



**CINTHYA BERTOLDO PEDROSO**

**PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E DE RIGIDEZ DA  
MADEIRA OBTIDAS A PARTIR DA AVALIAÇÃO ACÚSTICA  
NA ÁRVORE**

CAMPINAS

2014





UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CINTHYA BERTOLDO PEDROSO**

**PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E DE RIGIDEZ DA  
MADEIRA OBTIDAS A PARTIR DA AVALIAÇÃO ACÚSTICA  
NA ÁRVORE**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Construções Rurais e Ambiente.

**Orientadora: Profa. Dra. RAQUEL GONÇALVES**

CAMPINAS

2014

iii

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

P343p Pedroso, Cinthya Bertoldo, 1982-  
Propriedades de resistência e de rigidez da madeira obtidas a partir da  
avaliação acústica na árvore / Cinthya Bertoldo Pedroso. – Campinas, SP : [s.n.],  
2014.

Orientador: Raquel Gonçalves.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Agrícola.

1. Propagação de ondas. 2. Poisson. 3. Ultrassom. 4. Vibração. 5. Ondas -  
Tensão. I. Gonçalves, Raquel, 1961-. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Predicting of strength and stiffness of wood using acoustic  
measurement in trees

**Palavras-chave em inglês:**

Wave propagation

Poisson

Ultrasound

Vibration

Waves - Stress

**Área de concentração:** Construções Rurais e Ambiente

**Titulação:** Doutora em Engenharia Agrícola

**Banca examinadora:**

Raquel Gonçalves [Orientador]

Esther Merlo Sánchez

Claudio Henrique Soares Del Menezzi

Cristiane Camargo Zani de Lemos

Júlio Soriano

**Data de defesa:** 25-07-2014

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Cinthy Bertoldo Pedroso**, aprovada pela Comissão Julgadora em 25 de julho de 2014, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



---

**Prof. Dr<sup>a</sup>. Raquel Gonçalves – Presidente e Orientadora**  
**Feagri/Unicamp**



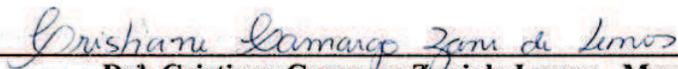
---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Esther Merlo Sánchez – Membro Titular**  
**Madera Plus/Espanha**



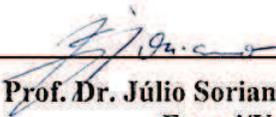
---

**Prof. Dr. Claudio Henrique Soares Del Menezzi - Membro Titular**  
**UnB/Brasília**



---

**Dr<sup>a</sup>. Cristiane Camargo Zani de Lemos - Membro Titular**  
**International Paper**



---

**Prof. Dr. Júlio Soriano - Membro Titular**  
**Feagri/Unicamp**



## RESUMO

A utilização de métodos de propagação de ondas para acessar a qualidade da madeira ainda na árvore tem sido um dos focos atuais de pesquisa nessa área. No entanto, um dos problemas para a aplicação dessa tecnologia diretamente em árvores é a influência de diferentes mecanismos de propagação de ondas, que ocorre em função das características do meio e interfere nos resultados. Como consequência a velocidade de propagação de ondas obtida em ensaios nas árvores é diferente da obtida em ensaios na tora recém abatida ou nas vigas proveniente do processamento da tora. Adicionalmente, a velocidade obtida na tora ou na viga é melhor correlacionada com as propriedades mecânicas do que a velocidade obtida na árvore. Assim, o objetivo dessa pesquisa foi buscar parâmetros que permitissem melhorar a predição da velocidade na tora e na viga à partir da velocidade obtida com o ensaio na árvore e, como consequência, melhorar a predição de propriedades de resistência e de rigidez da madeira a partir da avaliação acústica na árvore. Para alcançar os objetivos foram realizados ensaios de propagação de ondas em árvores, em toras delas provenientes e em vigas retiradas das toras. As vigas foram submetidas à ensaios de flexão estática, na umidade de equilíbrio, para posterior correlação da resistência ( $f_m$ ) e da rigidez ( $E_M$ ) com as propriedades acústicas das árvores. A densidade na condição saturada ( $\rho$ ), o diâmetro na altura do peito (DAP), o coeficiente acustoelástico e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) foram os parâmetros adotados para serem estudados. As diferenças entre velocidades árvore/tora e árvore/viga foram minimizadas com a inserção do coeficiente de Poisson e do diâmetro na altura do peito. Os coeficientes de determinação dos modelos de predição das propriedades mecânicas à partir das velocidades nas árvores, corrigidos pela densidade saturada, pelo diâmetro na altura do peito e pelo coeficiente de Poisson, foram semelhantes ou superiores aos obtidos pelos modelos de previsão dessas propriedades ( $f_m$  e  $E_M$ ) a partir das velocidades obtidas diretamente em toras ou em vigas. Esse resultado permite comprovar a viabilidade de antecipação das propriedades da madeira em ensaios acústicos em árvores.

Palavras-chave: propagação de ondas, velocidade na tora, velocidade na viga, diâmetro na altura do peito, densidade saturada, coeficiente de Poisson.



## ABSTRACT

The use of wave propagation methods to access the wood quality in standing tree has been one of the current focuses of research in this area. However, one of the problems for the application of this technology directly in standing trees is the influence of different mechanisms of wave propagation, which occurs according to the characteristics linked to the type of measurement, geometry of the piece and other parameters that affect the results. Consequently the wave propagation velocity obtained from measurements in trees differs from that obtained from measurements in freshly felled logs or on beams in green condition removed from the log. Additionally, the velocity obtained in log or in beam is better correlated with mechanical properties than the velocity obtained in standing tree. Thus, the aim of the this research was examine parameters that allows better prediction of log velocity and beam velocity from velocity obtained from measurements in standing trees. As a consequence, allow better prediction of properties of strength and stiffness of wood from the tree acoustic measurement. To achieve the objectives, wave propagation measurements were performed in standing trees, in freshly felled logs obtained from these trees and in beams removed from the logs. The beams were submitted to the bending tests, in equilibrium moisture content, for later correlation of the strength ( $f_m$ ) and stiffness ( $E_M$ ) with acoustic properties obtained on trees. The bulk green density ( $\rho$ ), the diameter at breast height (DBH), the acoustoelasticity coefficient and the Poisson's ratio ( $\nu$ ) were the parameters adopted for the analysis. The differences between tree/log velocities and tree/beam velocities were minimized by inserting the Poisson ratio and the diameter at breast height. The coefficient of determination of the models to predict the mechanical properties from tree velocities, corrected for green density, diameter at breast height and Poisson's ratio, were similar or superior to those obtained by prediction models of these properties ( $f_m$  and  $E_M$ ) from the velocities obtained directly from logs or from beams. This result allows prove the viability of the anticipation of wood properties from measurements in standing tree.

Keywords: wave propagation, log velocity, beam velocity, diameter at breast height, bulk green density, Poisson's ratio.



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivo .....	2
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1	Introdução .....	3
2.2	Fundamentos Teóricos da Propagação de Ondas .....	3
2.3	Propagação de ondas em árvore e em toras .....	5
2.4	Acustoelasticidade da madeira .....	13
2.5	Coefficiente de Poisson .....	15
2.6	Conclusão da Revisão .....	18
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	20
3.1	Amostragem .....	20
3.2	Ensaio nas Árvores .....	21
3.3	Retirada das Toras .....	24
3.4	Ensaio Não Destrutivo Longitudinal nas Toras .....	25
3.5	Ensaio não Destrutivo Superficial nas Toras .....	26
3.6	Ensaio de Dispersão das Ondas nas Toras .....	28
3.7	Retirada das Vigas .....	30
3.8	Ensaio de Propagação de Ondas e de Flexão Estática nas Vigas .....	30
3.9	Acustoelasticidade da Madeira Determinada em Ensaio de Flexão Estática .....	35
3.10	Determinação das Constantes Elásticas por Ultrassom .....	40
3.11	Caracterização da Madeira de <i>Pinus pinaster</i> por Ensaio Destrutivo .....	41
3.12	Análise dos Dados .....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	46
4.1	Velocidade na árvore, na Tora e na Viga Saturada Considerando os Diferentes Equipamentos de Propagação de Ondas .....	46
4.2	Avaliação Não Destrutiva na Árvore como Parâmetro de Previsão de Propriedades da Madeira dela Provenientes .....	51

4.3 Avaliação das Metodologias de Propagação de Ondas .....	56
4.4 Possíveis Fatores de Interferência das Diferenças de Velocidade na Árvore, na Tora e na Viga.....	63
4.4.1 Acustoelasticidade da madeira .....	64
4.4.2 Coeficiente de Poisson .....	74
4.4.3 Dispersão da onda de ultrassom .....	80
4.5 Ensaaios Superficiais na Tora.....	84
4.6 Influência da Posição de Medição, do Diâmetro da Árvore e da Densidade da Madeira na Condição Saturada no Modelo de Predição da Velocidade de Propagação de Ondas na Tora a partir da Velocidade na Árvore.....	86
4.7 Influência do Diâmetro da Árvore e da Densidade da Madeira na Condição Saturada no Modelo de Predição da Velocidade de Propagação de Onda na Viga Saturada, e nos Modelos de Predição das Propriedades de Resistência e de Rigidez da Madeira a partir da Velocidade na Árvore .....	93
4.8 Influência do Diâmetro da Árvore, da Densidade da Madeira na Condição Saturada e do Coeficiente de Poisson nos Modelos de Predição da Velocidade de Propagação de Ondas na Tora e na Viga a partir da Velocidade na Árvore.....	101
4.9 Resistência e Rigidez da Madeira Obtida a partir da Velocidade Acústica na Árvore.....	106
5. CONCLUSÕES .....	109
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	110
ANEXO I.....	114
ANEXO II .....	120

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais que sempre acreditaram em mim.  
Ao meu marido, meu companheiro de todas as horas.  
Ao meu filho que me ensinou a não perder tempo e  
preencheu todos os segundos do meu dia.*



## **AGRADECIMENTOS**

À Profa. Dra. Raquel Gonçalves que foi muito além que uma orientadora, amiga, conselheira, exemplo de pessoa e de profissional.

Aos meus orientadores durante o estágio no exterior, Dra. Esther Merlo Sánchez e Prof. Dr. Manuel Guaita Fernandes.

Aos amigos e companheiros do LabEND e da FEAGRI/UNICAMP pela amizade e apoio, pela colaboração não só na realização dos ensaios, mas em todos os momentos de dúvidas e dificuldades.

Aos meus pais e aos meus irmãos que estão sempre presentes e me dão força para seguir em frente.

Ao meu marido Edinho e ao meu filho Caio, que representam tudo o que tenho de melhor na vida.

Às Empresas Rotta Madeiras (Caçador, Santa Catarina, Brasil), Duraflora (Lençóis Paulista, SP, Brasil) e Madeira Plus Calidad Forestal (Galicia, Espanha) e ao Prof. Dr. Mario Tomazello pela colaboração na doação de árvores e ensaios.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela bolsa de doutorado e auxílio financeiro à pesquisa.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo financiamento e concessão de bolsa para a realização do estágio no exterior.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de ondas gerados a partir de um impacto na superfície de um material elástico. Fonte: Adaptada de Meyers (1994). .....	4
Figura 2.2. Onda longitudinal percorrendo um material longo e fino como uma onda plana. Adaptada de Wang, 2013.....	4
Figura 3.1. Equipamento de ultrassom (USLab) (a) e transdutores de faces exponenciais de 45 kHz de frequência (b).....	21
Figura 3.2 Ensaio de ultrassom na árvore. ....	22
Figura 3.3. Equipamento de onda de tensão (ST300). Fonte: <a href="http://www.fibre-gen.com">http://www.fibre-gen.com</a> .....	23
Figura 3.4. Ensaio nas árvores utilizando equipamento de ondas de tensão (ST300).....	23
Figura 3.5. Representação da retirada das toras de <i>Eucalyptus grandis</i> (10 e 34 anos), <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Eucalyptus pellita</i> (a) e da retirada das toras de <i>Pinus eliottii</i> (b). Fonte: Massak, 2010. ....	25
Figura 3.6. Ensaios longitudinais nas toras, nos pontos próximo à casca (C), próximo à medula (M) e um ponto intermediário (I) à esses dois pontos, utilizando o ultrassom (a) e o equipamento de vibração (b).....	26
Figura 3.7. Ensaio de propagação de onda superficial na tora utilizando o equipamento de ondas de tensão. ....	27
Figura 3.8. Ensaio de propagação de onda superficial na tora utilizando o ultrassom.....	27
Figura 3.9. Definição da malha e dos pontos de leitura de tempo pelo transdutor receptor na face da tora para os ensaios de dispersão das ondas. ....	28
Figura 3.10. Representação do ensaio de dispersão da onda utilizando equipamento de ultrassom. ....	29
Figura 3.11. Esquema de retirada das vigas de uma tora (Fonte: Massak, 2010). ....	30
Figura 3.12. Transdutores de faces planas de 45 kHz de frequência (a) e medições de ultrassom na seção transversal da viga (b).....	31
Figura 3.13. Ensaio de vibração longitudinal nas vigas de <i>Pinus pinaster</i> . ....	32
Figura 3.14. Pórtico com atuador hidráulico para ensaio de estruturas.....	33
Figura 3.15. Esquema do ensaio de flexão na viga bi apoiada e com aplicação da carga centrada. ....	34

Figura 3.16. Representação do posicionamento dos <i>gages</i> nos pontos da zona tracionada e comprimida na região central da viga.....	36
Figura 3.17. Montagem dos <i>gages</i> com o cabeamento.....	37
Figura 3.18. Ensaio de ultrassom realizado na direção paralela à fibra durante o carregamento da viga. ....	38
Figura 3.19. Furação na seção transversal da viga para inserção dos transdutores de faces exponenciais durante o ensaio de ultrassom na direção paralela às fibras. ....	38
Figura 3.20. Poliedro de 26 faces utilizado no ensaio de ultrassom para a caracterização da madeira. ....	40
Figura 3.21. Posicionamento dos transdutores no poliedro durante ensaio de ultrassom. ....	41
Figura 3.22. Disposição dos extensômetros para a obtenção das deformações nas três direções – radial (a) e longitudinal e tangencial (b) nos corpos de prova de compressão.....	43
Figura 3.23. Ensaio de compressão instrumentada paralela às fibras. ....	44
Figura 4.1. Velocidades médias e desvio padrão, por espécie, obtidas em ensaios de ultrassom na árvore, na tora e na viga.....	46
Figura 4.2. Velocidade obtida em ensaios de ondas de tensão na árvore (ST 300) e velocidade obtida em ensaios de vibração (HM 200) na tora e na viga, nas espécies de eucaliptos e de <i>Pinus pinaster</i> . ....	47
Figura 4.3. Modelos de regressão das velocidades de ultrassom na árvore ( $V_a$ ) e na tora ( $V_t$ ) e das velocidades de ultrassom na árvore ( $V_a$ ) e na viga ( $V_v$ ).....	50
Figura 4.4. Regressão entre a velocidade de ultrassom na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) na viga para as espécies. ....	53
Figura 4.5. Regressão entre a velocidade de ultrassom na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de ruptura ( $f_m$ ) na viga para as espécies. ....	54
Figura 4.6 - Regressão entre a velocidade de ondas de tensão na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) na viga para as espécies.....	55
Figura 4.7 - Regressão entre a velocidade de ondas de tensão na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de ruptura ( $f_m$ ) na viga para as espécies. ....	56
Figura 4.8. Médias de velocidade na árvore ( $V_a$ ), por espécie, obtida com de ultrassom e com ondas de tensão. ....	57
Figura 4.9. Médias de velocidade na tora ( $V_t$ ), por espécie, obtida com equipamento de ultrassom e com equipamento de vibração. ....	59

Figura 4.10. Velocidade nas vigas ( $V_v$ ) de <i>Pinus pinaster</i> obtida com equipamento de ultrassom e com equipamento de vibração (HM200).....	61
Figura 4.11. Regressão entre a velocidade na viga obtida por vibração e a velocidade na viga obtida por ultrassom. ....	61
Figura 4.12. Exemplo de gráfico deformação específica x tensão teórica obtido para a viga 1.3.C ( <i>Eucalyptus grandis</i> ). ....	65
Figura 4.13. Exemplo de gráfico deformação específica média obtidas em faces opostas x tensão teórica obtido para a viga 1.3.C ( <i>Eucalyptus grandis</i> ). ....	66
Figura 4.14. Diagrama de tensão experimental para cada nível de carregamento e teórico considerando o nível máximo de carregamento, para diferentes pontos na altura (h) da seção transversal da viga 1.3.C ( <i>Eucalyptus grandis</i> ). ....	67
Figura 4.15. Diagrama de tensão experimental para cada nível de carregamento e teórico considerando o nível máximo de carregamento, para diferentes pontos na altura (h) da seção transversal da viga 3.2.B ( <i>Eucalyptus grandis</i> ). ....	68
Figura 4.16. Diagrama de tensão experimental para cada nível de carregamento e teórico considerando o nível máximo de carregamento, para diferentes pontos na altura (h) da seção transversal da viga 1.1.D ( <i>Eucalyptus grandis</i> ). ....	68
Figura 4.17. Localização da face superior na seção transversal da tora durante o ensaio de dispersão (a) e mapa de dispersão da velocidade na seção transversal da tora de <i>Eucalyptus grandis</i> (amostra 1). ....	81
Figura 4.18. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de <i>Corymbia citriodora</i> (amostra 4) - a e de <i>Eucalyptus pellita</i> (amostra 1) - b. ....	81
Figura 4.19. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de <i>Pinus pinaster</i> (amostra 2). ....	82
Figura 4.20. Valores de velocidade na árvore ( $V_a$ ), por espécie, velocidade superficial na tora ( $V_{t,sup}$ ) e velocidade longitudinal na tora ( $V_t$ ). ....	85
Figura 4.21. Velocidade na árvore ( $V_a$ ) e velocidade superficial na tora da base ( $V_{tb,sup}$ ). ....	86
Figura 4.22. Relação média, por espécie, entre velocidade na árvore e velocidade na tora considerando todas as toras retiradas da árvore e somente as toras da base. ....	87
Figura 4.23. Modelos de predição da velocidade na tora à partir da velocidade na árvore. ....	89
Figura 4.24. Modelos de predição da velocidade na tora a partir da velocidade ajustada. ....	92
Figura 4.25. Relação média, por espécie, entre velocidade ajustada na árvore e velocidade na tora considerando todas as toras retiradas da árvore. ....	93

Figura 4.26. Velocidade de ultrassom na árvore (Va) e na viga saturada (Vv).....	94
Figura 4.27. Relação entre a velocidade na árvore (Va) e a velocidade retirada de todas as vigas da árvore (Vv). .....	95
Figura 4.28. Relação entre a velocidade na árvore (Va) ou a velocidade na viga (Vv) e a propriedade de resistência ( $f_m$ - a) e de rigidez ( $E_M$ - b) da madeira. ....	96
Figura 4.29. Relação entre a velocidade na árvore (Va) e a velocidade na viga (Vv) e entre a velocidade ajustada (Vajustada) e a velocidade na viga (Vv). .....	97
Figura 4.30. Modelo de predição da velocidade na viga (Vv) a partir da velocidade ajustada (Vajustada).....	100
Figura 4.31. Relação entre a resistência prevista pelo modelo ajustado ( $f_m$ ajustada) e a resistência experimental ( $f_m$ experimental) das vigas (a) e relação entre a rigidez prevista pelo modelo ajustado ( $E_M$ ajustada) e a rigidez experimental ( $E_M$ experimental) das vigas (b). ....	101
Figura 4.32. Relação entre a velocidade na árvore (Va) e a velocidade na tora (Vt) e entre a velocidade na tora ajustada (Vt,ajustada) e a velocidade na tora (Vt). ....	104
Figura 4.33. Modelos de predição da velocidade na tora (Vt) à partir da velocidade na árvore (Va) ou a partir da velocidade na tora ajustada (Vt,ajustada). .....	105
Figura 4.34. Modelos de predição da velocidade na viga (Vv) à partir da velocidade na árvore (Va) ou a partir da velocidade na viga ajustada (Vv,ajustada). ....	105
Figura 4.35. Relação entre a velocidade na árvore (Va) e a velocidade na viga (Vv) e entre a velocidade na viga ajustada (Vv,ajustada) e a velocidade na viga (Vv). ....	106
Figura II.1. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de <i>Eucalyptus grandis</i> para a amostra 2 (a) e para a amostra 3 (b). .....	120
Figura II.2. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de <i>Corymbia citriodora</i> para a amostra 1 (a), para a amostra 2 (b) e para a amostra 3 (c). .....	121
Figura II.3. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de <i>Eucalyptus pellita</i> para a amostra 2 (a) e para a amostra 3 (b). .....	122
Figura II.4. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de <i>Pinus pinaster</i> para a amostra 1 (a) e para a amostra 3 (b). .....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Relação das espécies, número e idades das árvores e seus respectivos diâmetros médios na altura do peito ( $\Phi$ médio DAP), número de toras e número de vigas que compuseram a amostragem da pesquisa. ....	20
Tabela 4.1. Média, por espécie, das velocidades nas árvores, nas toras recém abatidas e nas vigas saturadas e análise estatística de comparação de médias entre velocidade na árvore ( $V_a$ ), velocidade na tora ( $V_t$ ) e velocidade na viga ( $V_v$ ). ....	48
Tabela 4.2. Velocidades de ultrassom obtidas nas árvores ( $V_a$ ) e médias dos módulos de ruptura ( $f_m$ ) e dos módulos de elasticidade ( $E_M$ ) obtidos em ensaio de flexão em vigas retiradas de cada árvore das espécies. ....	52
Tabela 4.3. Modelos e parâmetros estatísticos (R, P-valor e Erro) da regressão entre a velocidade de ultrassom na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) e entre a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de ruptura ( $f_m$ ) para as espécies. ....	53
Tabela 4.4. Velocidades de ondas de tensão obtidas nas árvores ( $V_a$ ) e valores médios do módulo de resistência ( $f_m$ ) e do módulo de elasticidade ( $E_M$ ) obtidos em ensaio de flexão de vigas retiradas de cada árvore das espécies. ....	54
Tabela 4.5. Modelos e parâmetros estatísticos (R, P-valor e Erro) da regressão entre a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) e entre a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de ruptura ( $f_m$ ), para as espécies. ....	55
Tabela 4.6. Valores mínimos (Min.), máximos (Max.), médios (Média) e coeficientes de variação (CV) para a velocidade de ultrassom e de ondas de tensão obtidas em ensaios na árvore ( $V_a$ ) das diferentes espécies avaliadas. ....	57
Tabela 4.7. Valores mínimos (Min.), máximos (Max.), médios (Média) e coeficientes de variação (CV) para a velocidade de ultrassom e de vibração obtidas em ensaios na tora ( $V_t$ ) das diferentes espécies avaliadas. ....	58
Tabela 4.8. Valores mínimos (Min.), máximos (Max.), médios (Média) e coeficientes de variação (CV) para a velocidade ( $V_v$ ) de ultrassom e de vibração (HM200) obtidas em ensaios nas vigas de <i>Pinus pinaster</i> . ....	60
Tabela 4.8. Tensões normais teóricas determinadas nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 1.3.C ( <i>Eucalyptus grandis</i> ). ....	64
Tabela 4.9. Coeficientes de correlação (R) das retas de regressão entre a deformação específica e a tensão para cada zona de medição na altura da viga 1.3.C ( <i>Eucalyptus grandis</i> ). ....	65
Tabela 4.10. Constantes acustoelásticas médias obtidas utilizando a tensão teórica e a tensão experimental. Espécie: <i>Eucalyptus grandis</i> (10 anos). ....	70

