a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore ($V_{a.L.}$) e a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T), considerando o conjunto de espécies.



Figura 4.14- (a) Relação entre a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore ($V_{a.L.}$) e a velocidade longitudinal de ultrassom na viga saturada (V_{LLsat}). (b) Regressão linear entre a velocidade longitudinal de ultrassom na árvore ($V_{a.L.}$) e a velocidade longitudinal de ultrassom na viga saturada (V_{LLsat}), considerando o conjunto de espécies.



Figura 4.15- (a) Relação entre a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T) e a velocidade longitudinal de ultrassom na viga saturada (V_{LLsat}). (b) Regressão linear entre a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T) e a velocidade longitudinal de ultrassom na tora (V_T) e a velocidade longitudinal de ultrassom na viga saturada (V_{LLsat}), considerando o conjunto de espécies.

Nota-se, nas figuras 4.13, 4.14 e 4.15, que, da mesma forma como apresentado nas relações para a velocidade de ultrassom na árvore e na tora com as propriedades mecânicas do material, os dados do Eucalipto grandis, Cedro australiano e clones de eucalipto apresentaramse como uma "nuvem de pontos", enquanto que, para o Pinus elliottii essa distribuição foi mais espalhada.

A regressão entre a velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$) e na tora (V_T) apresentou maior correlação (R = 0.91). O valor de R^2 mostra que 82% da variabilidade da velocidade na tora é explicada pela velocidade na árvore.

A segunda melhor correlação foi obtida entre a velocidade longitudinal na tora (V_T) e na viga saturada (V_{LLsat}), com R = 0,83, indicando que a velocidade na viga é 69% explicada pela velocidade na tora. O pior valor obtido para as correlações foi para a regressão entre velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$) e na viga saturada (V_{LLsat}), com R = 0,76, demonstrando que apenas 57% da variabilidade da velocidade na viga é explicado pela velocidade obtida na árvore.

Tendo em vista que, em todos os casos, a velocidade foi obtida na condição saturada, a explicação para essas diferenças deve ser atribuída aos mecanismos de propagação das ondas de ultrassom na árvore, na tora e na viga. Embora no caso da tora e da viga a propagação da onda seja direta (transdutores em faces opostas), a tora apresenta maior volume e forma diferenciada, o que pode interferir nos mecanismos de propagação das ondas. No caso da diferença entre as velocidades na árvore e na tora, essa pode ser explicada pelo fato de que no caso das árvores, a propagação da onda atinge uma zona mais restrita (próxima da casca) enquanto que para a tora a velocidade abrange todas as regiões, permitindo uma avaliação mais global. Essa questão é bastante complexa, não sendo foco dessa pesquisa.

A regressão linear realizada por Wang *et al.* (2007) entre a velocidade na árvore e na tora, considerando as espécies separadamente, foi caracterizada por um coeficiente de determinação (R²) variando entre 71,0% e 93,3%. Correlações diferentes foram obtidas considerando duas das cinco espécies escolhidas e isso pode ter sido causado pelas diferenças de idade (muito jovens) e de diâmetros (muito inferiores) apresentados por essas árvores. Segundo os autores as ondas de tensão nessas árvores (mais jovens e de menor diâmetro) se propagam mais como longitudinal unidimensional ao invés de um traçado elíptico, como é observado para ondas que percorrem árvores mais velhas. O R² obtido para a regressão efetuada considerando todas as espécies, no caso de Wang *et al.* (2007) foi de 85,4%, muito próximo aos obtido nessa pesquisa (82%). Esse resultado indica um alto nível de confiança de que a velocidade obtida na árvore em pé pode ser utilizada para a previsão da velocidade na tora dela proveniente.

A Tabela 4.11 resume os modelos de correlação e os parâmetros de regressão dos resultados dos ensaios de velocidade longitudinal de ultrassom na árvore $(V_{a.L.})$ e na tora (V_T) , de velocidade longitudinal de ultrassom na árvore $(V_{a.L.})$ e na viga saturada (V_{LLsat}) e da

velocidade longitudinal na tora (V_T) e na viga saturada (V_{LLsat}) , para as espécies, separadamente.

Tabela 4.11- Modelos e parâmetros da regressão entre a velocidade longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e na tora (V_T) , entre a velocidade de ultrassom longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e na viga saturada (V_{LLsat}) e entre a velocidade longitudinal na tora (V_T) e na viga saturada (V_{LLsat}) , para as espécies analisadas.