Tabela 4.11. Constantes acustoelásticas médias obtidas utilizando a tensão teórica e a tensão experimental. Espécie: <i>Eucalyptus pellita</i> (26 anos).....	71
Tabela 4.12. Constantes acustoelásticas médias obtidas utilizando a tensão teórica e a tensão experimental. Espécie: <i>Corymbia citriodora</i> (8 anos).....	72
Tabela 4.13. Constantes acustoelásticas médias e coeficiente de variação (entre parêntesis) para as três espécies obtidas utilizando a tensão teórica e a tensão experimental. ....	73
Tabela 4.14. Constantes elásticas (módulos de elasticidade longitudinais – E, módulos de elasticidade transversais – G e coeficientes de Poisson – $\nu$ ) obtidas por ultrassom e valores médios propostos por Bodig e Janyne (1982) (B&J). <i>Eucalyptus grandis</i> .....	74
Tabela 4.15. Constantes elásticas (módulos de elasticidade longitudinais – E, módulos de elasticidade transversais – G e coeficientes de Poisson – $\nu$ ) obtidas por ultrassom e valores médios propostos por Bodig e Janyne (1982) (B&J). <i>Corymbia citriodora</i> .....	75
Tabela 4.16. Constantes elásticas (módulos de elasticidade longitudinais – E, módulos de elasticidade transversais – G e coeficientes de Poisson – $\nu$ ) obtidas por ultrassom valores médios propostos por Bodig e Janyne (1982) (B&J). <i>Eucalyptus pellita</i> .....	75
Tabela 4.17. Constantes elásticas (módulos de elasticidade longitudinais – E, módulos de elasticidade transversais – G e coeficientes de Poisson – $\nu$ ) obtidas por ultrassom e valores médios propostos por Bodig e Janyne (1982) (B&J). Espécie: <i>Pinus pinaster</i> . ....	76
Tabela 4.18. Resultados dos parâmetros elásticos (módulo de elasticidade longitudinal – $E_{c0}$ e coeficientes de Poisson - $\nu_{LT}$ e $\nu_{LR}$ ) obtidos no ensaio de compressão paralela às fibras para o <i>Pinus pinaster</i> . ....	77
Tabela 4.19. Comparação de parâmetros (módulo de elasticidade longitudinal – $E_{c0}$ e $E_L$ e coeficientes de Poisson - $\nu_{LT}$ e $\nu_{LR}$ ) determinados por ensaio de compressão paralela e por ensaio de ultrassom. Espécie: <i>Pinus Pinaster</i> .....	77
Tabela 4.20. Valores médios e coeficientes de variação para o módulo de elasticidade longitudinal ( $E_M$ ), obtido por ultrassom e por flexão estática. ....	78
Tabela 4.21. Velocidades médias obtidas em ensaios na árvore viva (superficial - $V_a$ ) e nas toras recém abatidas (longitudinal - $V_t$ ). ....	83
Tabela 4.22. Modelos de predição da velocidade na tora ( $V_{tm}$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor, $R^2$ e Erro).....	91
Tabela 4.23. Modelos de predição da velocidade na tora da base ( $V_{tb}$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor, $R^2$ e Erro).....	91

Tabela 4.24. Modelos de predição da velocidade na viga ( $V_v$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor, $R^2$ e Erro).....	99
Tabela 4.25. Modelos de predição da resistência da madeira ( $f_m$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor, $R^2$ e Erro).....	99
Tabela 4.26. Modelos de predição da rigidez da madeira ( $E_M$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor, $R^2$ e Erro).....	99
Tabela 4.27. Modelos de predição da velocidade na tora ( $V_t$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor, $R^2$ e Erro).....	103
Tabela 4.28. Modelos de predição da velocidade na viga ( $V_v$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor, $R^2$ e Erro).....	103
Tabela 4.29. Modelos de predição da resistência da madeira ( $f_m$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a velocidade na tora ( $V_t$ ), a velocidade na viga saturada ( $V_v$ ), as velocidades nas toras ajustadas (1) e (2) ( $V_{t,a1}$ e $V_{t,a2}$ , respectivamente), as velocidades nas vigas ajustadas (1) e (2) ( $V_{v,a1}$ e $V_{v,a2}$ , respectivamente) e parâmetros de análise da regressão (P-valor, $R$ , $R^2$ e Erro).....	107
Tabela 4.30. Modelos de predição da rigidez da madeira ( $E_M$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a velocidade na tora ( $V_t$ ), a velocidade na viga saturada ( $V_v$ ), as velocidades nas toras ajustadas (1) e (2) ( $V_{t,a1}$ e $V_{t,a2}$ , respectivamente), as velocidades nas vigas ajustadas (1) e (2) ( $V_{v,a1}$ e $V_{v,a2}$ , respectivamente) e parâmetros de análise da regressão (P-valor, $R$ , $R^2$ e Erro).....	108
Tabela I.1. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 1.2.C ( <i>Eucalyptus grandis</i> ).....	114
Tabela I.2. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 15.2.B ( <i>Eucalyptus grandis</i> ).....	114
Tabela I.3. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 6.1.A ( <i>Corymbia citriodora</i> ).....	114
Tabela I.4. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 15.2.E ( <i>Eucalyptus pellita</i> ).....	115
Tabela I.5. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 9.1.C ( <i>Corymbia citriodora</i> ).....	115

Tabela I.6. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 9.1.A ( <i>Corymbia citriodora</i> ).....	115
Tabela I.7. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 9.2.A ( <i>Corymbia citriodora</i> ).....	116
Tabela I.8. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 6.1.B ( <i>Corymbia citriodora</i> ).....	116
Tabela I.9. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 6.2.A ( <i>Corymbia citriodora</i> ).....	116
Tabela I.10. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.1.C ( <i>Eucalyptus pellita</i> ).....	117
Tabela I.11. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.3.F ( <i>Eucalyptus pellita</i> ).....	117
Tabela I.12. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 1.2.B ( <i>Eucalyptus grandis</i> ).....	117
Tabela I.13. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 3.2.B ( <i>Eucalyptus grandis</i> ).....	118
Tabela I.14. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.1.P ( <i>Eucalyptus pellita</i> ).....	118
Tabela I.15. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.1.A ( <i>Eucalyptus pellita</i> ).....	118
Tabela I.16. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.1.D ( <i>Eucalyptus pellita</i> ).....	119
Tabela I.17. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.2.E ( <i>Eucalyptus pellita</i> ).....	119

## 1 INTRODUÇÃO

Tecnologias que utilizam a propagação de ondas vêm sendo estudadas há décadas, por pesquisadores da área de madeiras de várias partes do mundo e, os avanços obtidos ao longo desse tempo permitiram que tais tecnologias se estabelecessem como ferramentas de avaliação e seu uso está se tornando cada dia mais aceito pela indústria madeireira para controle de qualidade e para classificação. Como passo seguinte, o foco das pesquisas se voltaram para a utilização dessa tecnologia visando acessar a qualidade da madeira à partir da árvore ou da tora recém abatida, pois isso permitiria avaliar as propriedades intrínsecas de cada árvore, antecipando o conhecimento das propriedades da madeira por área e por floresta.

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, no qual pode haver a influência do coeficiente de Poisson. Além disso, o estado de carregamento da árvore e da tora são distintos, e a distância entre os transdutores normalmente é menor do que no caso do ensaio na tora, podendo provocar outros distúrbios na propagação da onda. 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, fazendo com que a propagação e a dispersão da onda seja diferente.

Adicionalmente, em caso de árvores mais maduras, a onda se propaga na zona de madeira adulta (mais externa) enquanto na tora o percurso será uma mescla entre madeira juvenil e adulta.

Assim, a velocidade medida em árvores em pé é afetada por diversos parâmetros e de diferentes formas, fazendo com que seu valor não seja numericamente igual ao obtido na tora recém abatida ou 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, provavelmente em função da forma e da dimensão da seção, bem como das diferenças do material, já que o valor médio na tora envolve medições em diferentes partes (próximo da medula, próximo da casca) e a viga pode ser retirada concentrando características de uma região específica.

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, a hipótese dessa pesquisa é que, estudando-se 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 resistência e da rigidez da madeira em sua condição de uso (peça estrutural).

### **1.1 Objetivo**

O objetivo geral da pesquisa foi a obtenção de modelos que permitissem prever propriedades de resistência e de rigidez da madeira a partir da avaliação acústica na árvore.

#### ***1.1.2 Objetivos específicos***

Levando em consideração o problema e a hipótese da pesquisa, os objetivos específicos foram:

- Quantificar as diferenças de velocidade de propagação de ondas em árvores, toras e vigas na condição saturada;
  
- Avaliar, do ponto de vista teórico, essas diferenças, buscando entender os mecanismos de propagação da onda nessas três formas do material e, assim, determinar os parâmetros que, adicionados ao modelo, permitissem ajustar e minimizar os desvios entre a velocidade na árvore às velocidades na tora e na viga.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Introdução**

A lógica principal desta pesquisa é a associação com interferência, tendo como variável independente a velocidade de propagação de ondas em árvores e como variáveis dependentes a resistência ( $f_m$ ) e a rigidez ( $E_M$ ) em flexão estática. No entanto, para que o objetivo principal da pesquisa fosse alcançado, foi necessário estudar, também, a associação entre a velocidade na árvore e na tora e entre a velocidade na árvore e na viga. Adicionalmente, a pesquisa envolveu aspectos descritivos relacionados com a compreensão dos mecanismos que interferem na propagação das ondas nas diferentes formas do material – árvore, tora e viga – sendo os principais os tipos de onda (compressão e superficial), o coeficiente de Poisson e a acustoelasticidade.

Assim, a revisão bibliográfica foi focada em fundamentos da propagação de ondas, pois relaciona-se com a questão das diferentes formas de propagação em árvores, toras e vigas e sua interferência nos valores de velocidade obtidos nestes três tipos de geometria do material. Outros fundamentos apresentados, por terem relação com a pesquisa foram a acustoelasticidade e o coeficiente de Poisson. Por fim, foram apresentados resultados de pesquisas de associação da velocidade em toras e em árvores, com propriedades da madeira e as conclusões da revisão.

### **2.2 Fundamentos Teóricos da Propagação de Ondas**

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.

Quando uma força é aplicada na superfície da madeira, o distúrbio causado viaja no material como uma onda de tensão (MEYERS, 1994). Em geral três tipos de ondas são geradas a partir do impacto: 1) onda longitudinal (onda de compressão); 2) onda de cisalhamento e 3) onda de superfície (*Rayleigh*) (Figura 2.1).

Na onda de compressão a oscilação das partículas do material se dá no mesmo sentido da frente de propagação da onda, sendo a polarização da partícula paralela a velocidade de onda. Na onda de cisalhamento o movimento das partículas (polarização) é perpendicular à direção de

propagação de ondas. Na onda Rayleigh (superficial) a perturbação do material se restringe à região próxima à superfície, e as partículas se movem para cima e para baixo, para frente e para trás, traçando um movimento elíptico. Embora a maior parte da energia do impacto seja utilizada para transportar a ondas de cisalhamento e de superfície, a onda longitudinal viaja mais rápido e é mais fácil de ser detectada em ensaios de campo (MEYERS, 1994). Consequentemente, a onda longitudinal é a mais comumente utilizada para a caracterização das propriedades da madeira.

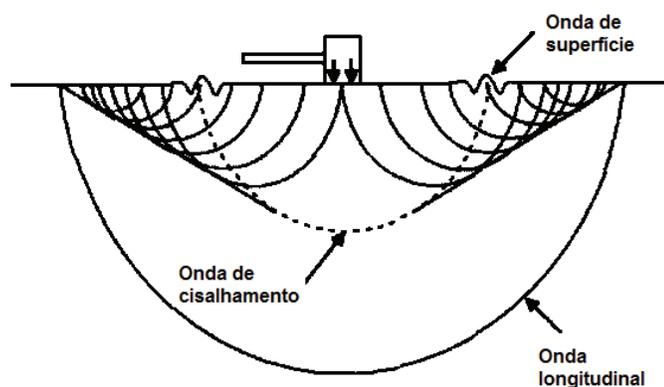


Figura 2.1. Tipos de ondas gerados a partir de um impacto na superfície de um material elástico. Fonte: Adaptada de Meyers (1994).

Uma compreensão básica da relação entre as propriedades da madeira e a propagação de ondas longitudinais pode ser obtida a partir da teoria de propagação de ondas. Em um material longo, fino e isotrópico, a tensão e a inércia na direção transversal pode ser desconsiderada e a onda longitudinal se propaga na forma de onda plana (frente de onda) (Figura 2.2). Neste caso, a velocidade da onda é independente do coeficiente de Poisson e é dada pela Equação 2.1 (também conhecida como equação da onda unidimensional).



Figura 2.2. Onda longitudinal percorrendo um material longo e fino como uma onda plana. Adaptada de Wang, 2013.

$$V_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde  $V_0$  é a velocidade da onda longitudinal;  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal e  $\rho$  é a densidade do material.

Em um meio elástico, infinito ou ilimitado está presente um estado triaxial de tensão. A frente de onda longitudinal não percorre o meio como um plano. A propagação de onda é governada pela equação (Equação 2.2) de onda tridimensional longitudinal (Meyers, 1994).

$$V = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{E}{\rho}} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde  $V$  é a velocidade da onda longitudinal em um meio ilimitado e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do material.

Para diferenciar da velocidade da onda longitudinal em uma haste fina (unidimensional), o termo “onda tridimensional” é utilizado para o meio ilimitado (WANG *et al.*, 2007b; ANDREWS e BEALL, 2001; WANG, 2013). A velocidade de onda é dependente da densidade e de dois parâmetros elásticos, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

### 2.3 Propagação de ondas em árvore e em toras

A aplicação direta dos fundamentos das equações da onda na madeira, particularmente em árvores e em toras, é complicada pelo fato da madeira não ser nem homogênea nem isotrópica. As propriedades da madeira nas árvores/toras variam da medula para a casca conforme as zonas de madeira juvenil para adulta. As propriedades também variam da base para o topo dentro da árvore e diferem entre árvores. As espécies, as condições do solo e os fatores ambientais afetam as características da madeira, tanto em níveis microscópicos quanto em níveis macroscópicos.

Apesar das variações naturais, estudos mostram que a equação da onda unidimensional é adequada para caracterizar o comportamento da propagação de ondas em toras longas e de pequeno diâmetro (WANG *et al.*, 2004). O módulo de elasticidade previsto a partir da equação da onda unidimensional (Equação 2.1) geralmente apresenta alta precisão (WANG, 2013).

Para árvore em pé, as medições acústicas ocorrem de maneira diferente da que ocorre na tora. Pelo fato de não se ter acesso às extremidades do material, como no caso das toras, na árvore a onda acústica tem que ser introduzida na superfície do tronco, o que gera resultados de estado de tensão não uniaxial no tronco. Dessa forma, a equação de onda unidimensional não é diretamente válida para árvores (WANG, 2013). Se a onda tridimensional é considerada para as medições acústicas nas árvores, é necessário o coeficiente de Poisson da madeira para descrever a relação entre a velocidade da onda e o módulo de elasticidade (Equação 2.2). A velocidade da onda tridimensional é maior do que da onda unidimensional (Equações 2.1 e 2.2) (MEYERS 1994, WANG *et al.*, 2007a). Com o aumento do coeficiente de Poisson a diferença entre a velocidade da onda tridimensional e unidimensional aumenta. Por exemplo, a relação entre a onda tridimensional e unidimensional é de 1,16 para  $\nu = 0,30$ . A relação entre velocidades passa para 1,46 quando o coeficiente de Poisson aumenta para 0,40 (WANG, 2013).

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* proveniente de duas regiões geográficas distintas na Nova Zelândia. Adicionalmente, estudo realizado em floresta de pinus radiata (*Pinus radiata*) na Nova Zelândia por Tsehaye *et al.* (2000a) mostrou haver três classes de propriedades acústicas em toras consideradas idênticas. Estes autores concluíram que 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 prever a resistência e a elasticidade de peças estruturais que serão produzidas a partir deste tronco. No caso do trabalho de Ross *et al.*, (1997) o objetivo foi 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 se determinou, a partir da velocidade longitudinal e da densidade, o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{Md} = V^2 \cdot \rho$ ) 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 não estruturais.

Segundo Amishev e Murphy (2008) o módulo de elasticidade em flexão ( $E_M$ ) é uma das mais importantes propriedades mecânicas e a mais frequentemente utilizada como indicador da capacidade para suportar os carregamentos, no caso da madeira. Por meio de parceria com 6 empresas florestais esses autores realizaram pesquisa envolvendo uma grande 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<sup>-1</sup> a 4690 m.s<sup>-1</sup>. 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<sup>-1</sup>) enquanto as regiões A, B, D e E os maiores valores (3820 a 3920 m.s<sup>-1</sup>).

Equipamento de ressonância (Fibre-gen, HM-200TM, Nova Zelândia) foi utilizado por Carter *et al.* (2005) em toras para avaliar as propriedades de resistência e de rigidez da madeira. Os autores concluíram 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. Os mesmos autores utilizaram equipamento de ondas de tensão (Fibre-gen, ST-300TM, Nova Zelândia) em árvores em pé e verificaram 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.

No caso de ensaios na árvore viva, Wang *et al.* (2007b) concluíram que a precisão obtida com a tecnologia de ultrassom é suficiente para prever 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. No entanto, pesquisas nessa área (TSEHAYE *et al.*, 2000 a e b, WALKER, 2006, WANG *et al.*, 2007b; WANG *et al.*, 2004; WANG *et al.*, 2000; GONÇALVES *et al.*, 2011a) demonstraram haver diferenças entre a velocidade de propagação de ondas na árvore e na tora recém abatida dessa mesma árvore, sendo as velocidades na árvore, em geral, superiores às na tora. Segundo a discussão dos autores, essas variações podem estar ligadas a mecanismos de propagação das ondas, que seriam influenciados pela forma de medição (indireta na árvore e direta na tora), pelo diâmetro e pela idade das árvores (maior proporção de madeira juvenil e adulta) e, ainda, pela estrutura estática da árvore (engastada-livre).

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%. Ensaio 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 a velocidade e a

densidade saturada ( $E_{Md} = V^2 \cdot \rho$ ), 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.

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. No entanto, os resultados obtidos pelos autores em 2248 pranchas obtidas de 108 árvores de pinus radiata (*Pinus radiata*) demonstraram que, para a seleção de árvores que possuíam madeira apta a ser utilizada em estruturas, indicou que a rigidez foi o melhor parâmetro para a seleção de árvores superiores em 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.

Há também estudos que buscam selecionar árvores ainda jovens, como é o caso da pesquisa de Lindström *et al.* (2002). Esses autores realizaram estudo visando investigar a possibilidade de selecionar árvores jovens que possuíssem 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.

A relação entre velocidades na árvore e na tora foi objeto de estudo de Wang *et al.* (2007a). O estudo foi realizado utilizando 5 espécies de coníferas (*Picea sitchensis*, *Tsuga heterophylla*,

*Pinus banksiana*, *Pinus ponderosa*, *Pinus radiata*). Para os ensaios nas árvores 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. Os autores obtiveram valores para a relação média entre velocidades na árvore/tora variando de 1,07 para o *Pinus radiata* a 1,36 para o *Pinus ponderosa*. A relação entre velocidades (árvore/tora) para a *Picea sitchensis*, para a *Tsuga heterophylla* e para o *Pinus banksiana* apresentaram valores próximos, variando de 1,22 a 1,24. Esse resultado levou os autores a discutirem a forma diferenciada de propagação das ondas nas toras e nas árvores.

Visando explicar as diferenças de velocidades entre árvores e toras Wang (1999) simulou em laboratório o ensaio na árvore com dez toras recém abatidas de *Pinus resinosa* com 2,74 m de comprimento. As amostras de árvores foram ensaiadas utilizando ondas de tensão com transdutores distanciados de 1,22 m, em seguida, as velocidades foram comparadas com as velocidades obtidas longitudinalmente utilizando equipamento de ressonância. A velocidade superficial na tora apresentou alta correlação com o ensaio longitudinal na tora ( $R^2 = 0,88$ ), mas foi cerca de 10% superior que a velocidade longitudinal. As toras de *Pinus resinosa* utilizadas para esse ensaio foram provenientes de serraria local e a idade das toras eram desconhecidas. Assim como Wang (1999), Grabianowski *et al.* (2006) também simularam em laboratório o ensaio na árvore. Os autores utilizaram 43 toras provenientes de árvores jovens de *Pinus radiata* com idades variando de 8 a 11 anos crescidas na Nova Zelândia. As leituras de tempo foram obtidas de dois lados opostos de cada tora e foi obtida uma média para as velocidades superficiais nas toras antes da comparação com as velocidades longitudinais nas toras obtidas por ressonância. As velocidades superficiais nas toras foram  $270 \text{ m.s}^{-1}$  maiores que as velocidades longitudinais nas toras, o que representou um aumento de 12%.

Diferenças de velocidade entre árvores e toras também foram analisadas por Chauhan e Walker (2006) utilizando equipamento de ondas de tensão. No entanto, no caso destes autores, adicionalmente também houve a avaliação da influência da idade. Os resultados indicaram que a velocidade na árvore apresentou, na maioria dos casos, valores maiores que a velocidade nas toras retiradas das árvores, sendo que, a diferença entre velocidades aumentou com o aumento da idade e do diâmetro da árvore. Mora *et al.* (2009) também realizaram ensaios de ondas de tensão (Fakopp,

Hungria) em 60 árvores de *Pinus radiata* utilizando diferentes idades (de 14 a 19 anos). As toras recém abatidas das árvores foram ensaiadas com equipamento de ressonância HM200 (Hitman). Os autores também observaram forte relação entre a velocidade na árvore e na tora, com a velocidade na árvore sendo, em média, 32% superior que a velocidade na tora correspondente. Houve um aumento na diferença entre velocidades (árvore/tora) com o aumento da velocidade na árvore. Para explorar mais a relação entre a velocidade na árvore e na tora, Mora *et al.* (2009) adicionou 69 dados de pesquisa obtidos por Mahon *et al.* (2009) em 60 árvores. Os dados combinados consistiram em medições acústicas em árvores, com idades variando de 13 a 22 anos, e em toras provenientes das árvores recém abatidas. A relação entre velocidades (árvore/tora) considerando os dados combinados ( $n = 129$ ) foi semelhante à relação entre velocidades encontradas para os 60 indivíduos iniciais, com  $R^2 = 0,81$  e diferença média de 32% entre a velocidade na árvore e na tora.

A questão do uso de técnicas não destrutivas para avaliar os efeitos de técnicas silviculturais foram estudadas por Wang *et al.* (2001) e Auty e Achim (2008). Wang *et al.* (2001) utilizaram 168 árvores das espécies *Tsuga heterophylla* e *Picea sitchensis*. Os autores tiveram como objetivo, além da avaliação da correlação das velocidades de propagação das ondas com as propriedades de resistência e de rigidez de peças delas retiradas, verificar se os efeitos das práticas silviculturais, principalmente controle de densidade de povoamento, podiam ser identificados a partir do mesmo método de propagação de ondas. Ensaio de flexão estática foram realizados em peças retiradas de 56 árvores, possibilitando a determinação das propriedades de resistência e de rigidez das espécies avaliadas. 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 do módulo de elasticidade dinâmico ( $MOE_d$ ), obtido através da velocidade na árvore, e as propriedades da madeira revelaram correlação estatisticamente significativa com coeficiente de correlação de 0,66 para a regressão entre o  $MOE_d$  e a rigidez e coeficiente de correlação médio, considerando as duas espécies, de 0,64 para a regressão entre o  $MOE_d$  e a resistência da madeira. Os modelos de regressão apresentaram significância estatística com P-valor de 0,01. Os resultados também indicaram que os efeitos das práticas silviculturais de controle de densidade de povoamento podem ser identificados através do ensaio não destrutivo na árvore, pois tais práticas afetaram diretamente a qualidade da madeira da 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.

No caso de Auty e Achim (2008) 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 análise da regressão demonstrou boa correlação entre a velocidade na árvore e o módulo de elasticidade ( $R = 0,73$ ) e entre a velocidade na árvore e o módulo de ruptura ( $R = 0,77$ ). 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.

Em estudo realizado por Wang *et al.* (2013) foram considerados três parâmetros da tora (velocidade de propagação de ondas, diâmetro e sua posição de retirada na árvore) para avaliar a capacidade de previsão do módulo de elasticidade médio ( $E_M$ ) e do aproveitamento da madeira estrutural obtida de toras de *Pseudotsuga menziesii*. A relação entre a velocidade na tora e o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) médio das peças retiradas de cada tora apresentaram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 40%. Não foi obtida boa correlação entre o diâmetro da tora e o  $E_M$  médio das vigas ( $R^2 = 0,12$ ). A posição vertical de retirada das toras na árvore apresentou boa correlação, mas negativa, com o  $E_M$  médio das peças ( $R^2 = 0,57$ ), sendo que o  $E_M$  das vigas foi superior para as duas toras localizadas mais no topo da árvore e foi decaindo para as posições mais próximas do solo. A combinação da velocidade na tora e do seu diâmetro ou da velocidade na tora e de sua posição na árvore predisseram com mais precisão o  $E_M$  médio das vigas ( $R^2 = 0,50$  e  $R^2 = 0,67$ , respectivamente) quando comparado com a previsão de  $E_M$  com a utilização somente da velocidade na tora ( $R^2 = 0,40$ ), sendo que o melhor modelo foi o que combinou a velocidade na tora e a posição de retirada da tora na árvore. Segundo os autores (WANG *et al.* 2013) para a classificação de toras

de melhor qualidade os modelos de regressão múltipla foram mais eficazes do que o modelo que considerou apenas a velocidade na tora (regressão simples), no entanto, para a classificação de toras de baixa qualidade, os modelos gerados somente com a velocidade apresentaram bons resultados.

## **2.4 Acustoelasticidade da madeira**

Em todos os materiais a velocidade de propagação da onda é afetada pelo estado de tensões da peça em análise e a relação entre o estado de tensão e essa variação da velocidade de propagação das ondas é denominada *acustoelasticidade*. A acustoelasticidade vem sendo estudada para vários materiais, já que se houver a possibilidade de determinar um coeficiente que relacione a variação da velocidade do estado descarregado para o estado carregado, seria viável obter, por métodos de propagação de ondas, o estado de tensões de uma peça sob carregamento. Considerando essa definição, o uso desse fenômeno pode vir a ser importante método não destrutivo para determinar o estado de tensões da madeira na árvore.

Estudos mais conclusivos já existem para materiais com comportamento isotrópico, como é o caso do aço. No entanto, para materiais com comportamento ortotrópico como é o caso da madeira, além de não haver muitos estudos, os mesmos ainda não são conclusivos.

Ondas de ultrassom se propagando perpendicularmente à direção de uma solicitação são polarizadas nas duas direções das tensões principais devido à anisotropia induzida pela tensão. As duas ondas de cisalhamento apresentam diferentes velocidades, o que não ocorre no caso de um material livre de tensões. Esse fenômeno é chamado de efeito de birefringência acustoelástica (HASEGAWA *et al.*, 2000) e é uma contrapartida ao efeito fotoelástico observado em pesquisas com uso de modelos especialmente desenhados para avaliação desse fenômeno. Em metais e alumínio a acustoelástica tem sido utilizada para a determinação de tensões (ANDRINO *et al.*, 2002; ANDRINO, 2007; CAETANO, 2003; PEREIRA Jr., 2011). São particularmente importantes os artigos que usam como base o alumínio, uma vez que é um material também considerado ortotrópico.

A constante acustoelástica é dada pela relação entre a variação de velocidade e a tensão (Equação 2.3). Assim, caso seja possível a determinação dessa constante para uma determinada

espécie de madeira, a mesma pode ser utilizada para determinar o estado de tensões de um elemento estrutural.

$$K = \frac{\frac{V-V_0}{V_0}}{\sigma} \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde  $\sigma$  é a tensão em compressão ou tração;  $V$  é a velocidade na peça sob tensão e  $V_0$  é a velocidade inicial, na peça sem tensão.

Na pesquisa de Hasegawa *et al.* (2000) os ensaios foram feitos em corpos de prova sujeitos a carregamentos de compressão e de tração aplicados na direção longitudinal às fibras e medições de ultrassom foram realizadas na direção perpendicular à aplicação da carga. Os autores utilizaram transdutores longitudinais e de cisalhamento e, nesse último caso, a polarização da onda foi feita sempre na direção de aplicação do carregamento. As medições de ultrassom foram realizadas na direção radial com transdutores posicionados na face tangencial. Os autores utilizaram *strain gages* (5 e 10 mm de comprimento) para determinar a variação da distância entre os transdutores ocasionada pelo efeito do coeficiente de Poisson. Esses valores foram utilizados para corrigir o comprimento de percurso no caso do cálculo da velocidade.

Os resultados obtidos por Hasegawa *et al.* (2000) mostraram que, para o ensaio de compressão, as velocidades de cisalhamento decresceram desde o começo do ensaio. À medida que a deformação foi se tornando maior (para níveis de tensão de cerca de 70% da ruptura), a diminuição da velocidade de ultrassom ficou ainda mais acentuada. No caso da tração o resultado foi diferente. As velocidades de cisalhamento começaram a crescer com o aumento da tensão (até aproximadamente 35 MPa) e, acima desse nível de tensão, começaram a decrescer. No caso da velocidade longitudinal os resultados de Hasegawa *et al.* (2000) mostraram haver decréscimo de valor com o aumento da tensão, quer seja de tração ou de compressão.

Ensaio preliminares de acustoelasticidade foram realizados por grupo de pesquisa da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, utilizando ensaio de flexão (ORMONDE *et al.*, 2006). Os ensaios de flexão foram realizados em vigas de dimensões estruturais. Os ensaios de ultrassom foram realizados com propagação da onda na direção perpendicular (radial e tangencial) ao esforço de tração e de compressão provocados pela flexão. Os resultados mostraram que, da mesma forma que o obtido por Sasaki *et al.* (1998), para a conífera a variação da velocidade com

a variação de tensão foi maior do que para a folhosa. Para a folhosa a velocidade da onda na direção perpendicular aumenta com o aumento da tensão de compressão e diminui com o aumento da tensão de tração enquanto que, para a conífera, ocorre o inverso.

## 2.5 Coeficiente de Poisson

A madeira é considerada, de forma simplificada, um sólido ortotrópico. Isso significa que suas propriedades são influenciadas por três planos mutuamente perpendiculares de simetria elástica, fazendo com que haja 6 coeficientes de Poisson diferentes (radial-longitudinal/RL, longitudinal-radial/LR, radial-tangencial/RT, tangencial-radial/TR, longitudinal-tangencial/LT e tangencial-longitudinal/TL).

A determinação dos coeficientes de Poisson da madeira pode ser feita utilizando ensaios mecânicos estáticos (BODIG e JAYNE, 1982; MASCIA, 1991; FURLANI, 1995) ou de propagação de ondas (BUCUR e ARCHER, 1984; BUCUR & PERRIN, 1988; FRANÇOIS, 1995; PREZIOSA *et al.*, 1981; PREZIOSA, 1982; GONÇALVES *et al.*, 2011b; GONÇALVES *et al.*, 2014). Todos estes autores determinaram coeficientes de Poisson para a madeira seca. O coeficiente de Poisson da madeira verde não é conhecido (WANG, 2013).

Os coeficientes de Poisson da madeira apresentam grandes variações entre espécies. No entanto, em função da dificuldade de serem obtidos, Bodig e Jayne (1982) sugerem valores médios gerais para coníferas e folhosas.

Considerando que o carregamento na árvore está aplicado na direção longitudinal (L), o coeficiente  $\nu_{LR}$  é o que tem maior interesse para o estudo da influência da velocidade obtida em árvores. Este coeficiente de Poisson pode ser obtido de forma isolada por meio do ensaio estático. Para isso, utilizando-se um corpo de prova retirado segundo os eixos de simetria, com a direção longitudinal (L) coincidente com a direção de aplicação do carregamento, obtêm-se a tensão na direção longitudinal ( $\sigma_L$ ) e é possível, por meio da colagem de extensômetros, medir-se as deformações específicas, longitudinal ( $\epsilon_L$ ), radial ( $\epsilon_R$ ) e tangencial ( $\epsilon_T$ ). Assim, desse corpo de prova se obtêm os coeficientes de Poisson  $\nu_{LT}$  e  $\nu_{LR}$  utilizando as expressões  $\nu_{LT} = \epsilon_T/\epsilon_L$  e  $\nu_{LR} = \epsilon_R/\epsilon_L$ .

Artigo de revisão de Wang (2013) apresenta resultado de Bodig e Goodman (1973) no qual sugere um valor médio de 0,37 para o coeficiente de Poisson  $\nu_{LR}$ , tanto para coníferas como

para folhosas. Se considerada a Equação 2.2 a velocidade de onda tridimensional seria 1,33 vezes maior que a velocidade de onda unidimensional longitudinal, que aparentemente está coerente com resultados experimentais anteriores (WANG *et al.* 2001).

No caso do ensaio de ultrassom, é necessário que primeiramente se tenha toda a matriz de rigidez, que invertida permite o cálculo de todos os coeficientes de Poisson da madeira. Para caracterização da madeira com ultrassom François (1995) propôs corpo de prova em forma de poliedro com 26 faces para a determinação das constantes elásticas da madeira. Esse corpo de prova tem a vantagem de permitir a obtenção de todos os elementos da matriz de rigidez com apenas um poliedro e não apresenta a necessidade de impermeabilização como no caso do ensaio em imersão. Gonçalves *et al.* (2014) avaliaram a metodologia de ensaio utilizando ultrassom para a determinação das constantes elásticas da madeira utilizando três geometrias de corpos de prova: prismática, disco multifacetado e poliedro de 26 faces. Os autores concluíram que as três geometrias apresentam resultados equivalentes, mas que o poliedro de 26 faces apresenta como vantagem a redução da amostragem e a facilidade de confecção do corpo de prova.

É a lei de Hooke que permite, através de relações matemáticas, a obtenção dos parâmetros necessários para a caracterização da madeira. Bodig e Jayne (1993) discorrem sobre a forma tensorial da lei de Hooke, afirmando que é uma formulação matemática que correlaciona nove componentes de tensão,  $\sigma_{ij}$ , com nove componentes de deformação  $\epsilon_{ij}$ . Então é possível determinar 81 coeficientes de rigidez e 81 coeficientes de deformação. As propriedades elásticas podem ser definidas pelas Equações 2.6 e 2.7

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad \text{Equação 2.6}$$

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde  $C_{ijkl}$  é o tensor das constantes elásticas, ou seja, a matriz de rigidez e  $S_{ijkl}$  é a matriz de flexibilidade.

A lei de Hooke na forma matricial pode então, ser expressa da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 - \nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_3 - \nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

Onde  $\varepsilon$  é a deformação,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $\sigma$  é a tensão,  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal e  $G$  é o módulo de elasticidade transversal.

Para que seja possível relacionar a Lei de Hooke com a matriz de rigidez de materiais ortótropicos é necessária a utilização da equação de Christoffel, uma vez que esta é a base para a utilização da propagação de ondas na determinação das constantes elásticas dos materiais e fornece a relação entre as constantes elásticas  $[C]$  e a velocidade de propagação de ondas em meios sólidos.

A matriz de rigidez de material ortotrópico  $[C]$  é dada por:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Suas constantes são encontradas através das Equações de 2.8 a 2.16.

$$C_{11} = C_{LL} = \rho * V_{LL}^2 \quad \text{Equação 2.8}$$

$$C_{22} = C_{RR} = \rho * V_{RR}^2 \quad \text{Equação 2.9}$$

$$C_{33} = C_{TT} = \rho * V_{TT}^2 \quad \text{Equação 2.10}$$

$$C_{44} = C_{RT} = \rho * ((V_{RT} + V_{TR})/2)^2 \quad \text{Equação 2.11}$$

$$C_{55} = C_{LT} = \rho * ((V_{LT} + V_{TL})/2)^2 \quad \text{Equação 2.12}$$

$$C_{66} = C_{RL} = \rho * ((V_{RL} + V_{LR})/2)^2 \quad \text{Equação 2.13}$$

$$(C_{12} + C_{66}) n_1 n_2 = [(C_{11} n_1^2 + C_{66} n_2^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{66} n_1^2 + C_{22} n_2^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equação 2.14}$$

$$(C_{23} + C_{44}) n_2 n_3 = [(C_{22} n_2^2 + C_{44} n_3^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{44} n_2^2 + C_{33} n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equação 2.15}$$

$$(C_{13} + C_{55}) n_1 n_3 = [(C_{11} n_1^2 + C_{55} n_3^2 - \rho V_\alpha^2) (C_{55} n_1^2 + C_{33} n_3^2 - \rho V_\alpha^2)]^{1/2} \quad \text{Equação 2.16}$$

Onde  $V_\alpha$  é a velocidade da onda na direção  $\alpha$ . Na Equação 2.14  $n_1$  é  $\cos \alpha$  e  $n_2$  é  $\sin \alpha$ . Na Equação 2.15  $n_2$  é  $\cos \alpha$ ,  $n_3$  é  $\sin \alpha$ . Na Equação 2.16  $n_1$  é  $\cos \alpha$ ,  $n_3$  é  $\sin \alpha$ . Para  $\alpha = 45^\circ$  em todos os casos.

Apenas 9 constantes são independentes na matriz de rigidez [C]. Apesar de conter 12 elementos, sua simetria elástica origina seis termos diagonais (C11, C22, C33, C44, C55, C66) e três termos não diagonais (C12, C13, C23) independentes. Tais termos independentes da matriz de rigidez podem ser obtidos por meio da propagação de ondas nos eixos de simetria (diagonal) e em direções não coincidentes com esses eixos em cada um dos três planos (fora da diagonal).

A matriz de flexibilidade [S] é obtida através da inversão da matriz de rigidez [C], portanto podem-se relacionar seus termos com  $[C]^{-1}$ . Uma vez obtida a matriz de flexibilidade, são determinadas as variáveis do material que proporcionam uma caracterização completa e são de grande importância para a engenharia.

$$[S] = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_3 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix}$$

Para a madeira, os eixos 1, 2 e 3 podem ser substituídos pelas direções Longitudinal (L), Radial (R) e Tangencial (T), respectivamente.

## 2.6 Conclusão da Revisão

Na prática há grandes vantagens comerciais em utilizar as propriedades acústicas nas árvores como ferramenta de previsão de propriedades da madeira. Porém, como se pôde verificar nesse capítulo, a onda percorre de forma diferente e em posições diferentes a árvore e a tora/viga dela proveniente, fazendo com que as velocidades obtidas na árvore sejam diferentes das obtidas em toras e em vigas. Além disso, os modelos de regressão entre a velocidade obtida na árvore e propriedades mecânicas da madeira têm coeficientes de correlação piores do que os obtidos entre velocidade na tora/viga e estas propriedades.

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, ainda, resultado conclusivo.

No Brasil não foi possível encontrar, além da pesquisa iniciada em nível de mestrado no LabEND da FEAGRI/Unicamp (BERTOLDO, 2011; BERTOLDO *et al.* 2011; BERTOLDO *et al.* 2009; GONÇALVES *et al.*, 2011a), pesquisas que utilizam a propagação de ondas como forma de antecipação da determinação da rigidez da madeira a partir da árvore e/ou da tora, sendo, justificando, portanto, o estudo em nível de doutorado. Além disso, os equipamentos utilizados nessa pesquisa são pouco difundidos no Brasil, 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 Amostragem

Todas as árvores e, conseqüentemente, todas as toras e vigas que compuseram a amostragem dessa pesquisa, foram doadas por Empresas ou Universidades. Parte dos resultados dos ensaios nas árvores, toras e vigas que foram considerados para ampliar a amostragem também fizeram parte da dissertação de Mestrado (BERTOLDO, 2011).

Dessa forma, a amostragem da pesquisa foi composta por 2 árvores de plantio de *Corymbia citriodora* e 18 árvores de plantio do gênero *Eucalyptus*, 2 da espécie *grandis*, 2 da espécie *pellita*; 5 da espécie *cloeziana*; 4 da espécie *maculata* e 5 da espécie *resinifera*, todas provenientes da Fazenda Experimental da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP) localizada em Anhembi/SP (Tabela 3.1). Adicionalmente 5 árvores de *Corymbia citriodora*, provenientes de floresta localizada em Lençóis Paulista/SP, fornecidas pela empresa Duraflora, também fizeram parte da amostragem da pesquisa (Tabela 3.1). Além das espécies de eucalipto também foi utilizada árvores de plantio do gênero *Pinus*, sendo 3 da espécie *pinaster* obtida de floresta localizada em La Coruña (Galícia/Espanha) e 12 da espécie *elliottii*, com idades variando de 8 a 23 anos, provenientes de florestas situadas em Caçador/SC, fornecidas pela Empresa Rotta Madeiras (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Relação das espécies, número e idades das árvores e seus respectivos diâmetros médios na altura do peito ( $\Phi$  médio DAP), número de toras e número de vigas que compuseram a amostragem da pesquisa.

Espécie	Nº de árvores	Idade (anos)	$\Phi$ médio DAP** (cm)	Nº de toras	Nº de vigas
<i>Eucalyptus grandis</i> *	5	34	54	15	255
<i>Eucalyptus grandis</i>	2	10	29	6	22
<i>Corymbia citriodora</i>	2	8	24	6	15
<i>Eucalyptus pellita</i>	2	26	42	6	55
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	5	24	36	26	-
<i>Eucalyptus maculata</i>	4	24	48	27	-
<i>Eucalyptus resinifera</i>	5	24	41	23	-
<i>Pinus pinaster</i>	3	40	42	6	15
<i>Pinus elliottii</i> *	12	8 a 23	26	28	90
TOTAL	40	-	-	143	452

\* Espécies que também fizeram parte da amostragem na Pesquisa de Mestrado.

\*\* Diâmetro na Altura do Peito.

Como o material proveniente das árvores de *Eucalyptus grandis* de 34 anos e das árvores de *Pinus elliottii* fizeram parte da amostragem da Pesquisa de Mestrado, os ensaios para obtenção das velocidades nas árvores, nas toras e nas vigas foram realizados somente com equipamento de ultrassom (USLab, AGRICEF, Brasil).

Para as espécies de *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus resinifera*, os ensaios nas árvores e nas toras também foram realizados somente com equipamento de ultrassom. Além disso, foi possível fazer os ensaios não destrutivos somente nas árvores e nas toras, pois essas espécies também faziam parte da amostragem da pesquisa de Doutorado de uma pesquisadora da ESALQ/USP e as toras não foram desdobradas em vigas.

Os ensaios com os equipamentos de ondas de tensão (Fibre-gen, ST300, Nova Zelândia) nas árvores e de vibração (Fibre-gen, HM200, Nova Zelândia) nas toras foram realizados nas espécies de *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus grandis* (10 anos), *Eucalyptus pellita* e *Pinus pinaster*. O ensaio com equipamento de vibração nas vigas foi realizado somente para a espécie de *Pinus pinaster*.

### 3.2 Ensaios nas Árvores

Todas as árvores foram ensaiadas por ultrassom (AGRICEF, USLab, Brasil) utilizando equipamento apresentado na Figura 3.1a e transdutores de faces exponenciais de 45 kHz de frequência (Figura 3.1b).

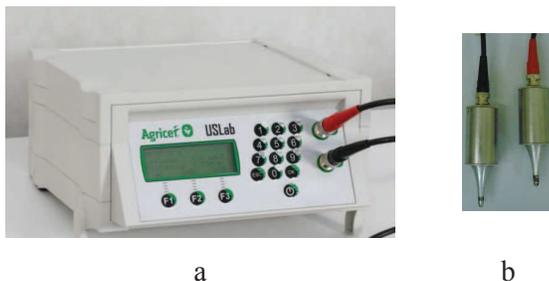


Figura 3.1. Equipamento de ultrassom (USLab) (a) e transdutores de faces exponenciais de 45 kHz de frequência (b).

Em todos os ensaios nas árvores a zona que continha o comprimento de percurso da onda passava pela altura do peito (cerca de 1,3 m de altura do solo). A distância vertical entre transdutores foi de aproximadamente 0,70 m. Para que o contato entre o transdutor e o tronco se desse de forma adequada, foram feitos pequenos furos nos pontos de medição, utilizando-se furadeira. Os transdutores foram inseridos no orifício de forma inclinada (aproximadamente 45°) favorecendo o percurso da onda na direção longitudinal (Figura 3.2). O ensaio nas árvores foi realizado em quatro faces ao redor do diâmetro, sendo que, para o tempo de percurso da onda de ultrassom, adotou-se a média dos valores de tempo obtidos nos ensaios na árvore.



Figura 3.2. Ensaio de ultrassom na árvore.

A partir do ensaio de ultrassom se obteve o tempo de propagação de onda ( $t$ ) e assim foi possível calcular a velocidade de propagação das ondas de ultrassom utilizando-se a Equação 3.1.

$$V = \frac{L}{t} \times 10^6 \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde  $V$  é velocidade de propagação da onda em uma determinada direção ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $L$  é o comprimento de percurso da onda (m) e  $t$  é o tempo de propagação da onda em uma determinada direção ( $\mu\text{s}$ ).

As árvores das espécies *Eucalyptus grandis* (10 anos), *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita* e *Pinus pinaster*, também foram ensaiadas com equipamento de ondas de tensão (FIBRE-GEN, Hitman ST300, Nova Zelândia - Figura 3.3) para obtenção da velocidade de percurso da onda no material.



Figura 3.3. Equipamento de onda de tensão (ST300). Fonte: <http://www.fibre-gen.com>

Os transdutores foram posicionados nos mesmos pontos utilizados para a realização do ensaio de ultrassom (Figura 3.4).



Figura 3.4. Ensaio nas árvores utilizando equipamento de ondas de tensão (ST300).

Após os ensaios de ultrassom e de ondas de tensão, as árvores foram derrubadas e de cada uma delas foram retiradas toras com 2,0 m ou 3,5 m de comprimento.

### 3.3 Retirada das Toras

Para as árvores de *Eucalyptus grandis* (10 e 34 anos), *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita*, foram utilizadas 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 3.5a).

No caso das árvores de *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus resinifera* a retirada das toras, com 3,5 m de comprimento, foi realizada de forma consecutiva a partir da base do troco, sendo que o número de toras retiradas de cada árvore era limitada ao diâmetro mínimo da tora de aproximadamente 0,15 m. Dessa forma, de cada árvore foram obtidas de 4 a 6 toras.

Para o *Pinus elliottii* foram retiradas, de forma consecutiva, de uma a três toras de 3,5 m (Figura 3.5b). O número de toras obtidas de cada árvore dependeu de seu diâmetro, 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(1997) que propõe que peças estruturais principais tenham área mínima de 0,005 m<sup>2</sup> e dimensão mínima da seção transversal de 0,05 m.

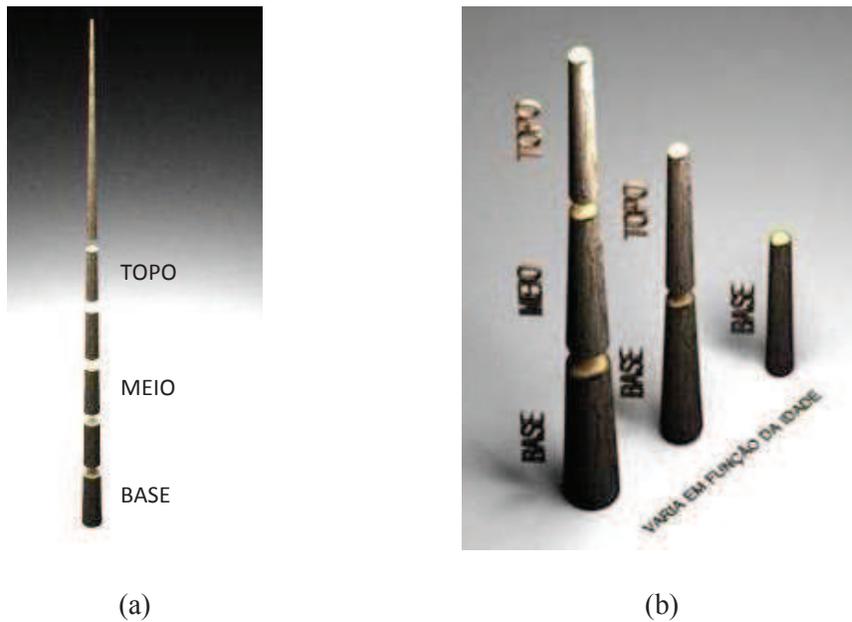


Figura 3.5. Representação da retirada das toras de *Eucalyptus grandis* (10 e 34 anos), *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita* (a) e da retirada das toras de *Pinus eliottii* (b). Fonte: Massak, 2010.