Pinus elliottii					
Regressão	R	P-value	Erro		
$V_{\rm T} = 1564,49 + 0,293133 * V_{\rm a.L.}$	0,75	0,0047	281		
$V_{LLsat} = 2352,27 + 0,250043 * V_{a.L.}$	0,46	0,1341	533		
$V_{LLsat} = -286,481 + 1,45413 * V_T$	0,67	0,0003	470		
Eucalipto grandis					
$V_{\rm T} = 1191,35 + 0,70917 * V_{\rm a.L.}$	0,60	0,2813	218		
$V_{LLsat} = 1852,41 + 0,60254*V_{a.L.}$	0,58	0,3056	197		
$V_{LLsat} = 1611,65 + 0,698534 * V_T$	0,91	0,0000	142		
Clone de eucalipto					
$V_{\rm T} = 1546,53 + 0,538262 * V_{\rm a.L.}$	0,53	0,0000	164		
$V_{LLsat} = 1436,05 + 0,589768 * V_{a.L.}$	0,57	0,0000	161		
$V_{LLsat} = 1255,6 + 0,706644*V_T$	0,70	0,0000	141		
Cedro australiano					
$V_{\rm T} = 476,742 + 0,788454 * V_{\rm a.L.}$	0,79	0,0000	143		
$V_{LLsat} = 2718,43 + 0,389334*V_{a.L.}$	0,41	0,0036	198		
$V_{LLsat} = 2470,04 + 0,497116*V_T$	0,53	0,0001	182		

Ao analisar a tabela, verifica-se que todas as regressões efetuadas para o clone de eucalipto e para o Cedro australiano foram estatisticamente significativas (P-valor < 0.05).

Para o *Pinus elliotti* a regressão entre a velocidade longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e na viga saturada (V_{LLsat}) não foi estatisticamente significativa. Já para o *Eucalipto grandis*, somente a regressão entre a velocidade longitudinal na tora (V_T) e na viga saturada (V_{LLsat}) obtiveram um P-valor menor que 0,05, sendo portanto estatisticamente significativas.

Além dos aspectos relacionados à propagação das ondas nas árvores, toras e vigas, esse resultado pode ser explicado considerando que, para o caso de árvores mais maduras, a onda se propaga apenas na zona de madeira adulta, enquanto que, na tora e na viga o percurso será uma mescla entre madeira juvenil e adulta. Para as árvores muito jovens, como é o caso do clone de eucalipto e do Cedro australiano dessa pesquisa, por ainda não possuírem madeira adulta em sua composição, o percurso da onda tanto na árvore quanto na tora e na viga será sempre somente na madeira juvenil, o que justifica as regressões estatisticamente significativas entre todos os parâmetros não destrutivos ($V_{a.L.}$, V_T e V_{LLsat}) para essas duas espécies.

Os modelos de correlação e os parâmetros de regressão dos resultados dos ensaios de velocidade longitudinal de ultrassom na árvore $(V_{a.L.})$ e na tora (V_T) , de velocidade longitudinal de ultrassom na árvore $(V_{a.L.})$ e na viga saturada (V_{LLsat}) e de velocidade longitudinal na tora (V_T) e na viga saturada (V_{LLsat}) , agora considerando todas as espécies utilizadas nessa pesquisa são apresentados na Tabela 4.12

Tabela 4.12- Modelos e parâmetros da regressão entre a velocidade longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e na tora (V_T) , a velocidade de ultrassom longitudinal na árvore $(V_{a.L.})$ e na viga saturada (V_{LLsat}) e entre a velocidade longitudinal na tora (V_T) e na viga saturada (V_{LLsat}) , para todas as espécies analisadas.

Regressão	R	P-valor	Erro
$V_{LLsat} = 1902,65 + 0,509132 * V_{a.L.}$	0,76	0,0000	284
$V_{\rm T} = 927,646 + 0,681814 * V_{\rm a.L.}$	0,91	0,0000	208
$V_{LLsat} = 1228,15 + 0,746592*V_T$	0,86	0,0000	275

Para a regressão feita considerando todas as espécies, verifica-se que esta foi estatisticamente significativa (P-valor < 0,05) em todos os casos e o coeficiente de correlação (R), apresentou maior valor para a regressão entre a velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$) e na tora (V_T) (0,91), seguido da regressão entre a velocidade longitudinal na tora (V_T) e na viga saturada (V_{LLsat}), que foi de 0,86, e o pior valor obtido para a correlação foi para a regressão entre velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$) e na viga saturada (V_{LLsat}), 0,76. Wang *et al.* (2007) obtiveram, para a análise das espécies em conjunto R = 0,92 e, em seu trabalho, indicam que a correlação mais adequada é a do conjunto de espécies, uma vez que nesse caso o modelo envolve maior variabilidade.

Na Tabela 4.13 são apresentados valores das relações obtidas a partir da velocidade média longitudinal na árvore e na tora $(V_{a.L}/V_T)$, na árvore e na viga saturada $(V_{a.L}/V_{LLsat})$ e na tora e na viga saturada (V_T/V_{LLsat}) , para cada uma das espécies analisadas.

	$V_{a.L.}/V_T$	V _{a.L.} /V _{LLsat}	V _T /V _{LLsat}
Pinus ellioottii	0,94	0,71	0,75
Eucalipto grandis	1,05	1,01	0,97
Clones de eucalipto	1,12	1,09	0,97
Cedro australiano	1,11	0,98	0,91
Média	1,05	0,95	0,90

Tabela 4.13- Valores das relações obtidas a partir da velocidade longitudinal média na árvore e na tora $(V_{a.L.}/V_T)$, na árvore e na viga saturada $(V_{a.L.}/V_{LLsat})$ e na tora e na viga saturada (V_T/V_{LLsat}) , para as diferentes espécies.

De forma geral, a velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$) foi superior à velocidade na tora (V_T), como também obtido por Wang *et al.* (2007). A velocidade longitudinal na árvore ($V_{a.L.}$) foi, na maioria dos casos, muito próxima ou superior a velocidade na viga saturada (V_{LLsat}) e essa apresentou-se superior à velocidade na tora (V_T) em todos os casos apresentados.

Wang *et al.* (2007) obtiveram valor para a relação (k) entre a velocidade longitudinal na árvore e a velocidade longitudinal na tora de 1,20 considerando todas as espécies e, para as espécies separadas, os valores de k variaram de 1,07 a 1,36. No caso dessa pesquisa o k médio considerando todas as espécies foi de 1,05, inferior ao obtido pelo autor mencionado. Considerando as espécies separadas o valor de k variou entre valores maiores que um (1,05 a 1,12) e, no caso da conífera apresentou inversão, com valor médio de k de 0,94. Considerando os valores obtidos em cada árvore, $V_{a.L.}$ foi inferior à V_T para o Pinus nas idades 8, 9 e 13 anos (k médio = 0,65), foram praticamente iguais na idade de 15 anos (k médio = 0,97) e foram superiores nas idades de 22 (k =1,19) e 23 (k = 1,36). Wang *et al.* (2007) também obtiveram aumento de k com a idade da árvore, mas os valores foram sempre maiores do que 1,0.

Assim, a velocidade medida em árvores em pé pode ser afetada por diversos parâmetros e de diferentes formas, fazendo com que seu valor não seja numericamente o mesmo do obtido na tora recém abatida e na viga saturada. Da mesma forma, a velocidade média de ultrassom medida em toras recém abatidas não apresenta valores numéricos iguais aos obtidos para as vigas saturadas. Há mecanismos de propagação que devem ser estudados e melhor entendidos para que, futuramente, se possa, por exemplo, corrigir valores de velocidade obtidas nas árvores e, de posse dessas velocidades, correlacionar com os parâmetros em vigas provenientes dessas árvores.

5. CONCLUSÕES

Todos os modelos de correlação para a obtenção das propriedades da madeira (E_M , f_m e C_{LL}), tanto à partir da velocidade longitudinal de ultrassom na árvore como à partir da velocidade longitudinal de ultrassom na tora, considerando as espécies de Pinus Elliotti e de Eucalipto grandis, foram estatisticamente significativas. Os coeficientes de correlação foram, em todos os casos, superiores para a obtenção das propriedades à partir da inferência acústica na tora do que à partir do ensaio não destrutivo na árvore. O ensaio de ultrassom apresentou maior capacidade preditiva para a rigidez do que para a resistência.

A velocidade longitudinal de ultrassom nas árvores de Cedro australiano e de clones de eucalipto, constituídas essencialmente por madeira juvenil, não refletiu as propriedades de resistência e de rigidez da madeira. Os valores de velocidade longitudinal na árvore e de velocidade longitudinal na tora foram altos, mas as propriedades mecânicas (E_M , f_m , C_{LL}) foram baixas.

Utilizando, como estudo de caso, a classificação das vigas segundo as classes da norma australiana AS 2879 (SAA 1986b), conclui-se que, através do ensaio de ultrassom na árvore ou na tora é possível estimar a faixa de classificação da madeira, desde que as árvores não sejam constituídas essencialmente por madeira juvenil.

A velocidade de propagação da onda medida em árvores em pé não é numericamente igual à medida na tora recém abatida e na viga saturada. Da mesma forma, a velocidade de propagação da onda de ultrassom medida em toras recém abatidas não apresenta valores numéricos iguais aos obtidos para as vigas saturadas. O modelo de regressão da velocidade árvore-tora foi o que apresentou maior coeficiente de correlação, seguido do modelo de regressão da velocidade tora-viga saturada e, por último, do modelo de regressão da velocidade árvore-viga saturada.

De forma geral, conclui-se, com os resultados dessa pesquisa, que com o ensaio de ultrassom na árvore ou na tora recém abatida é possível detectar variações de propriedades mecânicas (E_M , f_m e C_{LL}). No entanto, a amostragem, composta de apenas duas espécies (Pinus elliottii e Eucalipto grandis) não permitiu verificar se o modelo obtido poderia ser utilizado para outras espécies, permitindo, assim, predizer, à partir da medição da velocidade de propagação de ondas de ultrassom na árvore/tora, as propriedades da madeira.