As 3 árvores de *Pinus pinaster* selecionadas foram abatidas e de cada uma delas foram retiradas 2 toras, uma da base da árvore com 2,0 m, e outra, sequencial a esta, com 3,5 m de comprimento. As toras foram transportadas para a Serraria Exfopino (La Coruña/Espanha) para a continuidade dos ensaios.

Todas as toras foram identificadas de acordo com a árvore de procedência e com a posição de retirada no tronco (base - B, meio - M e topo - T ou numeradas sequencialmente a partir da base).

### 3.4 Ensaios Não Destrutivos Longitudinal nas Toras

As toras de *Eucalyptus grandis* (10 anos), de *Corymbia citriodora*, de *Eucalyptus pellita* e de *Pinus pinaster* foram ensaiadas longitudinalmente tanto por ultrassom quanto por vibração (Figura 3.6 a e b) e as toras das demais espécies foram ensaiadas longitudinalmente apenas por ultrassom (Figura 3.6a).

Para os ensaios de vibração nas toras foi utilizado o equipamento HM200 (Figura 3.6b)



Figura 3.6. Ensaios longitudinais nas toras, nos pontos próximo à casca (C), próximo à medula (M) e um ponto intermediário (I) à esses dois pontos, utilizando o ultrassom (a) e o equipamento de vibração (b).

Os ensaios de ultrassom nas toras foram realizados na direção longitudinal e de forma direta (ondas de compressão), ou seja, com os transdutores posicionados nas extremidades. Para que se tivesse uma avaliação global da tora as medições foram realizadas em 3 diferentes pontos da seção transversal da tora, sendo um deles posicionado mais próximo à casca (C), outro próximo a medula (M) e o terceiro em um ponto intermediário (I) à esses dois pontos (Figura 3.6a). De posse do comprimento da tora ( $L$ ) e do tempo de propagação da onda ( $t$ ) foi calculada a velocidade de propagação utilizando-se a Equação 3.1, sendo a média dos 3 pontos de medição na seção transversal a velocidade adotada para a análise dos resultados.

O ensaio de vibração foi realizado 3 vezes em uma das seções transversais de cada tora e para a análise dos resultados foi utilizado a velocidade média calculada utilizado as três repetições.

### 3.5 Ensaios não Destrutivos Superficial nas Toras

As toras de *Eucalyptus grandis* (10 anos), de *Corymbia citriodora*, de *Eucalyptus pellita* e de *Pinus pinaster* também passaram por ensaios superficiais com o equipamento de ondas de

tensão (Figura 3.7) e com o ultrassom (Figura 3.8). Esse ensaio foi realizado com o intuito de simular, na tora, o ensaio realizado nas árvores.



Figura 3.7. Ensaio de propagação de onda superficial na tora utilizando o equipamento de ondas de tensão.



Figura 3.8. Ensaio de propagação de onda superficial na tora utilizando o ultrassom.

Para esses ensaios os equipamentos foram dispostos, aproximadamente na metade do tronco e a uma distância de 0,70 m entre os transdutores transmissor e receptor, assim como adotado para os ensaios realizados nas árvores.

Os resultados desses ensaios foram comparados com os ensaios realizados com os mesmos equipamentos nas árvores, a fim de avaliar a diferença de velocidade existente entre a árvore e a tora recém abatida, ocasionada pelo estado de tensões existente na árvore.

### 3.6 Ensaios de Dispersão das Ondas nas Toras

Após a realização dos ensaios descritos no item 3.6, selecionaram-se 12 toras dentre as espécies de *Eucalyptus grandis* (10 anos), de *Corymbia citriodora* e de *Eucalyptus pellita* e 3 toras de *Pinus pinaster*, para a realização da avaliação da dispersão da propagação da onda no tronco da árvore.

Antes de iniciar os ensaios de ultrassom foi feita malha de 0,03 m x 0,03 m em uma das seções transversais da tora e, assim, foram definidos os pontos de leitura de tempo de percurso da onda pelo transdutor receptor (Figura 3.9). Nos pontos de leitura de tempo foram feitos pequenos furos de 5 mm de diâmetro e profundidade necessária para a inserção da ponta do transdutor exponencial (Figura 3.9).

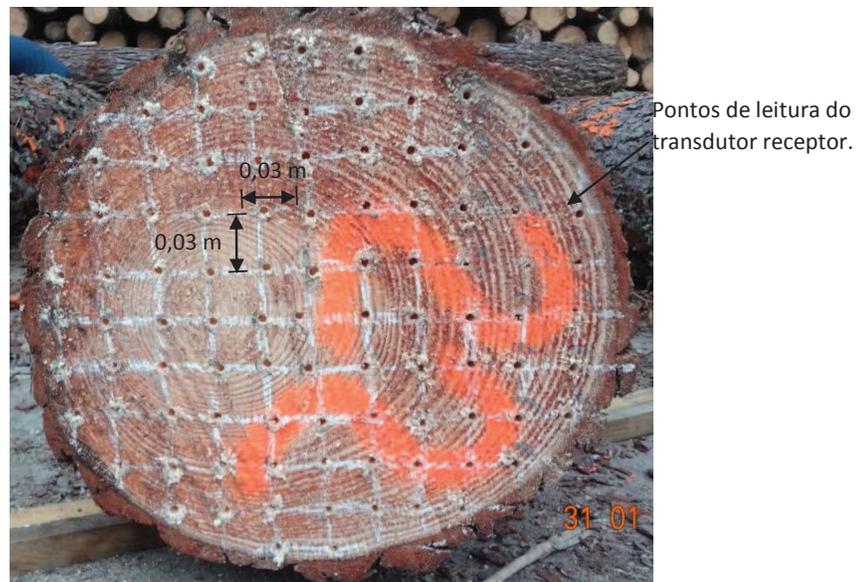


Figura 3.9. Definição da malha e dos pontos de leitura de tempo pelo transdutor receptor na face da tora para os ensaios de dispersão das ondas.

O ensaio de ultrassom foi realizado com o transdutor emissor colocado a  $45^\circ$  em relação à superfície da tora e distante 0,7 m da seção transversal que continha a malha. O transdutor receptor foi utilizado para captar os tempos de propagação das ondas em diferentes pontos da malha na seção transversal da tora (Figura 3.10).



Figura 3.10. Representação do ensaio de dispersão da onda utilizando equipamento de ultrassom.

A distância de 0,7 m entre o transdutor emissor e os pontos de leitura na seção transversal da tora foi adotada por ser a distância utilizada nos ensaios não destrutivos nas árvores vivas.

Os valores das velocidades longitudinais médias, determinadas nas medições diretas nas toras logo após o corte da árvore, bem como das velocidades médias, obtidas nas medições indiretas realizadas nas árvores vivas, foram utilizadas como parâmetros de comparação.

Após os ensaios de ultrassom obteve-se, por meio do programa computacional AutoCad (AutoCad 2007, Autodesk, Inc.), o comprimento de percurso da onda ( $L$ ), que corresponde a distância de cada ponto de leitura de tempo na seção transversal até o ponto de fixação do transdutor emissor. Com os dados de tempo de propagação ( $t$ ) e de comprimento de percurso ( $L$ ) foram calculadas, por meio da Equação 3.1, as velocidades de propagação de onda para cada ponto da seção transversal da tora.

Com os dados de velocidade utilizou-se o software ArcGIS (ArqGIS 10, Esri) para a geração das imagens representativas da dispersão das ondas na seção transversal das toras no ensaio indireto (superficial).

### 3.7 Retirada das Vigas

Para o *Pinus elliotti* e todas as espécies de eucalipto as toras foram desdobradas 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 3.11).

Para o *Pinus pinaster* somente as 3 toras que continham 3,5 m de comprimento foram desdobradas em vigas com seção de 0,05 m x 0,10 m.

Em virtude do processo de desdobro e da dimensão das peças as vigas não foram identificadas segundo a posição de retirada na seção transversal da tora. Cada viga recebeu a identificação correspondente ao número da árvore, à posição de retirada da tora ao longo do tronco e à ordem de retirada na tora.



Figura 3.11. Esquema de retirada das vigas de uma tora (Fonte: Massak, 2010).

### 3.8 Ensaios de Propagação de Ondas e de Flexão Estática nas Vigas

Todas as vigas foram ensaiadas longitudinalmente e de forma direta (ondas de compressão) por equipamento de ultrassom na condição saturada e somente as vigas de *Pinus pinaster* foram ensaiadas, também na condição saturada, por vibração longitudinal.

As vigas, ainda na condição saturada, foram pesadas em balança universal (MARTE, modelo AS5500 C), assim como foram tomadas as dimensões da seção transversal e o comprimento de cada viga para a determinação da densidade da madeira ( $\rho$ ) nessa condição de umidade.

As medições de tempo de propagação das ondas foram realizadas utilizando-se transdutores de faces planas de 45 kHz (Figura 3.12a). 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 3.12b). Para o acoplamento dos transdutores com o material (madeira) foi utilizado gel medicinal.

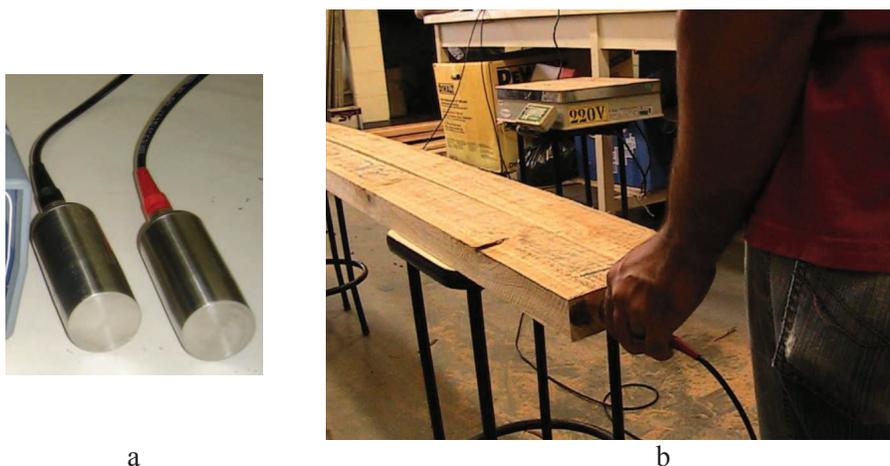


Figura 3.12. Transdutores de faces planas de 45 kHz de frequência (a) e medições de ultrassom na seção transversal da viga (b).

Com o tempo de propagação das ondas de ultrassom a velocidade na viga, na direção longitudinal ( $V_v$ ), foi determinada em cada ponto de medição utilizando-se a Equação 3.1.

De acordo com a NBR 15521/2007, após a determinação da velocidade ( $V_v$ ) nos diferentes pontos da seção transversal, o valor de  $V_v$  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.

O ensaio de vibração longitudinal nas vigas (Figura 3.13) foi realizando três vezes em cada viga (repetições) utilizando equipamento HM200 (FIBRE-GEN, Hitman HM200, Nova

Zelândia). A velocidade utilizada nas avaliações foi a média das três repetições. Para o ensaio de vibração nas vigas com o equipamento Hitman é importante que as mesmas estejam bi- apoiadas, suspensas do contato com o solo, eliminando dessa forma a interferência na vibração da madeira.



Figura 3.13. Ensaio de vibração longitudinal nas vigas de *Pinus pinaster*.

Todas as vigas passaram então por secagem em câmara com controle de umidade relativa e de temperatura, até atingirem umidade em torno de 12% - umidade de referência da NBR 7190/97. As vigas foram então ensaiadas em 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 foram realizados de acordo com a ASTM D198-08 (2008), uma vez que a norma brasileira NBR 7190/1997 não propõe ensaios em peças estruturais.

Os ensaios de flexão estática nas vigas foram realizados em pórtico com atuador hidráulico (Figura 3.14) com capacidade de carga de 500 kN, movimentado por servo válvula. As cargas e os deslocamentos verticais no ponto central da viga foram obtidos utilizando sistema de aquisição de dados (Quantun, HBM, Alemanha) com 8 canais, no qual a célula de carga e o transdutor de posição linear eletrônico (0,001 mm de resolução) foram acoplados, permitindo leitura automatizada durante o ensaio.



Figura 3.14. Pórtico com atuador hidráulico para ensaio de estruturas.

De acordo com a ASTM D198-08 (2008) o ensaio em vigas estruturais pode ser realizado com aplicação de carga no centro (Figura 3.15) desde que a seção transversal e o vão não sejam muito grandes. A definição da magnitude encontra-se no Apêndice X5.1.1 da ASTM D198-08 (2008), indicando que para que neste tipo de ensaio (carga centrada), para que 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, o ensaio com carga centrada pôde ser realizado sem prejuízo para os resultados, respeitou-se a relação mínima  $L/h$  de 21 indicado pela norma brasileira (NBR 7190, 1997) para ensaios de corpos de prova em flexão.



Figura 3.15. Esquema do ensaio de flexão na viga bi apoiada e com aplicação da carga centrada.

O  $f_m$  e  $E_M$  foram calculados também de acordo com a ASTM D198-08 (2008), denominados por MOR e MOE, respectivamente, na referida norma. Nesta norma o  $f_m$  é calculado utilizando o momento máximo, o qual é obtido com a máxima carga ( $P_{max}$ ) absorvida pela viga. O  $f_m$  foi determinado utilizando a Equação 3.2.

$$f_m = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde L é vão livre (distância entre os apoios); b é largura da viga e h é altura da viga.

O  $E_M$  foi determinado utilizando-se o trecho linear do gráfico carga x deslocamento vertical (Equação 3.3). 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  $P_{max}$ .

$$E_M = \frac{(P_{40\%} - P_{20\%})L^3}{4bh^3(\Delta_{40\%} - \Delta_{20\%})} \quad \text{Equação 3.3}$$

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  $P_{40\%}$ ;  $L$  é o vão livre;  $b$  é a largura da viga e  $h$  é altura da viga.

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.

### **3.9 Acustoelasticidade da Madeira Determinada em Ensaios de Flexão Estática**

O tipo de propagação de onda que ocorre durante a medição indireta na árvore pode sofrer influência do estado de tensões ao qual a árvore está submetida, sendo esse fato uma das hipóteses para que a velocidade na árvore tenha valor diferente da velocidade na tora recém abatida. Para avaliar esta influência foi realizado o ensaio de acustoelasticidade.

Para os ensaios foram utilizadas 18 vigas de seção estrutural de 0,05 m x 0,10 m e 2,5 m de comprimento, de 3 espécies de eucalipto - *Eucalyptus grandis* (10 anos), *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita*. As vigas foram ensaiadas após o processo de secagem, com cerca de 12% de umidade.

O estudo do comportamento acustoelástico para a madeira de eucalipto, que compôs a amostragem desta pesquisa nos ensaios nas árvores, toras e vigas, teve como objetivo verificar se este parâmetro (estado de tensões) poderia ser incorporado no modelo de correlação da velocidade na árvore e na tora e da velocidade na árvore e na viga.

Os ensaios foram realizados utilizando ultrassom com transdutores longitudinais de faces exponenciais de 45 kHz de frequência. As medições foram realizadas durante o carregamento da viga.

Primeiramente cada viga foi lixada de ambos os lados em posições estabelecidas (na metade do comprimento), deixando a superfície mais lisa para a colagem dos extensômetros elétricos de resistência (*strain gages* - KFG-5-120-C1-11, KYOWA, Japão) de dimensão de 5 mm, com fator de gage 2.10 +/-1.0% e resistência de gage de 119.8 +/-0.2  $\Omega$ . Logo após a etapa do lixamento os *strain gages* foram colados nas direções de leitura dos tempos de propagação das ondas de

ultrassom. O posicionamento dos extensômetros na seção transversal da viga foi realizado de forma a abranger pontos da zona tracionada e comprimida (Figura 3.16).

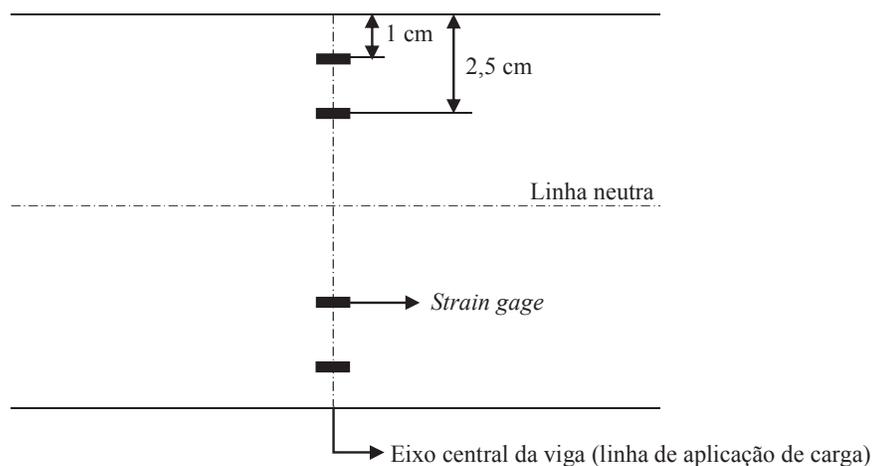


Figura 3.16. Representação do posicionamento dos *gages* nos pontos da zona tracionada e comprimida na região central da viga.

Com os extensômetros colados à madeira iniciou-se a etapa de soldagem dos cabos. Cada *strain gage* conta com dois fios, e cada um desses fios teve que ser soldado a um cabo que, por sua vez, é acoplado ao sistema de aquisição de dados (Figura 3.17). Em cada viga foram colados 8 *strain gages*, quatro em cada face paralela (altura da viga), sendo dois na parte superior (zona comprimida) e dois na parte inferior (zona tracionada) (Figura 3.17).

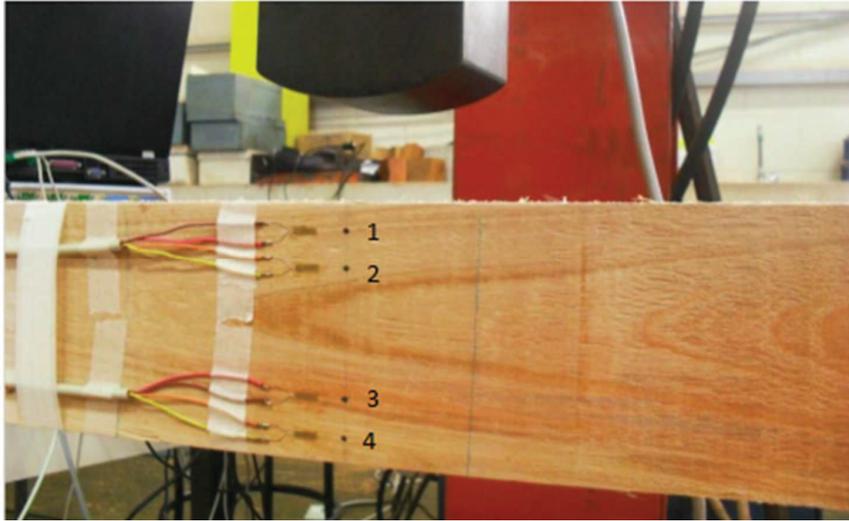


Figura 3.17. Montagem dos *gages* com o cabeamento.

Primeiramente as vigas passaram por medições de tempo de propagação das ondas na condição descarregada, para a obtenção da velocidade inicial ( $V_0$ ).

A aplicação do carregamento nas vigas foi realizada utilizando pórtico com acionamento hidráulico. Para os ensaios o esquema estático utilizado foi de viga bi-apoiada com carga centrada e distância mínima entre os apoios de 21 vezes a altura, assim como foi realizado o ensaio de flexão descrito no item 3.8.

Durante o carregamento da primeira viga foram sendo realizadas leituras de tempo de propagação das ondas de ultrassom na direção paralela às fibras (Figura 3.18), em ensaio direto (transdutores posicionados em faces paralelas). As medições na direção longitudinal foram realizadas considerando o posicionamento dos *gages* (Figura 3.17).

Para o ensaio com o transdutor de faces exponenciais foi feito um pequeno orifício para inserção do transdutor (Figura 3.19).



Figura 3.18. Ensaio de ultrassom realizado na direção paralela à fibra durante o carregamento da viga.



Figura 3.19. Furação na seção transversal da viga para inserção dos transdutores de faces exponenciais durante o ensaio de ultrassom na direção paralela às fibras.

Em resumo, os ensaios seguiram o seguinte roteiro:

1. A viga foi posicionada de maneira correta nos apoios, com o pistão de aplicação de carga no centro e os apoios distanciados de 21 vezes a altura.
2. As primeiras leituras de tempo, nas 4 posições marcadas na altura (2 na borda comprimida e 2 na borda tracionada), foram realizadas com equipamento de ultrassom na direção paralela na condição da viga descarregada.
3. Em seguida iniciou-se o carregamento da viga. Em função de ensaios preliminares o valor esperado para a ruptura da viga era conhecido. Assim, foram calculados intervalos de tensão de

forma a ser possível a obtenção de cerca de 7 leituras dentro da faixa de tensão correspondente ao trecho elástico. A cada intervalo de tensão a aplicação da carga era interrompida e, rapidamente, as leituras de ultrassom eram realizadas nas quatro posições (paralelo às fibras).

4. Depois de atingida tensão aproximada a esperada para o trecho elástico as leituras de ultrassom eram interrompidas e o carregamento era aplicado na viga até a ruptura. O valor da ruptura da viga permitiu verificar se os pontos mensurados estavam dentro do trecho elástico (aproximadamente entre 10% e 40% da tensão de ruptura).

As tensões teóricas ( $\sigma$ ) esperadas para cada um dos pontos nas quais os extensômetros foram colados (Figura 3.16) foram determinadas utilizando-se as Equações 3.4 e 3.5.

$$M = \frac{P L}{4} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde M é o momento considerando o esquema estático bi-apoiado e carga centrada, P é a carga aplicada e L é o vão livre.

$$\sigma = \frac{M}{I} y \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde  $\sigma$  é a tensão teórica na viga, I é o momento de inércia e y é a distância do ponto onde se deseja determinar a tensão e o centro de gravidade da peça.

Durante o ensaio de flexão a instrumentação com extensômetros permitiu a obtenção das deformações longitudinais específicas ( $\epsilon$ ) das vigas nos 4 pontos de medição (Figura 3.17). O ensaio também permitiu o cálculo do módulo de elasticidade ( $E_M$ ) das vigas por meio da obtenção do deslocamento vertical (flecha) sofrido pela viga durante o carregamento. De posse destes valores foi possível obter-se, para cada zona de medição, a tensão atuante (Equação 3.6), neste trabalho denominada de tensão experimental ( $\sigma'$ ).

$$\sigma' = E_M \epsilon \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde  $\sigma'$  é a tensão experimental,  $\epsilon$  é a deformação longitudinal específica e  $E_M$  é o módulo de elasticidade.

### 3.10 Determinação das Constantes Elásticas por Ultrassom

O tipo de propagação de onda que ocorre durante a medição indireta na árvore pode sofrer influência do coeficiente de Poisson, o que torna seu conhecimento importante para as espécies avaliadas nessa pesquisa. Tendo em vista que outros resultados do grupo de pesquisa demonstraram que é possível a determinação de todos os parâmetros elásticos da madeira utilizando o ensaio de propagação de ondas de ultrassom, e que essa determinação é menos onerosa e exige menos material para a preparação de corpos de prova para o ensaio, o ultrassom foi escolhido como técnica de caracterização.

Para esses ensaios foram utilizados 7 poliedros de 26 faces de *Pinus pinaster* e 12 poliedros das três espécies de eucalipto (*Eucalyptus grandis* – 10 anos, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita*). Os ensaios foram realizados com os corpos de prova na umidade de equilíbrio (12%).