6. SUGESTÃO PARA CONTINUIDADE DOS ESTUDOS

Os resultados dessa pesquisa demonstraram que a velocidade de propagação da onda medida em árvores em pé pode ser afetada por diversos parâmetros e de diferentes formas, fazendo com que seu valor não seja numericamente o mesmo do obtido na tora recém abatida e na viga saturada. Da mesma forma, a velocidade média de ultrassom medida em toras recém abatidas não apresenta valores numéricos iguais aos obtidos para as vigas saturadas.

Tendo em vista que as diferenças de velocidade entre árvore, tora e viga podem dificultar a antecipação do conhecimento das propriedades da madeira a partir das propriedades acústicas da árvore, entender os mecanismos de propagação de ondas que levam a essas diferenças e quantificar essas diferenças torna-se um problema relevante a ser estudado por uma pesquisa científica. Sendo assim, acredita-se que estudando as bases teóricas dos mecanismos de propagação de ondas nos troncos de árvores vivas, em toras recém abatidas e em vigas delas proveniente, será possível estabelecer modelos que permitam ajustar a velocidade obtida nas árvores para que a mesma possa ser utilizada na avaliação da rigidez da madeira.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198-08** Static tests of Timbers in Structural Sizes. Philadelphia, Pa, USA,2008.

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. October 18, 2000, Wood Technology Research Center, University of Canterbury. p. 57-61.

ARRIAGA, F.; ÍÑIGUEZ, G.; ESTEBAN, M.; FERNÁNDEZ-GOLFIN, J. I.. Structural Tali timber (*Erythrophleum ivorense A. Chev., Erythrophleum suaveolens Brenan.*): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods. Holz Als Roh- Und Werkstoff, p. 357-362. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – NBR 7190/97 - Projeto de estruturas de madeira 107p. Rio de Janeiro (RJ), 1997.

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

AUTRY, David; ACHIM, Alexis. The relationship between standing tree acoustic and timber quality in Scots pine and practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. **Forestry**, p. 475-487. 28 abr. 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, 2006, Itatiba - SP. Anais do 1º madeira Seminário sobre a aplicação de ensaios não-destrutivos em madeira e materiais à base de. 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.

BUCUR, Voichita. Acoustics of wood. Springer-Verlag, Berlin, Germany. P. 223-225, 2006.

CARTER, P.; BRIGGS, D.; ROSS, R. J.; WANG, X.. Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer wood quality needs. **PNW-GTR-642**, **Productivity of Western Forests: A Forest Products Focus**. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon, p. 121-129, 2005.

DYCK, Bill. Precision forestry – the path to increased profitability! In: Proceedings, The 2nd International Precision Forestry Symposium. Seattle, Washington, USA. University of Washington, Seattle, Washington, p. 3-8, 2002.

HUANG, C.; LINDSTRÖM, H.; NAKADA, R.; RALSTON, J.. Cell wall structure and wood properties determined. Holz Als Roh- Und Werkstoff, p. 321-335, 2003.

LINDSTRÖM, H.; HARRIS, P.; NAKADA, R.. Methods for measuring stiffness of young trees. Holz Als Roh- Und Werkstoff, p. 165-174, 2002.

MASSAK, Marcus Vinicius. **Influência da idade da árvore na velocidade de propagação de ondas de ultrassom em peças estruturais de madeira.** 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

PUCCINI, C.T.; GONÇALVES, R.; MONTEIRO, M.E.A. Avaliação estatística da variação da velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira em presença de defeitos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.6, n.3, p.499-503, 2002.

ROSS, Robert J.; MCDONALD, K. A.; GREEN, D. W.; SCHAD, K. C. . Relationship Between Log and Lumber Modulus of Elasticity. **Forest Products Journal**, p. 89-92, fev. 1997.

STANDARDS OF ASSOCIATION AUSTRALIA (1986b). Specification for mechanically stress graded timber, **AS2878**. North Sydney, 1986.

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

TSEHAYE, A.; BUCHANAN, A. H.; WALKER, J. C. F. Sorting of logs using acoustics. **Wood Science And Technology,** Springer Berlin, p. 337-344. 23 nov. 2000b.

WANG, X.; CARTER, P.; ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.. Acoustics assessment of wood quality of raw forest materials. **Forest Products Journal**, v. 57, p. 6-14. Maio 2007a.

WANG, Xiping; ROSS, Robert J.; CARTER, Peter. Acoustic Evaluation of Wood Quality in Standing Trees. Part 1. Acoustic Wave Behavior. **Wood Science And Technology**, p. 28-38. Jan. 2007b.

WANG, X.; ROSS, R. J.; MCCLELLAN, M.; BARBOUR, R. J.; ERICKSON, J. W.; FORSMAN, J. W.; MCGINNIS, G. D.. Nondestructive Evaluation of Standing Trees with a Stress Wave Method. **Wood And Fiber Science**, p. 522-533. 2001.

YIN, Y.; NAGAO, H.; LIU, X.; NAKAI, T. . Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation. **J Wood Sci**, p. 33-40. 2010.