Para a determinação da matriz de rigidez foi utilizado equipamento de ultrassom (EPOCH 4, Panametrics, EUA) e transdutores de ondas longitudinais e de ondas transversais, ambos de faces planas e com frequência de 1000 kHz.

Os corpos de prova no formato de poliedros (Figura 3.20) foram obtidos de cubos de 70 mm de arestas, orientadas segundo os eixos L, R e T. A dimensão do cubo foi adotada em função do diâmetro do transdutor, o qual deve estar circunscrito à face final do poliedro.

Tanto a confecção dos poliedros quanto os ensaios para a caracterização das três espécies de eucalipto foram realizadas no Laboratório da FEAGRI/UNICAMP. Já a confecção dos poliedros e os ensaios de caracterização do *Pinus pinaster* foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Santiago de Compostela, durante o estágio no exterior.

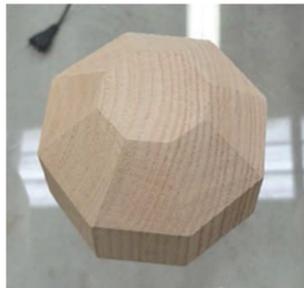


Figura 3.20. Poliedro de 26 faces utilizado no ensaio de ultrassom para a caracterização da madeira.

Para o cálculo das velocidades longitudinais ( $V_{LL}$ ,  $V_{RR}$  e  $V_{TT}$ ) se determinou o comprimento de percurso da onda e, com o uso do transdutor longitudinal, o tempo de propagação da onda nas direções L, R e T, respectivamente (Figura 3.21). Considerando as mesmas direções, mas com o uso do transdutor de cisalhamento, as velocidades transversais ( $V_{LR}$ ,  $V_{LT}$ ,  $V_{RL}$ ,  $V_{RT}$ ,  $V_{TR}$  e  $V_{TL}$ ) foram calculadas. Para a determinação das velocidades correspondentes à propagação da onda fora dos eixos de simetria o tempo de propagação da onda foi tomado nas faces que representam eixos inclinados de  $45^\circ$  em relação a cada plano.

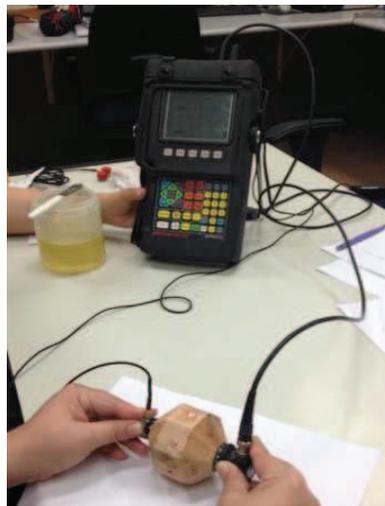


Figura 3.21. Posicionamento dos transdutores no poliedro durante ensaio de ultrassom.

De posse das velocidades se determinou os coeficientes da matriz de rigidez [C] utilizando-se as equações de Christoffel. Essa matriz [C] foi invertida utilizando-se métodos matemáticos e, com essa inversão, foi determinada a matriz de flexibilidade [S] que contém todos os parâmetros elásticos que se desejava obter.

### 3.11 Caracterização da Madeira de *Pinus pinaster* por Ensaio Destrutivo

No âmbito desse projeto foi realizado ensaios em corpos de prova de compressão paralela às fibras para posterior comparação desses resultados com os obtidos através dos ensaios realizados nos 7 poliedros de *Pinus pinaster*.

Considerando que não foi possível a retirada dos corpos de prova em todas as direções necessárias para a caracterização completa do material utilizando ensaio estático, optou-se pela comparação, com os parâmetros calculados a partir do ensaio de ultrassom nos poliedros, apenas daqueles possíveis de serem determinados pelo ensaio de compressão paralela às fibras.

Como a madeira caracterizada a partir do ensaio de compressão não era proveniente das árvores ensaiadas por ultrassom, utilizadas nessa pesquisa, não foi possível utilizar os resultados obtidos desse ensaio nos modelos de ajuste da velocidade na árvore. Porém, o resultado do coeficiente de Poisson obtido pelo ensaio de compressão foi utilizado na Equação 2.2 proposta por Meyers (1994) com o intuito de minimizar as diferenças de velocidade entre a árvore e a tora.

Para os ensaios de compressão paralela às fibras foram utilizados 10 corpos de prova de 20 mm x 20 mm e comprimento de 60 mm, na umidade de equilíbrio (12%), retirados de 4 distintas árvores de *Pinus pinaster*.

Segundo a NBR 7190 (1997) os ensaios de compressão paralela devem ser feitos em corpos de prova de seção transversal quadrada de 50 mm x 50 mm e comprimento de 150 mm, porém segundo Trinca (2011), é possível empregar corpos de prova de seção transversal inferiores às propostas pela Norma, desde que seja respeitada a proporção de comprimento igual a 3 vezes a aresta.

Como já mencionado anteriormente (Revisão Bibliográfica), para a obtenção de todos os termos da matriz de flexibilidade utilizando ensaio de compressão estática, é necessária a utilização de três corpos de prova prismáticos retirados (comprimento, ou direção do carregamento) nos eixos de simetria e outros três corpos de prova prismáticos retirados em ângulo em relação aos três planos de simetria elástica. Porém, a amostragem para esse projeto ficou limitada ao material trazido da Espanha (10 corpos de prova retirados com o comprimento no sentido longitudinal). Assim, foi utilizada a metodologia proposta por Mascia (1991) e Furlani (1995), e utilizada por Trinca (2011), para a determinação de alguns dos parâmetros da matriz de flexibilidade utilizando ensaio de compressão paralela às fibras.

Primeiramente foram tomadas as dimensões com paquímetro digital (MITUTOYO, Digimatic Caliper) e foi realizada a pesagem em balança universal (MARTE, modelo AS5500 C) para determinação da massa e, assim obter, através de cálculos, o volume e a densidade de cada corpo de prova de compressão.

Os ensaios de compressão paralela foram realizados em máquina universal de ensaios (DL 30000, EMIC, Brasil). As deformações durante o ensaio foram obtidas por meio de extensômetros elétricos de resistência (KFG-5-120-C1-11, KYOWA, Japão) de dimensão de 5 mm, com fator de gage 2.10 +/-1.0% e resistência de gage de 119.8 +/-0.2  $\Omega$ .

Cada corpo de prova foi instrumentado com 6 extensômetros, sendo 2 extensômetros em faces paralelas para as leituras de deformação em cada uma das direções (longitudinal, radial e tangencial). Os extensômetros foram colados de duas formas distintas nos lados dos corpos de prova de compressão (Figura 3.22 a e b). Cinco dos corpos de prova tiveram os extensômetros para a leitura da deformação radial colados de forma isolada em dois lados opostos, perpendiculares à direção longitudinal (de carregamento), enquanto nos outros dois lados foram dispostos 2 extensômetros para a leitura da deformação tangencial, perpendicular à direção longitudinal, juntamente com os extensômetros para a leitura da deformação longitudinal. Nos outros cinco corpos de prova os extensômetros para leituras radiais foram coladas nas mesmas faces dos extensômetros para leituras longitudinais enquanto os extensômetros para a obtenção das deformações tangenciais foram dispostos isolados nas outras duas faces opostas. Os terminais dos extensômetros foram soldados aos terminais dos cabos de aquisição de dados.

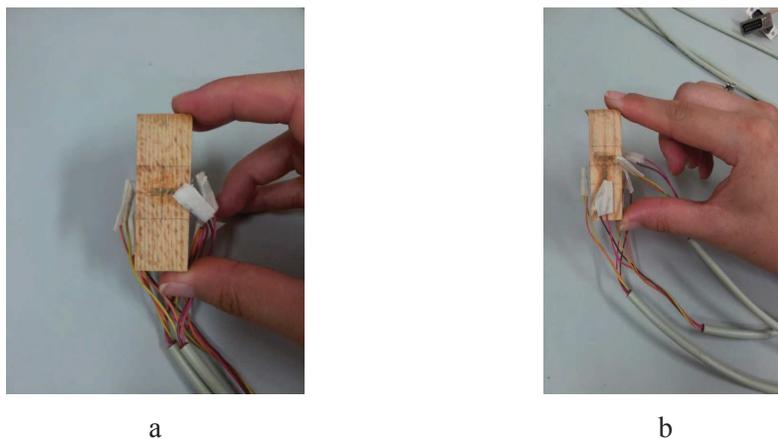


Figura 3.22. Disposição dos extensômetros para a obtenção das deformações nas três direções – radial (a) e longitudinal e tangencial (b) nos corpos de prova de compressão.

Aplicando-se o carregamento na direção longitudinal (L) obteve-se a tensão na direção longitudinal ( $\sigma_L$ ) e foram medidas as deformações específicas nas direções longitudinal ( $\epsilon_L$ ), radial

( $\epsilon_R$ ) e tangencial ( $\epsilon_T$ ) (Figura 3.23). Assim, de cada corpo de prova, foi calculado o módulo de elasticidade na direção longitudinal ( $E_L$  – Equação 3.7) e os coeficientes de Poisson  $\nu_{LT}$  e  $\nu_{LR}$  (Equações 3.8 e 3.9, respectivamente).

$$E_L = \sigma_L / \epsilon_L \quad \text{Equação 3.7}$$

$$\nu_{LT} = \epsilon_T / \epsilon_L \quad \text{Equação 3.8}$$

$$\nu_{LR} = \epsilon_R / \epsilon_L \quad \text{Equação 3.9}$$

Os valores calculados a partir das Equações 3.7, 3.8 e 3.9 (módulo de elasticidade na direção longitudinal -  $E_L$  e os coeficientes de Poisson -  $\nu_{LT}$  e  $\nu_{LR}$ ) foram utilizados na comparação com os parâmetros da caracterização do *Pinus pinaster* determinados pela matriz de flexibilidade obtida através do ensaio de ultrassom em poliedros de 26 faces.

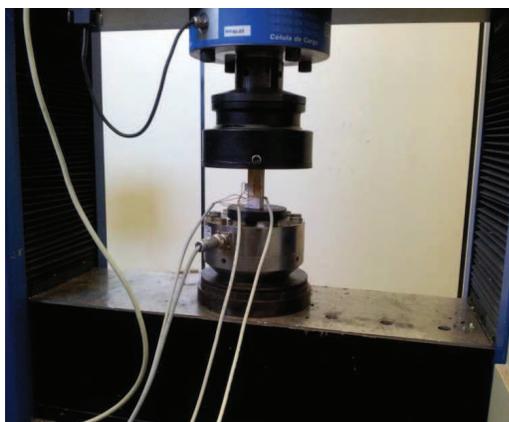


Figura 3.23. Ensaio de compressão instrumentada paralela às fibras.

### 3.12 Análise dos Dados

Antes de iniciar qualquer avaliação estatística com os dados provenientes dos ensaios não destrutivos nas árvores, nas toras e nas vigas, ou destrutivos nas vigas, foi verificada a normalidade dos dados. Essa avaliação foi importante para a validação dos testes estatísticos 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. Os resultados indicaram que todos os parâmetros avaliados podem ser considerados como tendo distribuição normal.

Para as análises estatísticas de comparação das velocidades na árvore e na tora, na árvore e na viga e na tora e na viga, foi utilizado o intervalo de confiança da diferença entre as médias, no qual as velocidades são consideradas iguais (com 95% de nível de confiança) se o zero pertencer ao intervalo, e o teste t, que não rejeita a hipótese de igualdade de médias (com 95% de nível de confiança) quando P-valor é maior que 0,05.

A significância das regressões simples geradas 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.

Nas análises dos modelos multivariados utilizou-se o P-valor para determinar a significância estatística de cada parâmetro na regressão, assim como a significância estatística (ajuste) do modelo gerado, sempre com 95% de nível de confiança.

Quando foi realizada comparação ou regressão entre a velocidade na árvore com as velocidades nas toras, com as velocidades nas vigas ou com as propriedades de resistência e de rigidez obtidas dos ensaios de flexão estática nas vigas, foi considerado a média desses parâmetros, por árvore.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Velocidade na árvore, na Tora e na Viga Saturada Considerando os Diferentes Equipamentos de Propagação de Ondas

As velocidades de ultrassom nas árvores de eucalipto foram superiores às velocidades obtidas nas toras e nas vigas e a velocidade nas toras apresentaram valores de velocidade inferiores às velocidades nas vigas da mesma espécie (Figura 4.1). Para as ondas de ultrassom se propagando no *Pinus elliottii*, a velocidade na viga foi superior à velocidade na árvore e esta foi inferior que a velocidade na tora, enquanto para o *Pinus pinaster* a velocidade na árvore foi superior às velocidades na tora e na viga e estas duas últimas apresentaram valores muito próximos entre si (Figura 4.1). Para as ondas de tensão (ST300) e de vibração (HM200) a velocidade na árvore foi superior à velocidade na tora e na viga, enquanto que as velocidades na tora e na viga, para o *Pinus pinaster*, se apresentaram muito próximas (Figura 4.2).

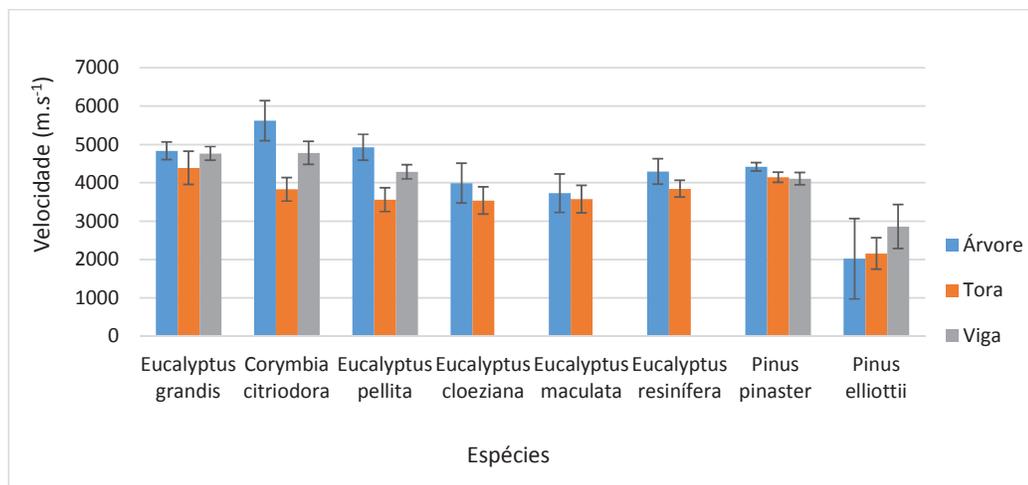


Figura 4.1. Velocidades médias e desvio padrão, por espécie, obtidas em ensaios de ultrassom na árvore, na tora e na viga.

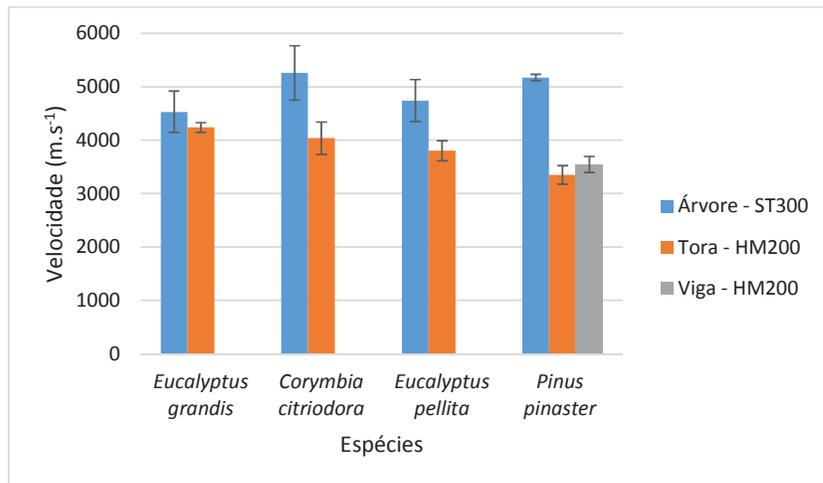


Figura 4.2. Velocidade obtida em ensaios de ondas de tensão na árvore (ST 300) e velocidade obtida em ensaios de vibração (HM 200) na tora e na viga, nas espécies de eucaliptos e de *Pinus pinaster*.

Da mesma forma que na pesquisa realizada por Wang *et al.* (2007b), utilizando medições acústicas na árvore para 5 espécies (*Picea sitchensis*, *Tsuga heterophylla*, *Pinus banksiana*, *Pinus ponderosa*, *Pinus radiata*), na maioria dos casos a velocidade na árvore foi superior do que a velocidade na tora. O mesmo resultado foi também apresentado por Chauhan e Walker (2006), que obtiveram resultados médios de velocidade nas árvores 13% superiores as obtidas nas toras.

Para o ultrassom as análises estatísticas (Tabela 4.1) indicaram que, para o pinus não houve diferença entre os resultados de velocidade na árvore, na tora e na viga. É provável que, no caso dessa espécie, a grande variabilidade das velocidades obtidas nas árvores (CV = 54%) e nas toras (CV = 35%) tenha interferido no resultado de comparação de médias. Essa variabilidade foi decorrente das diferentes idades de árvores envolvida na amostragem do pinus. Uma outra questão que pode ter influenciado o resultado é a maior quantidade de nós que essa espécie apresenta. Chauhan e Walker (2006) comentam que, para árvores que possuíam nós de grandes dimensões, provocados pelo nascimento de galhos na região da altura do peito, os valores de velocidade foram baixos, fazendo com que houvesse inversão da tendência obtida em outras espécies e trabalhos, e a velocidade média na árvore fosse inferior à velocidade média na tora.

Para as ondas de tensão (ST300 - Hitman) e vibração (HM200 - Hitman), utilizadas nos ensaios das árvores e vigas, respectivamente, as velocidades foram mais homogêneas (menores

coeficientes de variação) para o pinus porque os ensaios com esses equipamentos só foram realizados na espécie de *Pinus pinaster*, as quais não apresentavam variação de idade e possuíam menor número de nós (Tabela 4.1). Os resultados para esses ensaios apresentaram diferença, estatisticamente significativa entre a velocidade na árvore (Va) e na tora (Vt) e a velocidade na árvore (Va) e na viga (Vv), mas não apresentaram diferença entre a velocidade na tora (Vt) e a velocidade na viga (Vv) (Tabela 4.1).

Para o eucalipto as velocidades na árvore (Va) e na tora (Vt) foram estatisticamente diferentes tanto para o ultrassom quanto para os equipamentos de ondas de tensão e de vibração (Hitman), porém não houve diferença estatisticamente significativa entre a velocidade na árvore (Va) e a velocidade na viga (Vv), considerando os dados obtidos por ultrassom (Tabela 4.1). Para essa espécie (eucalipto) a velocidade média de ultrassom na árvore foi 21% superior à velocidade média de ultrassom na tora recém abatida e 7% superior à velocidade média de ultrassom na viga saturada. A velocidade média de ultrassom na viga foi 13% superior à velocidade média de ultrassom na tora.

Tabela 4.1. Média, por espécie, das velocidades nas árvores, nas toras recém abatidas e nas vigas saturadas e análise estatística de comparação de médias entre velocidade na árvore (Va), velocidade na tora (Vt) e velocidade na viga (Vv).

	Eucalipto		Pinus	
	Ultrassom	Ondas de tensão e vibração	elliottii e pinaster Ultrassom	pinaster Ondas de tensão e vibração
<b>Árvore</b> (Va – m.s <sup>-1</sup> )	4450 a (15)	4844 a (10)	2501 a (54)	5173,0 b (1)
<b>Tora</b> (Vt – m.s <sup>-1</sup> )	3870 b (12)	4026 b (6)	2554 a (35)	3352 a (5)
<b>Viga</b> (Vv – m.s <sup>-1</sup> )	4680 a (6)	-	3108 a (6)	3546 a (4)
<b>P-valor</b>	0,000	0,004	0,214	0,000

Valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (%).

As letras representam os resultados dos testes de comparação de médias. Letras iguais indicam não haver diferença estatística entre as médias avaliadas.

Ultrassom – utilizado nas árvores, toras e vigas; Ondas de tensão – utilizando em árvores; Vibração – utilizado em toras e vigas.

Há diversas explicações para as diferenças entre as velocidades na árvore e na tora. Uma das explicações, apresentada em diversos artigos, está relacionada ao fato do ensaio na árvore se

restringir à avaliação da madeira mais externa, com madeira mais madura (CHAUHAN e WALKER, 2006; GRABIANOWSKI *et al.*, 2006; MORA *et al.*, 2009).

Segundo Wang (2013) embora a diferença entre a velocidade na árvore e a velocidade na tora parecer estar relacionada ao fato da propagação de onda na árvore se restringir à região mais externa do tronco, de elevada rigidez, a causa fundamental para a diferença entre velocidades se deve ao fato da diferença do mecanismo de propagação de ondas nas duas formas do material (árvore/tora). Dados experimentais mostraram que ensaios realizados em árvores são predominantemente compostos por ondas tridimensionais ao invés de ondas planas unidimensionais (WANG *et al.*, 2007b), o que faz com que a velocidade na árvore seja influenciada pelo coeficiente de Poisson

Para as espécies de pinus, a velocidade de ultrassom na árvore foi, em média, superior (2%) à velocidade de ultrassom na tora recém abatida e inferior (8%) à velocidade média de ultrassom na viga saturada. A velocidade média de ultrassom na viga foi superior (10%) à velocidade média de ultrassom na tora. Já para a espécie de *Pinus pinaster* a velocidade obtida com ondas de tensão na árvore foi 35% superior que a velocidade na tora e 31% superior que a velocidade na viga e esta foi 5% superior que a velocidade na tora recém abatida.

Para as espécies de eucalipto, a velocidade de ultrassom na árvore foi, em média, superior (17%) à velocidade de ultrassom na tora recém abatida e inferior (1%) à velocidade média de ultrassom na viga saturada. A velocidade média de ultrassom na viga foi superior (18%) à velocidade média de ultrassom na tora. A velocidade nas árvores de eucalipto obtidas com ondas de tensão foi 17% superior do que a velocidade obtida com vibração longitudinal na tora, porcentagem igual à obtida para os ensaios utilizando equipamento de ultrassom (17%).

Valores de velocidade na árvore superiores às das toras recém abatidas também foram obtidos por Tsehaye *et al.* (2000 a e b), Walker (2006), Wang *et al.* (2007b), Wang *et al.* (2004) e Wang *et al.* (2000).

As regressões da velocidade de ultrassom na árvore e na tora recém abatida e da velocidade de ultrassom na árvore e na viga foram estatisticamente significativas (P-valor = 0,000) e apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) semelhantes (0,79), indicando que a velocidade de ultrassom na árvore explica 79% da variação da velocidade na tora e na viga (Figura 4.3). Wang *et al.* (2007b) apresentam regressão linear entre velocidade na árvore e na tora caracterizada por um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) variando entre 71,0% e 93,3%. O coeficiente de determinação

( $R^2$ ) obtido por Bertoldo (2011) para a regressão entre velocidade na árvore e na tora foi de 82%, muito próximo ao encontrado nessa pesquisa, porém o  $R^2$  obtido na regressão entre a velocidade na árvore e na viga foi inferior ( $R^2=57\%$ ). Gonçalves *et al.* (2011a) obtiveram coeficientes de determinação de 86,5% para os modelos lineares entre a velocidade de ultrassom na árvore e a velocidade de ultrassom na tora saturada. Essa correlação foi obtida a partir da avaliação conjunta de 4 diferentes materiais (clones de Eucalyptus, *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Toona ciliata*).

As regressões obtidas com os dados coletados com ondas de tensão (árvores) e vibração (toras e vigas) apresentaram baixo valor de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e não foram estatisticamente significativas (P-valor > 0,05). É importante destacar que a amostragem ensaiada com ondas de tensão e com vibração foi muito inferior à amostragem ensaiada com ultrassom (USLab), principalmente no caso das vigas. Essa amostragem limitada fez com que não houvesse variabilidade suficiente para a obtenção de regressões adequadas.