ZHU, J.; TADOOKA, N.; TAKATA, K.; KOIZUMI, A.. Growth and wood quality of sugi (*Cryptomeria japonica*) planted in Akita prefecture (II). Juvenile/mature wood determination of aged trees, **Japan Wood Research Society** (2005) 51:95 – 101

ANEXOS

Nas tabelas apresentadas nesse item encontram-se os resultados completos dos ensaios realizados durante o desenvolvimento da pesquisa.

Tabela A 1 - Velocidade longitudinal na árvore ($V_{a,L}$), velocidade longitudinal na tora (V_T), velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}), velocidade longitudinal na viga seca (V_{LLseca}), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de ruptura (f_m), módulo de elasticidade (E_M), densidade (ρ), coeficientes de variação (C. V.) de cada um dos parâmetros e número de vigas retiradas de cada árvore de Pinus elliottii.

Árvore	V _{a.L.} (m.s ⁻¹)	V _⊤ (m.s ⁻¹)	C. V. (%)	V _{LLsat} (m.s ⁻¹)	C. V. (%)	V _{LLseca} (m.s ⁻¹)	C. V. (%)	C _{LL} (MPa)	C. V. (%)	f _m (MPa)	C. V. (%)	Е _м (MPa)	C. V. (%)	ρ (kg/m³)	C. V. (%)	Nº de vigas
1	1055	1817	11	2251	12	3968	10	6914	14	36	5	3890	18	433	5	3
2	1125	1797	11	2458	13	4014	11	6448	20	33	26	4112	19	387	12	3
3	990	1749	-	2451	27	3963	15	7375	32	35	47	5143	49	463	2	2
4	1324	1434	-	1855	10	3553	7	5379	23	27	9	2643	1	422	10	2
5	1252	2198	6	3309	14	4442	10	8890	16	41	18	5963	10	451	6	4
6	1140	2135	5	2879	11	4694	12	9885	22	47	11	6164	23	446	5	4
7	2550	2379	3	3293	8	5046	11	10868	22	41	11	6793	12	424	4	7
8	1980	2337	3	3282	16	4929	11	10329	26	45	33	6992	27	417	8	8
9	2180	2409	2	3395	15	4844	12	11253	35	49	34	7870	31	464	12	10
10	3756	2537	0	3381	16	5078	12	11921	28	48	26	7559	23	457	8	10
11	3522	2934	4	3487	17	5032	11	12138	32	56	33	7559	31	461	13	28
12	3385	2159	3	2252	26	3911	12	6696	36	30	47	4353	32	422	13	9
Média	2022	2157	5	2858	15	4456	11	9008	26	41	25	5753	23	437	8	-

62

Tabela A 2 - Velocidade longitudinal na tora (V_T), velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}), velocidade longitudinal na viga seca (V_{LLseca}), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de ruptura (f_m), módulo de elasticidade (E_M), densidade (ρ), coeficientes de variação (C. V.) de cada um dos parâmetros e número de vigas retiradas de cada tora de Pinus elliottii.

	V _⊺ (m.s ⁻¹)	C. V. (%)	V _{LLsat} (m.s⁻¹)	C. V. (%)	V _{LLseca} (m.s ⁻¹)	C. V. (%)	C _{LL} (MPa)	C. V. (%)	f _m (MPa)	C. V. (%)	E _M (MPa)	C. V. (%)	ρ (kg/m³)	C. V. (%)	Nº de vigas
1b*	1675	2	2096	4	3749	1	6342	2	37	3	3476	1	451	0	2
2b	1659	3	2299	9	3863	12	6440	29	38	2	3765	19	426	4	2
3b	1749	3	2451	27	3963	15	7375	32	35	47	5143	49	463	2	2
4b	1434	13	1855	10	3553	7	5379	23	27	9	2643	1	422	10	2
5b	2102	2	2961	1	4107	1	7995	1	45	6	6203	1	474	2	2
6b	2066	4	2620	2	4234	6	8144	6	47	1	5397	5	455	7	2
7b	2376	3	2993	1	4603	9	9082	12	37	9	5954	6	429	6	2
8b	2295	5	3246	19	4885	12	10158	30	54	26	7206	31	416	8	4
9b	2450	5	3183	17	4431	10	9437	33	51	47	6775	35	470	13	3
10b	2525	7	3500	19	4846	13	11597	34	55	26	8131	27	480	8	4
11b	3053	3	3491	17	4937	12	11983	34	62	32	7610	28	435	6	11
12b	2093	8	2334	16	3709	6	5856	23	34	39	3907	29	421	11	3
Média	2123	5	2752	12	4240	9	8316	21	43	21	5517	19	445	6	-
7m**	2454	5	3549	9	5249	16	11881	34	42	3	6755	12	424	3	2
8m	2408	3	3389	18	4970	13	10562	32	36	25	7132	27	417	11	3
9m	2371	7	3601	17	5008	14	12379	43	52	33	8983	34	472	16	4
11m	2891	13	3560	19	5094	12	12562	36	54	32	7812	33	466	14	10
12m	2197	4	1619	16	3892	19	6725	58	34	63	4546	49	414	19	3
Média	2464	6	3144	16	4843	15	10822	41	44	31	7045	31	439	12	-
1t***	1959	17	2561	-	4404	-	8056	-	34	-	4719	-	415	-	1
2t	1936	2	2776	-	4315	-	6464	-	23	-	4808	-	347	-	1
5t	2294	2	3656	10	4778	18	9785	17	37	25	5724	15	427	1	2
6t	2205	5	3138	2	5153	36	11626	11	47	19	6931	27	437	5	2
7t	2307	4	3323	1	5206	12	11384	18	43	13	7378	9	418	4	3
8t	2309	3	3389	18	4970	39	10562	32	36	25	7132	27	416	-	1
9t	2407	7	3601	17	5008	62	12379	43	52	33	8983	34	449	5	3
10t	2513	5	3302	15	5232	28	12137	27	43	23	7178	20	473	15	6
11t	2857	12	3560	19	5094	51	12562	36	54	32	7812	33	444	7	7
12t	2187	7	1619	16	3892	57	6725	58	34	63	4546	49	431	13	3