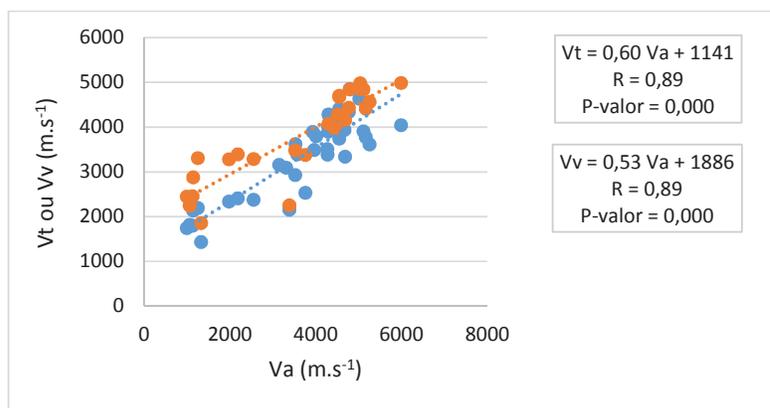


Figura 4.3. Modelos de regressão das velocidades de ultrassom na árvore (Va) e na tora (Vt) e das velocidades de ultrassom na árvore (Va) e na viga (Vv).

De forma geral os resultados obtidos indicam que, efetivamente, há outros parâmetros, além da rigidez e da estrutura anatômica do material, que interferem na propagação de ondas, fazendo com que as velocidades na árvore, na tora recém abatida e na viga saturada sejam diferentes e que uma não explique a variabilidade total da outra.

No entanto, no caso do ultrassom, os valores obtidos nas diferentes formas do material foram correlacionáveis, permitindo inferências de uma velocidade à partir de outra. Mesmo havendo correlações estatisticamente significativas, entender os parâmetros que estão

influenciando a propagação da onda nos diferentes tipos de material é importante para melhorar a precisão da inferência de uma velocidade à partir de outra. No caso desta pesquisa o interesse é inferir a velocidade na tora e na viga à partir da velocidade na árvore, uma vez que resultados da literatura (MERLO *et al.*, 2009; BERTOLDO, 2011; WANG, 2013) indicam que as velocidades em toras e vigas são melhores correlacionados com propriedades mecânicas da madeira. Neste trabalho a hipótese foi a de que o estado de tensões ao qual a árvore está submetida, o coeficiente de Poisson e a dispersão da onda de ultrassom no tronco da árvore, são parâmetros que estão influenciando as diferenças de velocidade na árvore, na tora e na viga.

#### **4.2 Avaliação Não Destrutiva na Árvore como Parâmetro de Previsão de Propriedades da Madeira dela Provenientes**

Para essa avaliação foram considerados os ensaios de ultrassom realizados em 7 árvores e 277 vigas de *Eucalyptus grandis*, 2 árvores e 15 vigas de *Corymbia citriodora*, 2 árvores e 55 vigas de *Eucalyptus pellita*, 3 árvores e 15 vigas de *Pinus pinaster* e 12 árvores e 90 vigas de *Pinus elliottii* (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Velocidades de ultrassom obtidas nas árvores (Va) e médias dos módulos de ruptura ( $f_m$ ) e dos módulos de elasticidade ( $E_M$ ) obtidos em ensaio de flexão em vigas retiradas de cada árvore das espécies.

<b>Espécie</b>	<b>Amostra</b>	<b>Va (m.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>E<sub>M</sub> (MPa)</b>	<b>f<sub>m</sub> (MPa)</b>
<i>Eucalyptus grandis</i>	1	5017	15547	77
	2	5037	14315	57
	3	4788	18207	71
	4	4770	13435	69
	5	4549	16009	78
	6	5110	9556	56
	7	4548	6511	42
<i>Corymbia citriodora</i>	1	5991	14555	77
	2	5251	13475	80
<i>Eucalyptus pellita</i>	1	5162	12287	71
	2	4685	8517	64
<i>Pinus pinaster</i>	1	4444	12482	62
	2	4296	11940	56
	3	4515	15730	68
<i>Pinus elliottii</i>	1	1055	3890	36
	2	1125	4112	33
	3	990	5143	35
	4	1324	2643	27
	5	1252	5963	41
	6	1140	6164	47
	7	2550	6793	41
	8	1980	6992	45
	9	2180	7870	49
	10	3756	7559	48
	11	3522	7559	56
	12	3385	4353	30

Os modelos de regressão (Tabela 4.3) entre os ensaios de ultrassom na árvore e as propriedades da viga ( $E_M$  e  $f_m$ ) foram estatisticamente significativos ( $P$ -valor  $< 0,05$ ). Por meio destes modelos (Figuras 4.4 e 4.5 e Tabela 4.3) verifica-se que o parâmetro de resistência ( $f_m$ ) foi melhor explicado pela velocidade na árvore ( $R^2 = 67\%$ ) do que o parâmetro rigidez ( $E_M$ ) ( $R^2 = 64\%$ ). Esse resultado não era o esperado, uma vez que normalmente a velocidade de propagação de ondas de ultrassom é muito melhor correlacionada com a rigidez do que com a resistência. Os valores encontrados para os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) da regressão entre a velocidade na

árvore ( $V_a$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) (64%) e entre a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e módulo de ruptura ( $f_m$ ) (67%) nessa pesquisa, foram superiores aos encontrados por trabalho realizada por Auty e Achim (2008) que obtiveram valores de  $R^2$  de 0,53 e de 0,59, respectivamente.

Tabela 4.3. Modelos e parâmetros estatísticos (R, P-valor e Erro) da regressão entre a velocidade de ultrassom na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) e entre a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de ruptura ( $f_m$ ) para as espécies.

Regressão	R	P-valor	Erro (MPa)
$E_M = 1862 + 2,20 \cdot V_a$	0,80	0,000	2754
$f_m = 25,7 + 0,008 \cdot V_a$	0,82	0,000	10

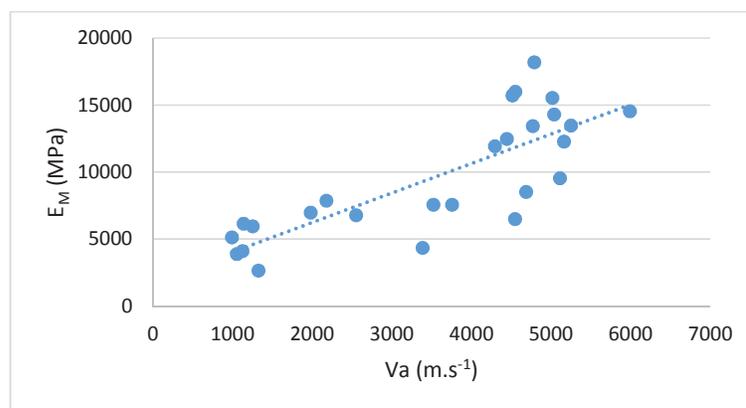


Figura 4.4. Regressão entre a velocidade de ultrassom na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) na viga para as espécies.

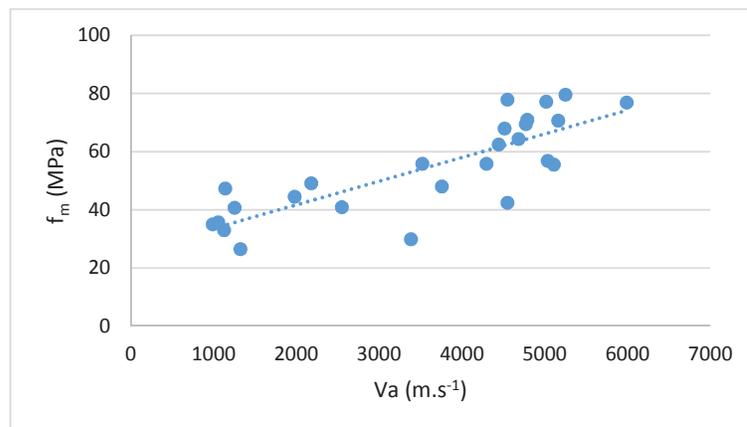


Figura 4.5. Regressão entre a velocidade de ultrassom na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de ruptura ( $f_m$ ) na viga para as espécies.

Essa mesma avaliação foi realizada considerando os ensaios feitos utilizando ondas de tensão (Hitman - ST300) para os ensaios nas árvores e os parâmetros destrutivos, módulo de elasticidade ( $E_M$ ) e módulo de ruptura ( $f_m$ ), obtidos a partir do ensaio de flexão estática nas vigas. Para essa avaliação foram considerados os ensaios em 2 árvores e 22 vigas de *Eucalyptus grandis*, em 2 árvores e 15 vigas de *Corymbia citriodora*, em 2 árvores e 55 vigas de *Eucalyptus pellita* e em 3 árvores e 15 vigas de *Pinus pinaster* (Tabela 4.4).

Tabela 4.4. Velocidades de ondas de tensão obtidas nas árvores ( $V_a$ ) e valores médios do módulo de resistência ( $f_m$ ) e do módulo de elasticidade ( $E_M$ ) obtidos em ensaio de flexão de vigas retiradas de cada árvore das espécies.

Espécie	Amostra	$V_a$ (m.s <sup>-1</sup> )	$E_M$ (MPa)	$f_m$ (MPa)
<i>Eucalyptus grandis</i>	6	4803	9556	56
	7	4260	6511	42
<i>Corymbia citriodora</i>	1	5620	14555	77
	2	4897	13475	80
<i>Eucalyptus pellita</i>	1	5020	12287	71
	2	4463	8517	64
<i>Pinus pinaster</i>	1	5198	12482	62
	2	5103	11940	56
	3	5218	15730	68

Ao contrário dos resultados obtidos com ultrassom (USLab), os resultados não destrutivos na árvore (Figuras 4.6 e 4.7 e Tabela 4.5), obtidos com ondas de tensão (Hitman - ST300), mostram que o parâmetro de rigidez ( $E_M$ ) foi muito melhor explicado pela velocidade na árvore ( $R^2 = 78\%$ ) do que o parâmetro de resistência ( $f_m$ ) ( $R^2 = 38\%$ ). A regressão entre os ensaios não destrutivo na árvore e a propriedade de resistência ( $f_m$ ) na viga não foi estatisticamente significativa (P-valor > 0,05) (Tabela 4.5).

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para a regressão entre a velocidade obtida com ondas de tensão na árvore e a rigidez ( $E_M$ ) foi maior quando comparado com o mesmo ensaio realizado com equipamento de ultrassom ( $R^2 = 67\%$ ). Porém, a regressão considerando a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de resistência ( $f_m$ ) apresentou maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) quando o ensaio na árvore foi realizado com o equipamento de ultrassom ( $R^2 = 64\%$ ) do que quando foi realizado utilizado ondas de tensão (Hitman - ST300).

Tabela 4.5. Modelos e parâmetros estatísticos (R, P-valor e Erro) da regressão entre a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) e entre a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de ruptura ( $f_m$ ), para as espécies.

Regressão	R	P-valor	Erro (MPa)
$E_M = -19991 + 6,39 \cdot V_a$	0,89	0,0015	1470
$f_m = -24,4 + 0,018 \cdot V_a$	0,62	0,0730	9,8

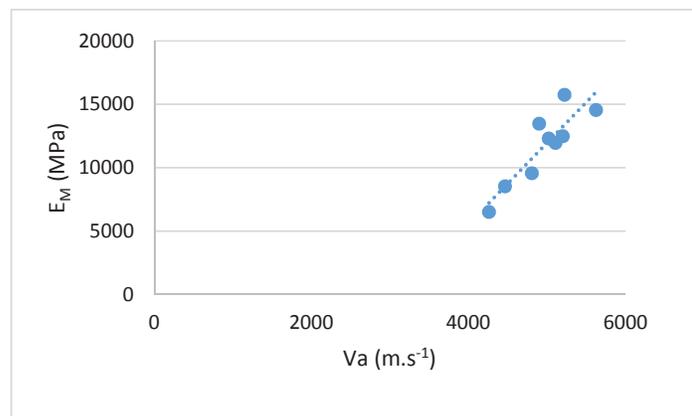


Figura 4.6 - Regressão entre a velocidade de ondas de tensão na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_M$ ) na viga para as espécies.

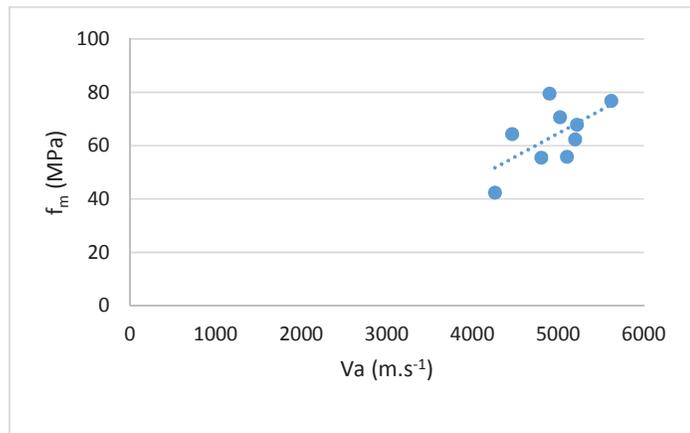


Figura 4.7 - Regressão entre a velocidade de ondas de tensão na árvore ( $V_a$ ) e o módulo de ruptura ( $f_m$ ) na viga para as espécies.

De forma geral, ambos ensaios de propagação de ondas (ultrassom e ondas de tensão) permitem, à partir da velocidade de propagação de ondas na árvore, inferir a rigidez do lote de madeira a ser obtido.

### 4.3 Avaliação das Metodologias de Propagação de Ondas

Um dos objetivos específicos desse trabalho foi avaliar as três metodologias de propagação de ondas (ultrassom, ondas de tensão e vibração) no sentido de verificar os resultados obtidos e a adequação na aplicação em uma determinada forma do material (cilíndrica e retangular).

O ensaio na árvore e na tora com diferentes equipamentos não destrutivos (ultrassom, ondas de tensão e vibração) foi realizado para 3 espécies de eucalipto (*Eucalyptus grandis* – 10 anos, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita*) e para uma espécie de pinus (*Pinus pinaster*). No caso das vigas, somente as de *Pinus pinaster* foram ensaiadas com dois equipamentos (ultrassom e vibração). Verifica-se que a variabilidade, representada pelo coeficiente de variação (CV), foi muito próxima para ambos tipos de ondas, e sempre inferiores a 10% (Tabela 4.6).

Tabela 4.6. Valores mínimos (Min.), máximos (Max.), médios (Média) e coeficientes de variação (CV) para a velocidade de ultrassom e de ondas de tensão obtidas em ensaios na árvore ( $V_a$ ) das diferentes espécies avaliadas.

Espécie	$V_a$ (m.s <sup>-1</sup> ) - Ultrassom				$V_a$ (m.s <sup>-1</sup> ) - Ondas de tensão			
	Min.	Max.	Média	CV (%)	Min.	Max.	Média	CV (%)
<i>Eucalyptus grandis</i> (10 anos)	4548	5110	4829	8	4260	4803	4532	8
<i>Corymbia citriodora</i>	5251	5991	5621	9	4897	5620	5258	10
<i>Eucalyptus pellita</i>	4685	5162	4923	7	4463	5020	4742	8
<i>Pinus pinaster</i>	4515	4296	4418	3	5103	5218	5173	1

A velocidade na árvore obtida por ensaio de ultrassom foi superior à velocidade obtida por ensaio realizado com ondas de tensão para todas as espécies de eucalipto (Figura 4.9), sendo que para o *Eucalyptus grandis* e para o *Corymbia citriodora* a diferença entre velocidades foi de 6% enquanto que para o *Eucalyptus pellita* a diferença entre velocidades foi menor (3%). Para o *Pinus pinaster* a velocidade obtida por equipamento de ultrassom foi 14% inferior quando comparada com a velocidade na árvore obtida por equipamento de ondas de tensão (Figura 4.8).

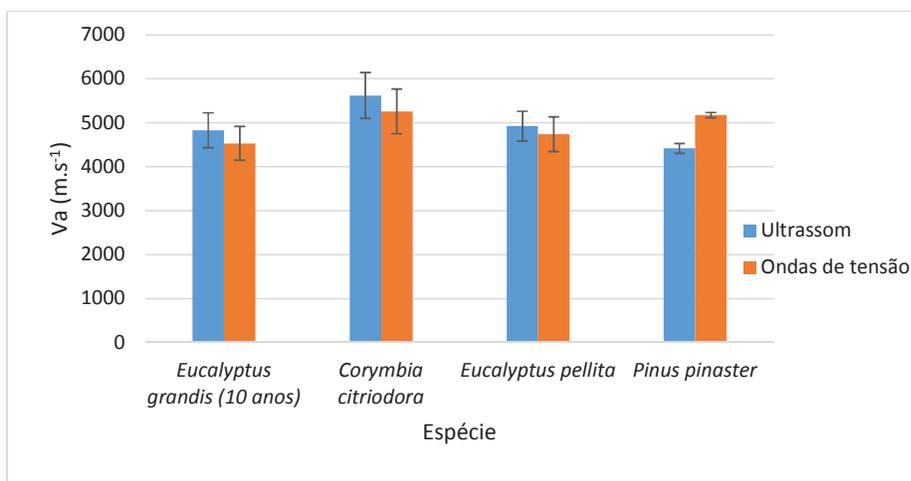


Figura 4.8. Médias de velocidade na árvore ( $V_a$ ), por espécie, obtida com de ultrassom e com ondas de tensão.

A avaliação estatística (intervalo de confiança e teste t) da comparação de médias dos valores de velocidade na árvore obtidos pelas duas técnicas (ultrassom e ondas de tensão) mostrou

não haver diferença estatisticamente significativa entre os valores. Esse resultado indica que se obtém o mesmo valor para velocidade na árvore utilizando o equipamento de ultrassom ou o equipamento de ondas de tensão.

A comparação de médias do coeficiente de variação (CV) foi avaliada estatisticamente pelo intervalo de confiança e pelo teste t. O coeficiente de variação da velocidade na árvore variou por espécie e por equipamento, mas não há diferença estatisticamente significativa do CV considerando as duas metodologias avaliadas (ultrassom e ondas de tensão). A média do CV para as velocidades foi igual a 7% tanto para as velocidades obtidas por ultrassom quanto para as velocidades obtidas por ondas de tensão.

Análise semelhante (Tabela 4.7) foi realizada para os ensaios na tora com as diferentes técnicas não destrutivas (ultrassom e vibração).

Tabela 4.7. Valores mínimos (Min.), máximos (Max.), médios (Média) e coeficientes de variação (CV) para a velocidade de ultrassom e de vibração obtidas em ensaios na tora (Vt) das diferentes espécies avaliadas.

Espécie	Vt (m.s <sup>-1</sup> ) - Ultrassom				Vt (m.s <sup>-1</sup> ) - HM200			
	Min.	Max.	Média	CV (%)	Min.	Max.	Média	CV (%)
<i>Eucalyptus grandis</i> (10 anos)	3748	3909	3829	3	4120	4410	4252	3
<i>Corymbia citriodora</i>	3616	4048	3832	14	3810	4280	4037	6
<i>Eucalyptus pellita</i>	3341	3780	3561	9	3530	4050	3803	5
<i>Pinus pinaster</i>	4016	4285	4143	3	3180	3600	3352	5

As velocidades nas toras obtidas com vibração foram superiores do que as velocidades obtidas com ultrassom para as espécies de eucalipto avaliadas (Figura 4.9). Para o *Eucalyptus grandis* a diferença de velocidade foi de 10%, para o *Eucalyptus pellita* de 6% e a menor diferença foi verificada para o *Corymbia citriodora* (5%). A maior diferença de velocidade na tora entre as técnicas avaliadas foi verificada para o *Pinus pinaster*, na qual a velocidade de ultrassom foi 19% superior do que a velocidade obtida na tora por vibração (Figura 4.9).

Apesar das diferenças numéricas existentes entre as velocidades na tora obtidas por ultrassom e por vibração, a avaliação estatística (intervalo de confiança e teste t) realizada através da comparação de médias dos valores de velocidade na tora obtidos pelas duas técnicas (ultrassom e vibração) mostra não haver diferença estatisticamente significativa entre os valores de

velocidade. Isso indica que a velocidade na tora pode ser igualmente obtida por ultrassom ou por vibração.

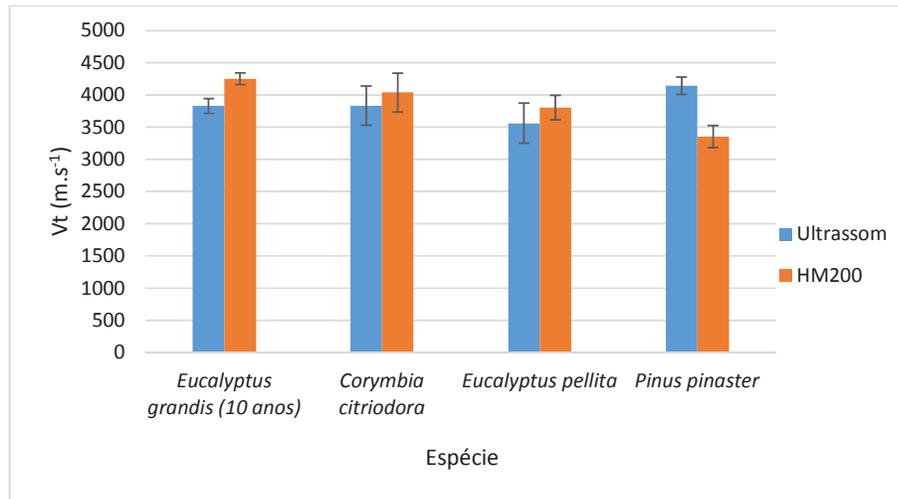


Figura 4.9. Médias de velocidade na tora ( $V_t$ ), por espécie, obtida com equipamento de ultrassom e com equipamento de vibração.

A comparação de médias do coeficiente de variação (CV) foi avaliada estatisticamente pelo intervalo de confiança e pelo teste t. O coeficiente de variação (CV) da velocidade na tora variou por espécie e por equipamento sendo que não há diferença estatisticamente significativa do CV considerando as duas técnicas avaliadas (ultrassom e vibração). A média do CV para as velocidades na tora obtida por ultrassom foi de 7% enquanto que a média do CV para as velocidades na tora obtidas por vibração foi ligeiramente inferior (5%).

Segundo Wang (2013) ao comparar a relação entre velocidades (árvore/tora) ou a estimativa do coeficiente de Poisson obtido em diferentes pesquisas, é importante ressaltar as diferenças dos instrumentos de propagação de ondas utilizados para os ensaios na árvore, que representam um ponto crítico para análise de dados. Para o autor, diferentes equipamentos de propagação de ondas acústicas podem ter diferentes métodos para determinar os dados de tempo de percurso de dois sinais consecutivos. Mesmo para os equipamentos que utilizam o mesmo método para determinação do tempo de percurso da onda, os ensaios nas árvores podem resultar em leituras diferentes de tempo devido à configuração do equipamento. Quando um equipamento apresenta-se funcionando normalmente, espera-se variações entre os resultados dos ensaios,

mesmo utilizando o mesmo equipamento para as medições (WANG, 2013). A repetibilidade de leituras de tempo obtidos nas árvores (equipamento de ondas de tensão) geralmente é inferior às leituras de tempo obtidas nos ensaios nas toras (equipamento de vibração). Estudos mostram que a variação de resultados apresentados para os ensaios nas árvores se deve ao equipamento de propagação de ondas utilizado e ao posicionamento dos transdutores no tronco da árvore (LASSERRE *et al.* 2007; MAHON *et al.* 2009). Segundo artigo de revisão de Wang (2013), Harris e Andrews (1999) citam que quando é utilizado equipamento de ondas de tensão para o ensaio na árvore pode haver variações nos dados obtidos devido à intensidade do impacto mecânico fornecido. Isso pode ser minimizado obtendo-se várias medições em um mesmo ponto (repetições), com utilização de um valor médio para o ensaio na árvore.

No caso das vigas (Tabela 4.8) as técnicas de ultrassom e de vibração apresentaram comportamento semelhante quando comparado com os ensaios realizados na tora para a espécie de *Pinus pinaster*. As velocidades de ultrassom foram, para todas as vigas, superiores às velocidades obtidas por equipamento de vibração (Figura 4.10), sendo que, na média, a velocidade obtida por ultrassom foi 14% superior que a velocidade de vibração, diferença inferior do que a apresentada para os ensaios realizados na tora (19%) pelas duas técnicas (ultrassom e vibração).

Tabela 4.8. Valores mínimos (Min.), máximos (Max.), médios (Média) e coeficientes de variação (CV) para a velocidade (Vv) de ultrassom e de vibração (HM200) obtidas em ensaios nas vigas de *Pinus pinaster*.

Espécie	Vv (m.s <sup>-1</sup> ) - Ultrassom				Vv (m.s <sup>-1</sup> ) - HM200			
	Min.	Max.	Média	CV (%)	Min.	Max.	Média	CV (%)
<i>Pinus pinaster</i>	3458	4549	4111	8	2920	4100	3546	9

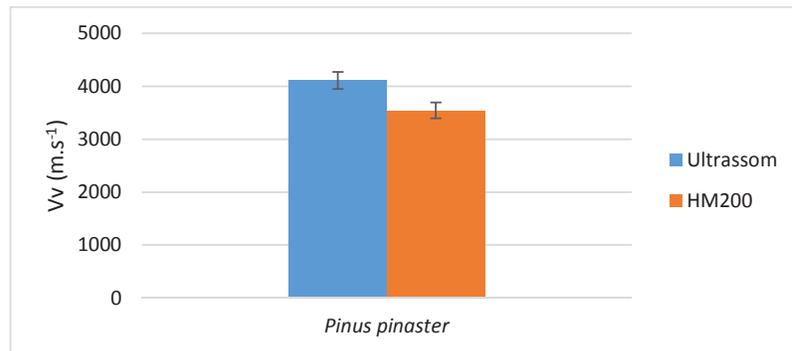


Figura 4.10. Velocidade nas vigas (Vv) de *Pinus pinaster* obtida com equipamento de ultrassom e com equipamento de vibração (HM200).

A análise estatística (intervalo de confiança e pelo teste t) dos resultados de velocidade obtidos por ultrassom e por vibração nas vigas de *Pinus pinaster*, mostrou haver diferença estatística entre os resultados de velocidade obtidos pelas duas técnicas. Apesar disso, houve correlação estatisticamente significativa (P-valor = 0,000) entre os valores de velocidade provenientes das duas técnicas (ultrassom e vibração) com coeficiente de determinação de 94% (Figura 4.11).

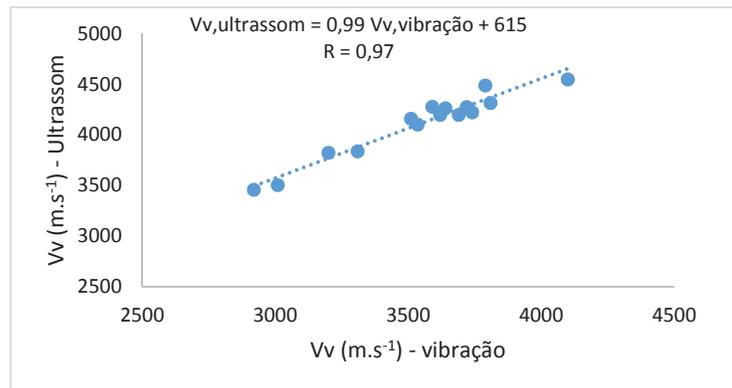


Figura 4.11. Regressão entre a velocidade na viga obtida por vibração e a velocidade na viga obtida por ultrassom.

Além dos resultados das diferenças de velocidade na árvore, na tora recém abatida e na viga saturada provenientes das diferentes técnicas (ultrassom, vibração e ondas de tensão) utilizados nessa pesquisa é importante destacar alguns pontos com relação aos equipamentos e aos ensaios.

Todos os equipamentos são de fácil manuseio tanto para a realização do ensaio como para a obtenção da leitura dos resultados, independente do formato do material ensaiado (circular no caso da tora e retangular no caso da viga). A utilização do ultrassom permite, com um só equipamento, obter dados de velocidade tanto na árvore como na tora e na viga, enquanto que com o equipamento de ondas de tensão (ST300) se obtém valores de velocidade na árvore e com o equipamento de vibração (HM200) pode se obter os valores de velocidade na tora e na viga.

O equipamento de ondas de tensão (ST300) possui como facilitador na hora do ensaio a obtenção automatizada, por meio de laser, da leitura da distância entre transdutores, eliminando, dessa forma, uma fonte de erro, que no caso da utilização do ultrassom a obtenção da distância entre o transdutor emissor da onda e o transdutor receptor da onda é feita de forma manual, através de fita métrica.

O equipamento de vibração utilizando nesta pesquisa (HM200) possui como grande vantagem a realização do ensaio em apenas uma das seções transversais do material (tora/viga), ou seja, a tora/viga recebe o impacto na mesma face onde é captado o resultado da vibração que é convertido em frequência e, ao inserir o comprimento do objeto avaliado no aparelho, o próprio equipamento já calcula e fornece o valor da velocidade naquele material. Essa característica do equipamento de vibração (HM200) possibilita que a realização do ensaio seja feita por apenas um operador, mesmo no caso de peças grandes.

Com nenhum dos equipamentos (vibração e ultrassom) foi encontrado dificuldades de leitura em decorrência do comprimento da tora avaliada (comprimento máximo da tora ensaiada na pesquisa de 3,5 m). No caso do HM200 a informação do fabricante é a de que o comprimento do material ensaiado deve estar no intervalo de 2,0 m a 50,0 m. Não encontrou-se dados sobre a limitação com relação à seção transversal da tora (válido somente para o equipamento de vibração, pois para o ultrassom não há limitação do ensaio devido à seção transversal do material).

Além disso, com a utilização do HM200 não é necessário o emprego de gel medicinal nem a realização de orifício para acoplamento dos transdutores, necessários para os ensaios com aparelho de ultrassom com transdutores de faces planas ou exponenciais, respectivamente.

O equipamento de ultrassom é calibrado toda vez que se inicia os ensaios, através de uma barra de acrílico de comprimento de 0,2 m com velocidade conhecida. Para a calibração do equipamento de ondas de tensão (ST300) é utilizado uma barra de aço com orifícios nas extremidades para inserção dos transdutores (emissor e receptor) com inclinação de 45° em relação

superfície. Já para o equipamento de vibração não é possível fazer a calibração ou a averiguação das leituras a serem obtidas, pois o mesmo não contém material para calibração e nem instruções para esse procedimento em seu manual.

A partir deste item as análises serão feitas considerando apenas os resultados provenientes dos ensaios utilizando equipamento de ultrassom (USLab), pois somente com esse equipamento se obteve os resultados para toda a cadeia de avaliação não destrutiva do material (árvore/tora/viga) e para todas as espécies ensaiadas nessa pesquisa.

#### **4.4 Possíveis Fatores de Interferência das Diferenças de Velocidade na Árvore, na Tora e na Viga**

No decorrer da pesquisa e da realização dos ensaios foram levantados alguns fatores que poderiam estar influenciando a propagação da onda nas três formas do material avaliado (árvore, tora e viga) fazendo com que a velocidade na árvore fosse diferente da velocidade na tora e na viga. Pesquisas realizadas com esse objetivo verificaram que a velocidade na árvore não é numericamente igual à velocidade obtida na tora, mesmo que o ensaio seja aplicado logo após o abate da árvore (YIN *et al.*, 2010; WANG *et al.* 2007a; BERTOLDO, 2011). As causas para as diferenças de velocidade têm sido atribuídas à distinção do local e da forma de medição em árvores e em toras, bem como às diferenças na condição de carregamento (WANG *et al.* 2007a, GONÇALVES *et al.* 2011a).

Dessa forma, verificou-se que algumas das hipóteses para que a velocidade na árvore tenha valor diferente da velocidade na tora recém abatida é a questão do estado de tensões ao qual a árvore está submetida, do coeficiente de Poisson e da dispersão da onda no tronco da árvore.

Como no ensaio de ultrassom em árvores em pé, não é possível o acesso às extremidades para a colocação dos transdutores, a onda é induzida superficialmente no material (ensaio indireto). Assim, é de extrema importância entender como ocorre a dispersão da onda superficial na madeira, para que seja possível correlacionar valores de velocidade obtidos desse ensaio com valores obtidos em ensaios nos quais a onda se propaga de forma puramente longitudinal (ensaio direto), como é o caso das toras e das vigas.

#### 4.4.1 Acustoelasticidade da madeira

Em teoria, assumindo o comportamento elástico no material, as tensões normais em pontos equidistantes nas zonas comprimidas e tracionadas são iguais, em módulo, pois são função apenas do momento aplicado, do momento de inércia e da distância entre o ponto de medição da deformação (posição dos *gages* – Figura 3.17) até o centro de gravidade. A Tabela 4.8 apresenta um exemplo de valores de tensão normal teórica obtidos para cada nível de carga. Os resultados completos podem ser vistos nas Tabelas de I.1 a I.17 do ANEXO I.

Tabela 4.8. Tensões normais teóricas determinadas nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 1.3.C (*Eucalyptus grandis*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
0,6	0,29	0,18
0,9	0,43	0,27
1,3	0,62	0,39
1,6	0,76	0,48
1,8	0,86	0,54
2,4	1,14	0,72
3,0	1,43	0,89
4,0	1,91	1,19

O cálculo da tensão experimental exige que as deformações específicas e o módulo de elasticidade tenham sido calculados corretamente. Considerando que pode haver problemas de leitura das deformações durante o ensaio, foi necessário verificar, para cada viga, a adequação do comportamento das deformações mensuradas por meio dos extensômetros. Para isso foram realizadas duas análises: a linearidade da reta, avaliada pelo coeficiente de correlação (R), que representa a tensão teórica x deformação específica para cada ponto de medição e a diferença entre os valores obtidos para o mesmo ponto de medição em faces opostas, já que estes valores não poderiam ser muito díspares se o comportamento da viga durante o ensaio fosse adequado.

Para exemplificar a análise realizada apresenta-se o comportamento do gráfico tensão x deformação específica (Figura 4.12) e respectivos coeficientes de correlação (Tabela 4.9) obtidos entre estes dois parâmetros em cada ponto de medição e faces da viga 1.3.C de *Eucalyptus grandis*.

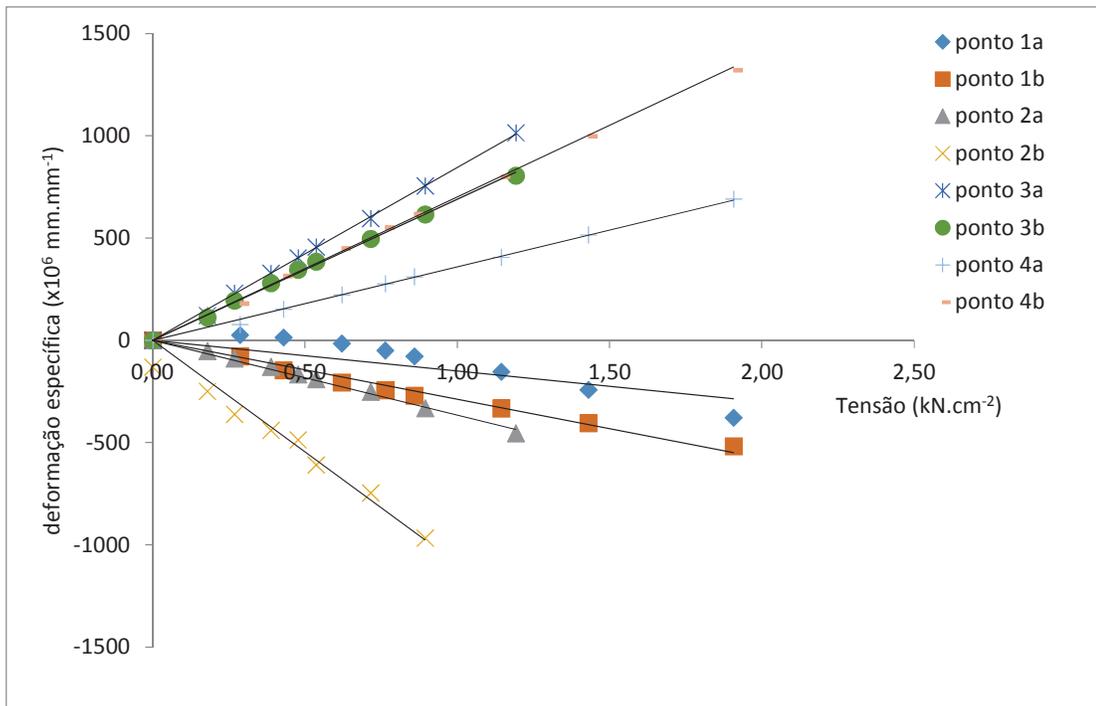


Figura 4.12. Exemplo de gráfico deformação específica x tensão teórica obtido para a viga 1.3.C (*Eucalyptus grandis*).

Tabela 4.9. Coeficientes de correlação (R) das retas de regressão entre a deformação específica e a tensão para cada zona de medição na altura da viga 1.3.C (*Eucalyptus grandis*).

Zona de medição	R
1a	0,88
1b	0,99
2a	0,99
2b	0,99
3a	0,99
3b	0,99
4a	0,99
4b	0,99

É esperada a linearidade do gráfico de deformação x tensão, já que o ensaio foi feito considerando a zona elástica. Esse comportamento foi verificado para todos os pontos de medição, exceto para o ponto 1a, no qual o coeficiente de correlação foi bem mais baixo que os demais. Este resultado pode ter sido consequência de interferência da proximidade do ponto de medição ao

ponto de aplicação da carga (bulbo de tensões). Além disso, verifica-se, para esse ponto, que algumas deformações iniciais são positivas (Figura 4.12), o que não é adequado para o ponto 1 que se encontra na seção comprimida da viga.

Utilizando-se os valores médios de deformação em pontos situados nas faces paralelas, verifica-se que tanto na seção comprimida (pontos 1 e 2) quanto nas seções tracionadas (pontos 3 e 4) há a discrepância em relação aos valores nos pontos 1 e 2 e nos pontos 3 e 4, sendo a deformação nas bordas (pontos 1 e 4) inferior a deformação nas fibras mais internas (pontos 2 e 3) - Figura 4.13.

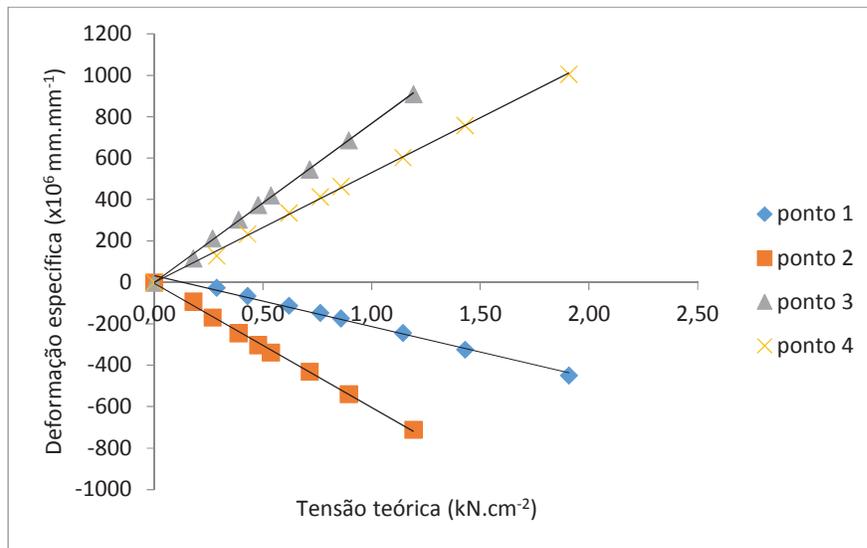


Figura 4.13. Exemplo de gráfico deformação específica média obtidas em faces opostas x tensão teórica obtido para a viga 1.3.C (*Eucalyptus grandis*).

Esse comportamento discrepante das deformações pode ter ocorrido devido a distorções na viga durante o ensaio, provocadas em função de defeitos de secagem. Os defeitos de secagem são comuns no eucalipto e fazem com que as vigas não estejam perfeitamente retas, de forma que a hipótese do ensaio de flexão (seções planas permanecem planas) não seja verificada.

O diagrama de tensões na seção transversal, calculado com o uso da Equação 3.6 e as deformações médias obtidas nas faces paralelas (Figura 4.14), mostra a discrepância dos valores da tensão na seção comprimida e, também, indica que há diferenças significativas entre as tensões experimentais e a teórica, considerada no caso deste gráfico somente para a carga máxima. Essas

diferenças devem estar relacionadas com os problemas ocorridos na medição das deformações experimentais, discutidas anteriormente.

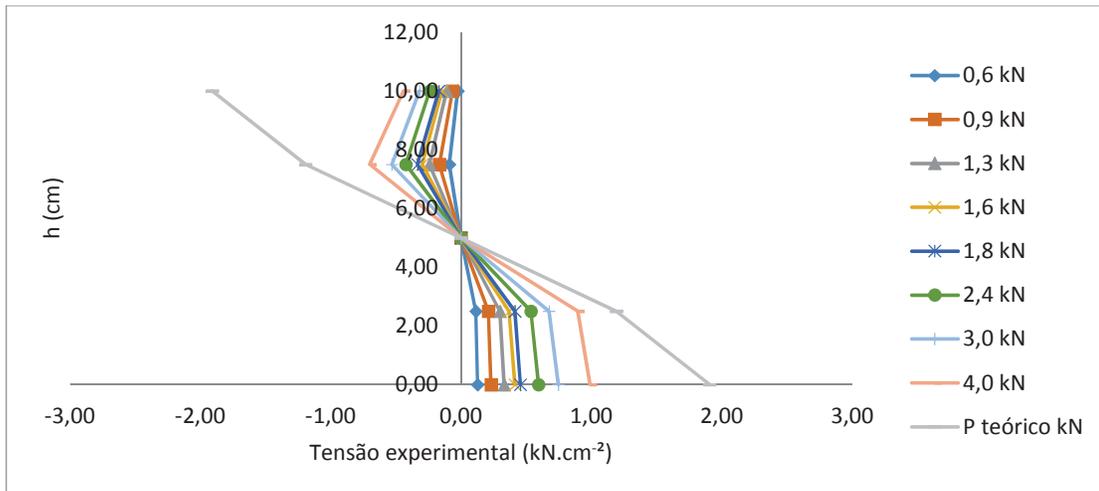


Figura 4.14. Diagrama de tensão experimental para cada nível de carregamento e teórico considerando o nível máximo de carregamento, para diferentes pontos na altura (h) da seção transversal da viga 1.3.C (*Eucalyptus grandis*).

Nos casos em que o comportamento da viga foi adequado, as deformações lidas foram mais coerentes e o diagrama de tensões experimental foi mais próximo do teórico. Exemplos deste comportamento são apresentados nas Figuras 4.15 e 4.16, correspondentes à viga 3.2.B e 1.1.D, respectivamente, de *Eucalyptus grandis*.

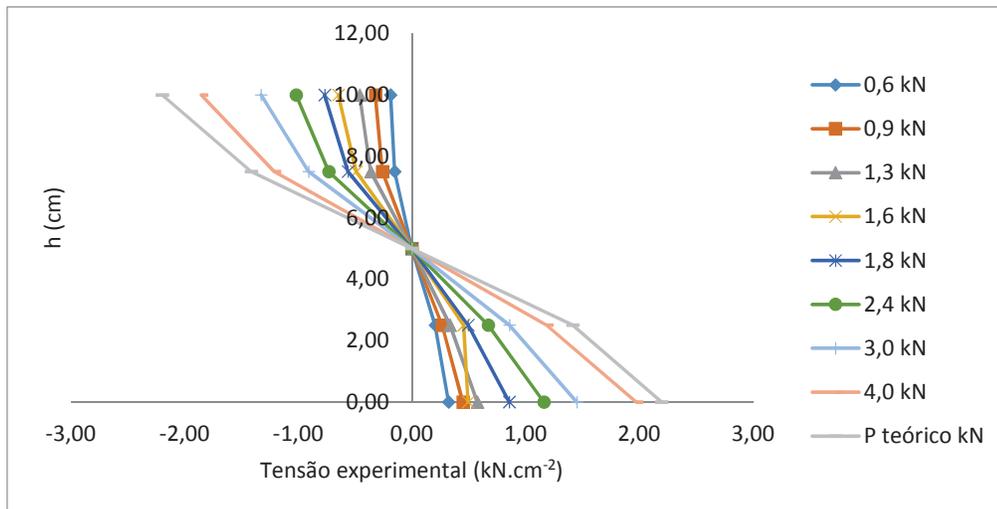


Figura 4.15. Diagrama de tensão experimental para cada nível de carregamento e teórico considerando o nível máximo de carregamento, para diferentes pontos na altura (h) da seção transversal da viga 3.2.B (*Eucalyptus grandis*).

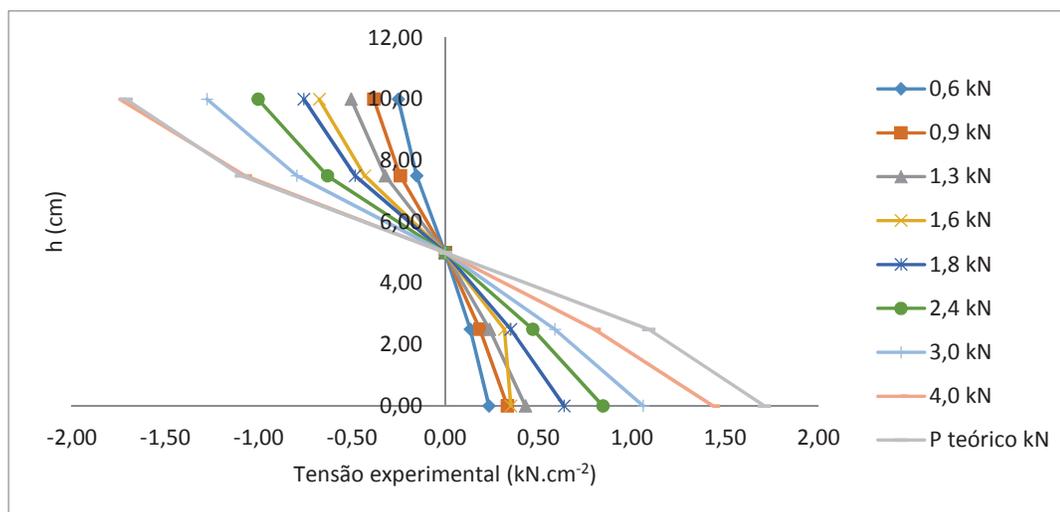


Figura 4.16. Diagrama de tensão experimental para cada nível de carregamento e teórico considerando o nível máximo de carregamento, para diferentes pontos na altura (h) da seção transversal da viga 1.1.D (*Eucalyptus grandis*).

Análise semelhante à detalhada anteriormente foi realizada para as 18 vigas de eucalipto ensaiadas. Foi possível observar que, mesmo nos casos em que o comportamento do diagrama de

tensões experimentais se aproximou do teórico, a tensão teórica foi, na maior parte dos casos, superior à tensão experimental. Assim, os valores da constante acustoelástica calculados à partir da Equação 2.3, utilizando a tensão teórica, implicará, na maior parte dos casos, em valores levemente inferiores aos obtidos utilizando a tensão experimental. No caso da zona tracionada da viga 3.2b (Figura 4.15), por exemplo, a tensão de compressão teórica foi aproximadamente 19% superior à experimental, e a de tração teórica foi 12% superior à experimental. Essa diferença seria diretamente refletida no valor da constante acustoelástica.

Na revisão bibliográfica verificou-se que, para materiais isotrópicos, como por exemplo o aço, a variação da velocidade com a tensão (em ensaios de tração) tem comportamento linear, mas isso não foi observado para as vigas de madeira submetidas ao ensaio de flexão. A falta de linearidade da variação da velocidade com a tensão pode ter sido consequência do tipo de ensaio adotado (flexão), que não é puro, e pela questão já discutida do pequeno encurvamento ou empenamento da seção das vigas, consequência de defeitos de secagem.