Tabela A 3 - Velocidade longitudinal na árvore $(V_{a,L})$, velocidade longitudinal na tora (V_T) , velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}) , velocidade longitudinal na viga seca (V_{LLseca}) , coeficiente de rigidez (C_{LL}) , módulo de ruptura (f_m) , módulo de elasticidade (E_M) , densidade (ρ) , coeficientes de variação (C. V.) de cada um dos parâmetros e número de vigas retiradas de cada árvore de Eucalipto grandis.

Árvore	V _{a.L.} (m.s⁻¹)	V⊤ (m.s ⁻¹)	C. V. (%)	V _{LLsat} (m.s⁻¹)	C. V. (%)	V _{LLseca} (m.s ⁻¹)	C. V. (%)	C _{LL} (MPa)	C. V. (%)	f _m (MPa)	C. V. (%)	E _M (MPa)	C. V. (%)	ρ (kg.m⁻³)	C. V. (%)	Nº de vigas
1	5017	4636	248	4862	6	5965	5	25191	13	77	28	15547	21	712	15	119
2	5037	4845	271	4980	6	6274	3	24699	16	57	40	14315	23	628	16	22
3	4788	4853	248	4844	8	5965	7	27158	15	71	43	18207	66	765	17	27
4	4770	4346	231	4435	6	5605	5	22287	12	69	25	13435	17	718	14	45
5	4549	4411	212	4699	8	5769	6	26154	16	78	36	16009	31	787	16	42
Média	4832	4618	242	4764	7	5916	5	25098	15	70	34	15503	32	722	16	-

Tora	V _⊤ (m.s ⁻¹)	C. V. (%)	V _{LLsat} (m.s ⁻¹)	C. V. (%)	V _{LLseca} (m.s ⁻¹)	C. V. (%)	C _{LL} (MPa)	C. V. (%)	f _m (MPa)	C. V. (%)	Е _м (MPa)	C. V. (%)	ρ (kg.m⁻³)	C. V. (%)	Nº de vigas
1b*	4089	14	4568	2	5741	5	23196	13	78	28	14421	24	720	17	53
2b	4489	3	4716	5	6082	2	23337	16	57	34	12844	27	634	19	10
3b	4455	2	4477	3	5697	7	25148	14	76	44	20244	85	784	19	13
4b	4121	5	4218	4	5471	5	21045	11	69	24	12776	20	710	17	24
5b	3626	21	4350	5	5439	4	23396	16	78	39	14665	45	798	20	20
Média	4156	9	4466	4	5686	4	23224	14	72	34	14990	40	729	18	-
1m**	4942	3	5061	2	6172	3	26507	11	71	35	16075	14	699	14	37
2m	5122	2	5147	2	6520	2	25484	16	60	44	15534	19	600	17	6
3m	5051	2	5116	2	6148	4	27978	13	61	45	15543	17	745	17	8
4m	4543	2	4700	2	5821	4	23860	12	71	27	14089	13	706	12	14
5m	4722	3	4998	4	6113	2	28705	10	80	30	17309	15	770	13	13
Média	4876	2	5005	2	6155	3	26507	12	68	36	15710	16	704	14	-
1t***	4878	8	5147	2	6118	2	27094	9	83	20	16856	20	728	11	29
2t	4922	4	5252	4	6346	1	26186	14	54	51	15546	19	650	13	6
3t	5054	5	5121	4	6130	2	29353	15	73	36	16858	15	767	14	6
4t	4374	2	4651	3	5631	3	23403	8	69	28	14291	12	739	9	7
5t	4886	3	5043	3	6008	2	28599	10	75	41	17115	16	792	10	9
Média	4823	4	5043	3	6047	2	26927	11	71	35	16133	16	735	11	-

Tabela A 4 - Velocidade longitudinal na tora (V_T), velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}), velocidade longitudinal na viga seca (V_{LLseca}), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de ruptura (f_m), módulo de elasticidade (E_M), densidade (ρ), coeficientes de variação (C. V.) de cada um dos parâmetros e número de vigas retiradas de cada tora de Eucalipto grandis.

*b = tora retirada da base da árvore

**m = tora retirada do meio da árvore

***t = tora retirada do topo da árvore

Tabela A 5 - Dados de velocidade longitudinal na árvore (Va.L.), velocidade radial na árvore (Va.r.), velocidade longitudinal na tora (VT), velocidade longitudinal na viga saturada (VLLsat), velocidade longitudinal na viga seca (VLLseca), coeficiente de rigidez (CLL), módulo de ruptura (fm), módulo de elasticidade (EM) e a densidade (ρ) para cada árvore/tora de Cedro australiano.

Árvore/ Tora	V _{a.L.} (m.s⁻¹)	V _⊺ (m.s ⁻¹)	V _{LLsat} (m.s⁻¹)	V _{LLseca} (m.s ⁻¹)	C _{⊥L} (MPa)	f _m (MPa)	Е _м (MPa)	ρ (kg.m⁻³)
1	3493	3710	4315	4877	8462	33	2790	356
2	3871	3579	4385	5099	8693	26	2787	334
3	4144	3630	4401	4986	8872	40	3414	357
4	4109	3815	4494	5407	9557	27	3240	327
5	4236	3729	4420	5204	8106	30	2556	299
6	4520	3982	4695	5319	9019	39	3790	319
7	4053	3726	4600	5022	7573	30	2954	300
8	4400	3990	4618	5358	9514	29	3552	331
9	4520	4174	4467	5330	9411	30	3174	331
10	3964	3686	4282	5348	8125	24	2990	284
11	4334	3851	4591	5146	8314	29	3969	314
12	4435	3831	4200	5330	9502	20	3031	334
13	4454	4098	4415	5867	12710	39	4231	369
14	4420	3981	4607	5333	8572	33	3684	301
15	4008	3683	4474	5055	9128	31	3200	357
16	4586	4015	4381	4989	8600	28	3495	346
17	4159	3797	4438	5105	8353	31	4006	321
18	4566	4075	4515	5278	7436	32	3886	267
19	4125	3413	4477	4797	6742	20	2689	293
20	4714	3875	4547	5157	8043	28	2683	302
21	4692	4321	4753	5354	9560	36	3465	334
22	4601	4131	4393	5249	9509	29	3985	345
23	4206	3804	4125	4691	6640	27	2599	302
24	4772	4174	4735	5195	9487	23	3952	351
25	4789	4205	4429	5271	8513	26	2931	306
26	4291	3767	4002	6866	10365	23	3497	220
27	3888	3490	4059	4489	6055	23	2549	300
28	4140	3650	4012	4809	8477	31	2757	366
29	4522	4000	4437	5038	8645	31	3297	341
30	4425	3848	4366	5004	8367	30	2741	334
31	4416	4110	4545	5159	13584	49	7476	510
32	4454	4258	4591	5176	8950	31	3338	334
33	4450	3891	4186	5369	9055	31	3128	314
34	4136	3671	4233	4978	8917	27	2967	360
35	4357	3893	4123	4924	8040	35	4149	332
36	4326	3949	4277	4999	7579	30	2854	303

Árvore/ Tora	V _{a.L.} (m/s)	ν _τ (m.s⁻¹)	V _{LLsat} (m.s ⁻¹)	V _{LLseca} (m.s ⁻¹)	C _{LL} (MPa)	fm (MPa)	Е _м (MPa)	ρ (kg/m³)
37	4416	3998	4847	5206	9028	36	4300	333
38	4404	3820	4410	5080	8590	32	3149	333
39	4403	3778	4475	4961	8094	29	2750	329
40	4560	4061	4247	5180	8725	30	3272	325
41	4290	3605	4067	4847	6097	24	3639	260
42	4233	4043	4862	5199	9345	38	3373	346
43	4469	4090	4403	5046	8859	38	3461	348
44	4720	4252	4826	5076	8840	37	3711	343
45	4529	4139	4554	5323	7601	20	3395	268
46	4432	4124	4515	5216	8621	26	2537	317
47	4168	3630	4220	5148	7939	27	2878	300
48	4439	4357	4548	5410	10386	44	4376	355
49	4046	3665	4126	5001	7338	25	2450	293
50	4264	4158	4330	5191	9110	36	3497	338
Média	4322	3883	4405	5183	8791	30	3384	328
C. V. (%)	6	6	5	6	15	20	23	12

Continuação da Tabela A 5

Tabela A 6 - Dados de velocidade longitudinal na árvore (V_{a.L.}), velocidade longitudinal na tora (V_T), velocidade longitudinal na viga saturada (V_{LLsat}), velocidade longitudinal na viga seca (V_{LLseca}), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de ruptura (f_m), módulo de elasticidade (E_M) e a de<u>nsidade (ρ) para cada árvore/tora de clone de eucalipto.</u>

Árvore/ Tora	V _{a.L.} (m.s⁻¹)	V _⊤ (m.s⁻¹)	V _{LLsat} (m.s⁻¹)	V _{LLseca} (m.s⁻¹)	C _{⊥L} (MPa)	f _m (MPa)	E _M (MPa)	ρ (kg.m⁻³)
193	4218	3768	3661	5191	14733	54	5193	547
194	4114	3484	3843	5174	14120	52	4400	528
195	4571	3871	3996	5161	15539	52	5580	583
196	4385	4033	4097	5310	14548	52	5602	516
197	4687	4311	4336	5550	18591	49	5589	604
198	4284	3796	3970	5136	14587	40	4944	553
199	4329	3914	3905	5268	15308	45	5073	552
200	4392	3827	3978	5163	14288	50	4627	536
202	4337	3624	3733	5153	15626	56	5002	588
203	4373	4155	4409	5669	16866	61	6470	525
204	4258	4041	3744	5118	14633	45	4546	559
205	4290	3951	4107	5421	16471	59	6046	560
206	4198	3984	3987	5469	15193	51	4742	508
207	4198	3836	3885	5283	14702	45	5954	527
209	4239	3673	3833	5235	14434	49	4764	527
210	4215	3769	3806	5012	14882	58	5375	592
211	4296	3762	3958	5401	15025	64	4732	515
212	4536	4049	3977	5616	20285	62	7357	643
213	4324	3907	4071	5324	16643	45	6648	587
214	4407	4203	4270	5655	18998	61	6280	594
215	4031	3793	3846	5075	14368	56	5009	558
216	4033	3793	3754	5136	14359	44	4171	544
217	4179	3718	3862	5004	14951	54	5459	597
218	4330	3964	3898	5433	17244	57	6245	584
219	4411	3812	4061	5412	18295	64	6472	625
220	4261	3757	3955	5217	13606	45	4297	501
221	4088	3893	3818	5023	14330	45	4456	568
224	4289	3907	4347	5297	15806	57	5515	563
225	4349	4106	4043	5490	17463	62	7235	579
226	4589	4102	4195	5631	18858	70	6651	595
227	4327	3753	3804	5293	13111	49	4609	468
228	4770	4149	4394	5864	21953	62	6899	638
232	427'0	3660	3867	5124	14621	54	4705	557
233	4512	3832	4110	5408	16697	53	5609	572
235	4404	4121	4230	5375	16705	58	5733	578

Árvore/ V _{a.L.} VT V_{LLsat} V_{LLseca} CLL fm Ем $(m.s^{-1})$ (m.s⁻¹) (m.s⁻¹) Tora (MPa) (MPa) (MPa) (m/s) (kg/m³)

ρ

Continuação da Tabela A 6

Árvore/ V _{a.L.} VT V_{LLsat} V_{LLseca} CLL fm Ем ρ $(m.s^{-1})$ (m.s⁻¹) (m.s⁻¹) Tora (MPa) (MPa) (MPa) (m/s) (kg/m³) 49-1 49-2 49-3 49-4 49-5 122-1 122-2 122-3 122-4

Continuação da Tabela A 6

Árvore/ Tora	V _{a.L.} (m/s)	ν _τ (m.s⁻¹)	V _{LLsat} (m.s ⁻¹)	V _{LLseca} (m.s ⁻¹)	CLL (MPa)	fm (MPa)	E _M (MPa)	ρ (kg/m³)
123-5	4425	3716	3891	5199	14526	50	4975	537
339-1	4517	3909	4155	5565	15617	53	5967	504
339-2	4233	3699	3697	5476	14373	48	5134	479
339-3	4540	3864	4068	5850	17505	62	6722	512
339-4	4424	3927	3797	5608	17032	47	5932	542
510-1	4193	3429	3609	5219	15423	58	5069	566
510-2	4433	3713	3985	5309	14694	45	4646	521
510-3	4346	3482	3693	5152	15469	51	5080	583
510-4	4251	3602	3754	5250	15505	53	5795	563
510-5	4186	3498	3613	4995	14886	50	4925	597
849-1	4273	3853	4133	5299	13454	49	5690	479
849-2	4238	3841	4282	5353	12714	49	4372	444
849-3	4455	4009	4248	5376	13476	43	4519	466
849-4	4299	4010	4154	5707	15273	50	5139	469
849-5	4433	4089	4461	5281	13709	54	5644	492
Média	4348	3892	4006	5348	15818	54	5484	551
C. V. (%)	5	5	5	5	13	11	14	7

Continuação da Tabela A 6