Nas vigas onde havia grande diferença de valores de tensões, teórica e experimental, as constantes acustoelásticas apresentaram grandes diferenças de valores (Tabela 4.10 a 4.12). De forma análoga, os valores das constantes acustoelásticas se aproximam quando o comportamento das tensões teórica e experimental se aproximam.

Tabela 4.10. Constantes acustoelásticas médias obtidas utilizando a tensão teórica e a tensão experimental. Espécie: *Eucalyptus grandis* (10 anos).

Viga	Tipo de tensão	Seção comprimida	Seção tracionada
		(MPa <sup>-1</sup> )	(MPa <sup>-1</sup> )
1.3.C	Teórica	0,0024	-0,0016
	Experimental	0,0045	-0,0025
1.2.C	Teórica	0,0027	-0,0033
	Experimental	0,0038	-0,0039
1.2.B	Teórica	0,0041	0,015**
	Experimental	0,0052	0,018**
3.2.B	Teórica	-0,00055**	-0,0021
	Experimental	-0,0010**	-0,0023
1.1.A	Teórica	0,012**	-0,0017
	Experimental	0,018**	-0,0014
1.1.D	Teórica	0,0019	-0,0079
	Experimental	0,0018	-0,0085
<b>Média geral</b>		<b>Teórica</b>	<b>0,0028 (CV = 33,7%) - 0,0033 (CV = 80,2%)</b>
		<b>Experimental</b>	<b>0,0038 (CV = 38,6%) - 0,0025 (CV = 41,4%)*</b>

\*não computando, além da viga 1.2.B (valores de outra ordem de grandeza), a viga 1.1.D

\*\*não computado na média por não estar na mesma ordem de grandeza dos demais valores

Tabela 4.11. Constantes acustoelásticas médias obtidas utilizando a tensão teórica e a tensão experimental. Espécie: *Eucalyptus pellita* (26 anos).

Viga	Tipo de tensão	Seção comprimida	Seção tracionada
		(MPa <sup>-1</sup> )	(MPa <sup>-1</sup> )
15.2.B	Teórica	0,0050	-0,0014
	Experimental	0,0053	-0,0016
15.2.E	Teórica	0,0050	-0,0044
	Experimental	0,0050	-0,0042
11.1.C	Teórica	0,0028	-0,0065
	Experimental	0,018	-0,041**
11.3.F	Teórica	0,0042	-0,010**
	Experimental	0,0032	-0,023**
11.1.P	Teórica	*	*
	Experimental		
11.2.E	Teórica	0,0039	-0,0016
	Experimental	0,0035	-0,0018
<b>Média geral</b>	<b>Teórica</b>	<b>0,0042 (CV = 21,7%)</b>	<b>- 0,0035 (CV = 69,6%)</b>
	<b>Experimental</b>	<b>0,0043 (CV = 24,5%)</b>	<b>- 0,0025 (CV = 57,9%)</b>

\*houve problema no ensaio e o número de medições foi muito pequeno para o cálculo

\*\*não computado na média por não estar na mesma ordem de grandeza dos demais valores

Tabela 4.12. Constantes acustoelásticas médias obtidas utilizando a tensão teórica e a tensão experimental. Espécie: *Corymbia citriodora* (8 anos).

Viga	Tipo de tensão	Seção comprimida	Seção tracionada
		(MPa <sup>-1</sup> )	(MPa <sup>-1</sup> )
6.1.A	Teórica	0,0028	-0,0026
	Experimental	0,00053**	-0,0027
9.1.C	Teórica	0,0048	-0,0058
	Experimental	0,0059	-0,0072
9.1.A	Teórica	0,00060**	-0,00081**
	Experimental	0,0040	-0,00098**
9.2.A	Teórica	0,0018	-0,0015
	Experimental	0,0020	-0,0017
6.1.B	Teórica	0,0021	-0,00033**
	Experimental	0,0020	-0,00067**
6.2.A	Teórica	0,0014	0,0041
	Experimental	0,0020	0,0044
Média geral	Teórica	<b>0,0026 (CV = 51,6%)</b>	<b>- 0,0035 (CV = 53,4%)</b>
	Experimental	<b>0,0032 (CV = 54,7%)</b>	<b>- 0,0040 (CV = 60,2%)</b>

\*\*não computado na média por não estar na mesma ordem de grandeza dos demais valores

As constantes acustoelásticas apresentam coeficientes de variação altos (Tabela 4.13), comportamento explicado pela falta de linearidade da variação da velocidade com a variação da tensão. O valor da constante acustoelástica foi mais estável para a zona comprimida na espécie *Eucalyptus pellita* (Tabela 4.30). Nesse caso o valor da constante também foi muito superior quando comparado com as outras duas espécies. Esse comportamento pode estar relacionado com a idade destas árvores, que no caso do *Eucalyptus pellita* eram constituídas em grande parte de madeira adulta, enquanto no caso das demais espécies de madeira juvenil. Se essa hipótese estiver correta pode ser esperado que em árvores adultas a velocidade varie mais com a tensão do que em árvores mais jovens. Essa diferenciação de valores e de coeficiente de variação não se observou para a seção tracionada, principalmente quando se utilizou a tensão teórica no cálculo da constante acustoelástica. Com o uso da tensão experimental houve inversão do comportamento da zona tracionada, pois o valor da constante para o *Eucalyptus pellita* foi inferior aos demais (Tabela 4.30).

Tabela 4.13. Constantes acustoelásticas médias e coeficiente de variação (entre parêntesis) para as três espécies obtidas utilizando a tensão teórica e a tensão experimental.

Espécie	Tipo de tensão	Zona comprimida	Zona tracionada
		(MPa <sup>-1</sup> )	(MPa <sup>-1</sup> )
<i>Eucalyptus grandis</i> (10 anos)	Teórica	0,0028 (33,7%)	- 0,0033 (80,2%)
	Experimental	0,0038 (38,6%)	- 0,0037 (76,2%)
<i>Corymbia citriodora</i> (8 anos)	Teórica	0,0026 (51,6%)	- 0,0035 (53,4%)
	Experimental	0,0032 (54,7%)	- 0,0040 (60,2%)
<i>Eucalyptus pellita</i> (26 anos)	Teórica	0,0042 (21,7%)	- 0,0035 (69,6%)
	Experimental	0,0043 (24,5%)	- 0,0025 (57,9%)

Embora algumas vigas tenham apresentado comportamento invertido, verifica-se que para a grande maioria a velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal diminui com o aumento da tensão, tanto na seção comprimida quanto na seção tracionada. O cálculo da constante acustoelástica (Equação 2.3) foi feita considerando o sinal da tensão, por essa razão a constante é positiva no caso da seção comprimida e negativa no caso da seção tracionada. O mesmo resultado foi obtido por Hasegawa *et al.* (2000).

A questão da acustoelasticidade da madeira é tema que necessita ainda ser aprofundado para que se tenham resultados mais conclusivos. No entanto, nessa parte da pesquisa já foi possível evidenciar aspectos metodológicos importantes a serem observados em pesquisas posteriores do grupo, como por exemplo, a importância de se utilizar vigas mais retilíneas para que o estado de tensões possa ser determinado com maior precisão.

Os resultados obtidos nos ensaios de acustoelasticidade evidenciaram que o estado de tensões influencia a velocidade na árvore e, portanto, é fator importante para estudos que visam corrigir velocidades obtidas em árvores.

#### 4.4.2 Coeficiente de Poisson

De acordo com a norma Brasileira (NBR 7190, 1997) o coeficiente de variação (CV) aceitável para resistência da madeira é 18% e para a rigidez é de 28%. Nada se cita em relação à variabilidade aceitável para o coeficiente de Poisson. Nesta pesquisa os coeficientes de variação (CV) de todos os módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson foram inferiores a 28% (Tabelas 4.14 a 4.17).

Os coeficientes de Poisson determinadas por ultrassom (inversão da matriz de rigidez) não apresentaram valores numericamente iguais aos propostos por Bodig e Jayne (1982), sendo em geral superiores (Tabelas 4.14 a 4.15). Esse resultado também foi observado por Bucur (2006), Trinca (2011), Gonçalves *et al.* (2011b), Gonçalves *et al.* (2014). Bodig e Jayne (1982), destacam que pode haver grades variações em torno dos valores médios sugeridos por eles tanto para a madeira de conífera como para a madeira de folhosa.

Tabela 4.14. Constantes elásticas (módulos de elasticidade longitudinais – E, módulos de elasticidade transversais – G e coeficientes de Poisson –  $\nu$ ) obtidas por ultrassom e valores médios propostos por Bodig e Janyne (1982) (B&J). *Eucalyptus grandis*.

	Amostras				Média	CV (%)	(B&J)
	1A	1B	3B	3C			
<b>E<sub>L</sub> (MPa)</b>	10674	11469	11935	10565	11160	6	
<b>E<sub>R</sub> (MPa)</b>	1310	1317	1647	1566	1460	12	
<b>E<sub>T</sub> (MPa)</b>	645	529	763	672	652	15	
<b>G<sub>TR</sub> (MPa)</b>	254	255	247	233	247	4	
<b>G<sub>Tl</sub> (MPa)</b>	730	750	680	758	730	5	
<b>G<sub>LR</sub> (MPa)</b>	1078	1200	1247	1223	1187	6	
<b><math>\nu_{RL}</math></b>	0,079	0,046	0,070	0,073	0,067	21	0,044
<b><math>\nu_{TL}</math></b>	0,042	0,033	0,040	0,045	0,040	13	0,027
<b><math>\nu_{LR}</math></b>	0,642	0,403	0,505	0,491	0,510	19	0,37
<b><math>\nu_{TR}</math></b>	0,378	0,388	0,307	0,308	0,345	13	0,33
<b><math>\nu_{LT}</math></b>	0,700	0,715	0,626	0,702	0,686	6	0,50
<b><math>\nu_{RT}</math></b>	0,767	0,965	0,663	0,719	0,778	17	0,67

Tabela 4.15. Constantes elásticas (módulos de elasticidade longitudinais – E, módulos de elasticidade transversais – G e coeficientes de Poisson –  $\nu$ ) obtidas por ultrassom e valores médios propostos por Bodig e Janyne (1982) (B&J). *Corymbia citriodora*.

	Amostras			Média	CV (%)	B&J
	6A	6B	9			
<b>E<sub>L</sub> (MPa)</b>	12465	12989	13024	12826	2	
<b>E<sub>R</sub> (MPa)</b>	1913	1487	1624	1675	13	
<b>E<sub>T</sub> (MPa)</b>	960	1148	1149	1085	10	
<b>G<sub>TR</sub> (MPa)</b>	328	424	446	399	16	
<b>G<sub>TL</sub> (MPa)</b>	682	732	728	714	4	
<b>G<sub>LR</sub> (MPa)</b>	970	1033	1062	1022	5	
<b><math>\nu_{RL}</math></b>	0,084	0,103	0,094	0,094	10	0,044
<b><math>\nu_{TL}</math></b>	0,060	0,057	0,075	0,064	15	0,027
<b><math>\nu_{LR}</math></b>	0,546	0,898	0,754	0,733	24	0,37
<b><math>\nu_{TR}</math></b>	0,406	0,437	0,407	0,416	4	0,33
<b><math>\nu_{LT}</math></b>	0,778	0,642	0,847	0,756	14	0,50
<b><math>\nu_{RT}</math></b>	0,809	0,566	0,575	0,650	21	0,67

Tabela 4.16. Constantes elásticas (módulos de elasticidade longitudinais – E, módulos de elasticidade transversais – G e coeficientes de Poisson –  $\nu$ ) obtidas por ultrassom valores médios propostos por Bodig e Janyne (1982) (B&J). *Eucalyptus pellita*.

	Amostras					Média	CV (%)	B&J
	11B	11C	11D	15B	15E			
<b>E<sub>L</sub> (MPa)</b>	12525	11317	12257	12621	11018	11873	6	
<b>E<sub>R</sub> (MPa)</b>	2027	1784	2232	1854	1841	1960	9	
<b>E<sub>T</sub> (MPa)</b>	1210	1087	1363	1241	1334	1255	9	
<b>G<sub>TR</sub> (MPa)</b>	586	628	692	613	648	634	6	
<b>G<sub>TL</sub> (MPa)</b>	893	867	1040	899	1006	956	8	
<b>G<sub>LR</sub> (MPa)</b>	1332	1182	1470	1224	1397	1344	8	
<b><math>\nu_{RL}</math></b>	0,126	0,097	0,140	0,103	0,161	0,128	19	0,044
<b><math>\nu_{TL}</math></b>	0,081	0,098	0,106	0,100	0,109	0,101	12	0,027
<b><math>\nu_{LR}</math></b>	0,781	0,617	0,767	0,701	0,964	0,771	16	0,37
<b><math>\nu_{TR}</math></b>	0,385	0,440	0,397	0,412	0,386	0,397	6	0,33
<b><math>\nu_{LT}</math></b>	0,836	1,020	0,952	1,015	0,900	0,951	9	0,50
<b><math>\nu_{RT}</math></b>	0,644	0,722	0,649	0,616	0,533	0,623	12	0,67

Tabela 4.17. Constantes elásticas (módulos de elasticidade longitudinais – E, módulos de elasticidade transversais – G e coeficientes de Poisson –  $\nu$ ) obtidas por ultrassom e valores médios propostos por Bodig e Janyne (1982) (B&J). Espécie: *Pinus pinaster*.

	Amostra							Médias	CV (%)	B&J
	3044	3026	3040	3025	3001	3002	2899			
<b>E<sub>L</sub> (MPa)</b>	12748	13548	13751	12059	12124	9000	13258	12355	13	
<b>E<sub>R</sub> (MPa)</b>	1338	1400	1648	1463	1206	1287	1602	1420	11	
<b>E<sub>T</sub> (MPa)</b>	762	583	733	848	571	637	664	686	15	
<b>G<sub>TR</sub> (MPa)</b>	244	219	227	270	236	238	259	242	7	
<b>G<sub>TL</sub> (MPa)</b>	666	714	753	866	743	852	852	778	10	
<b>G<sub>LR</sub> (MPa)</b>	1110	868	932	1082	1028	1256	1253	1076	14	
<b><math>\nu_{LR}</math></b>	0,78	0,69	0,67	0,82	0,78	0,44	0,81	0,71	19	0,42
<b><math>\nu_{RL}</math></b>	0,08	0,07	0,08	0,10	0,08	0,06	0,10	0,08	16	0,04
<b><math>\nu_{LT}</math></b>	0,43	0,78	0,74	0,48	0,75	0,52	0,91	0,66	27	0,42
<b><math>\nu_{TL}</math></b>	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	17	0,03
<b><math>\nu_{RT}</math></b>	0,71	0,86	0,69	0,64	0,92	0,84	0,85	0,79	13	0,47
<b><math>\nu_{TR}</math></b>	0,41	0,36	0,31	0,37	0,44	0,42	0,35	0,38	12	0,35

Para o *Pinus pinaster*, além do ensaio de ultrassom (Tabela 4.34) realizou-se, também, ensaios de compressão (apenas na direção longitudinal). Os ensaios de compressão foram realizados em corpos de prova de compressão reduzidos, com o objetivo de minimizar o efeito da inclinação dos anéis de crescimento e dos desvios das fibras da madeira na determinação do parâmetro elástico ( $E_{c0}$ ) e dos coeficientes de Poisson ( $\nu_{LR}$  e  $\nu_{LT}$ ). Mesmo nestas condições os resultados dos ensaios apresentaram elevado coeficiente de variação (Tabela 4.18). Somente o coeficiente  $\nu_{LR}$  apresentou CV inferior à 28% (Tabela 4.18).

As médias dos valores de coeficiente de Poisson determinados por ensaio de compressão paralela se aproximaram mais dos valores propostos por Bodig e Jayne (1982), que sugerem para ambos os coeficientes ( $\nu_{LR}$  e  $\nu_{LT}$ ) o valor de 0,42 (coníferas) – Tabela 4.35. No entanto, há grande variação de valores entre os corpos de prova ( $\nu_{LT}$  variou de 0,189 a 0,906 e  $\nu_{LR}$  de 0,190 a 0,531), o que reduz a confiabilidade do resultado. O módulo de elasticidade determinado pelo ensaio de compressão paralela às fibras foi 24% superior que esse mesmo parâmetro determinado por ultrassom (Tabela 4.19). É importante destacar que, quando se compara, em um mesmo corpo de prova, os valores da constante acustoelástica obtidos por ultrassom e por ensaio estático, os obtidos por ultrassom são sempre um pouco superiores. Isso ocorre devido à diferença entre os dois tipos de ensaio (isotérmico e adiabático). No caso desta pesquisa os ensaios foram feitos em peças

retiradas do mesmo lote de material, mas não no mesmo corpo de prova, o que torna sem efeito essa questão.

Tabela 4.18. Resultados dos parâmetros elásticos (módulo de elasticidade longitudinal –  $E_{c0}$  e coeficientes de Poisson -  $\nu_{LT}$  e  $\nu_{LR}$ ) obtidos no ensaio de compressão paralela às fibras para o *Pinus pinaster*.

Identificação	$E_{c0}$ (MPa)	$\nu_{LT}$	$\nu_{LR}$
<b>2061 1D</b>	9515	0,328	0,398
<b>2061 3D*</b>	24408	0,592	0,470
<b>2077 2D</b>	20329	0,459	0,522
<b>2077 3D*</b>	18603	0,906	0,531
<b>2077 3I</b>	25894	0,718	0,374
<b>2084 2D</b>	14619	0,349	0,441
<b>2084 3I*</b>	15075	0,417	0,353
<b>2086 2D</b>	10078	0,234	0,455
<b>2086 3D*</b>	6057	0,189	0,427
<b>2086 3I</b>	8053	0,253	0,190
<b>Média</b>	15263	0,444	0,416
<b>C. V.</b>	45,3%	51,9%	23,6%

\*corpos de prova com anéis levemente inclinados.

Tabela 4.19. Comparação de parâmetros (módulo de elasticidade longitudinal –  $E_{c0}$  e  $E_L$  e coeficientes de Poisson -  $\nu_{LT}$  e  $\nu_{LR}$ ) determinados por ensaio de compressão paralela e por ensaio de ultrassom. Espécie: *Pinus Pinaster*.

	Ensaio	
	Compressão	Ultrassom
$E_{c0}/E_L$	15263 (45,3)	12355 (13,1)
$\nu_{LT}$	0,44 (51,9)	0,66 (27,6)
$\nu_{LR}$	0,42 (23,6)	0,71 (18,8)

\* valores entre parênteses apresentam o coeficiente de variação (%).

Para os eucaliptos os valores de rigidez obtidos por ultrassom só podem ser comparados com os valores para esse parâmetro obtidos em flexão estática (Tabela 4.20), e o coeficiente de Poisson só pode ser comparado com os propostos por Bodig e Jayne (1982). Para o coeficiente de

Poisson verificou-se o mesmo comportamento obtido no caso do *Pinus pinaster* – valores mais elevados dos que as médias propostas por Bodig e Janyne (1982). Para o módulo de elasticidade verifica-se diferenças médias em torno de 20% entre os valores obtidos por ultrassom e por flexão estática (Tabela 4.20). Essa diferença, no entanto, pode ser considerada normal, em função da variabilidade da madeira.

Tabela 4.20. Valores médios e coeficientes de variação para o módulo de elasticidade longitudinal ( $E_M$ ), obtido por ultrassom e por flexão estática.

Espécie	$E_M$ (MPa)	
	Ultrassom	Flexão estática
<i>Eucalyptus grandis</i>	8034 (26,8%)	11160 (6%)
<i>Corymbia citriodora</i>	14015 (5,5%)	12826 (2%)
<i>Eucalyptus pellita</i>	10402 (25,6%)	11948 (6%)

\* valores entre parênteses apresentam o coeficiente de variação.

Em peças unidimensionais, como por exemplo uma barra longa e fina, a velocidade de propagação de ondas de ultrassom poderia ser diretamente correlacionada com o módulo de elasticidade ( $E$ ) e a densidade ( $\rho$ ) por meio da equação  $V = (E/\rho)^{1/2}$ , podendo ser desprezada a influência do coeficiente de Poisson. No entanto, em peças com maior volume, a onda não é unidirecional, e o coeficiente de Poisson poderia interferir no valor da velocidade em uma peça submetida a tensões. Assim, o objetivo da caracterização do pinus e do eucalipto foi determinar os coeficientes de Poisson  $\nu_{LT}$  e  $\nu_{LR}$  que poderiam estar influenciando a propagação das ondas de ultrassom nas árvores.

Assim, os valores dos coeficientes de Poisson obtidos para as 3 espécies de eucalipto foram inseridos nos modelos de predição da velocidade na tora a partir da velocidade na árvore, pois para o eucalipto, foi possível levantar os coeficientes de Poisson para as 6 árvores, sendo duas de cada espécie de eucalipto.

Já para o *Pinus pinaster*, o levantamento do coeficiente de Poisson foi realizado em corpos de prova da mesma espécie fornecidos durante estágio no exterior, mas não para as árvores ensaiadas. Dessa forma, não foi possível utilizar os valores obtidos para esse parâmetro nos modelos de ajuste da velocidade na árvore. Porém, o resultado do coeficiente de Poisson obtido pelo ensaio de compressão foi inserido na Equação 2.2 utilizada por Wang *et al.* (2007b) com o

intuito de minimizar as diferenças de velocidade entre a árvore e a tora. Não foi possível aplicar os resultados para o coeficiente de Poisson obtido por ultrassom, pois para que se possa utilizar a Equação 2.2, o valor do coeficiente de Poisson deve ser menor que 0,5, caso contrário gerará uma raiz de número negativo (para o *Pinus pinaster* o valor médio dos coeficientes de Poisson LT e LR obtidos por ultrassom foi 0,69), inviabilizando o uso da equação indicada. Esse fato também justifica a impossibilidade de utilização dessa equação para as espécies de eucalipto (o valor médio dos coeficientes de Poisson LT e LR obtidos por ultrassom foi de 0,74).

Considerando a substituição do valor médio do coeficiente de Poisson LT e LR ( $\nu = 0,43$ ) obtido do ensaio de compressão para o *Pinus pinaster* na primeira parte da equação, obtém-se como resultado o valor de 1,69, o que indica que a velocidade na árvore seria 69% superior que a velocidade na tora. No entanto, considerando os resultados obtidos nesta pesquisa para as três árvores de *Pinus pinaster*, a velocidade na árvore foi, em média, apenas 7% superior que a velocidade na tora. Para obter valores de velocidade na árvore da ordem de 5% superiores aos da tora os coeficientes de Poisson teriam que ser muito menores dos que os obtidos, da ordem de 0,20, que é muito baixo para as direções consideradas (LR e LT). Uma possível explicação para as diferenças de velocidade (árvore/tora) não serem tão grandes pode estar relacionada com a acustoelasticidade. Se em geral a velocidade na peça sob tensão tende a ser menor do que na peça livre de tensões, poderia estar havendo uma compensação em relação ao aumento da velocidade em função do coeficiente de Poisson.

Para explicar melhor a causa fundamental do desvio de velocidade na árvore, Wang *et al.* (2007b) introduziram o conceito de estimar o coeficiente de Poisson com base nas medições acústicas realizadas em toras e em árvores. Devido ao fato de não ser conhecido o coeficiente de Poisson para madeiras saturadas, como no caso dos troncos das árvores, Wang *et al.* (2007b) propõem valor para o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) baseado em dados empíricos, assumindo que a onda percorre o tronco da árvore como uma onda tridimensional. A relação entre velocidades (árvore/tora) obtidas para cinco espécies de coníferas (*Picea sitchensis*, *Tsuga heterophylla*, *Pinus banksiana*, *Pinus ponderosa*, *Pinus radiata*) corresponderam a um coeficiente de Poisson LR variando de 0,222 a 0,378, com média de 0,322. O ajuste da velocidade na árvore com o coeficiente de Poisson foi efetivo indicando que a velocidade acústica medida em árvores é a velocidade da onda tridimensional (WANG *et al.* 2007b).

As referências apresentadas neste item indicam que o coeficiente de Poisson pode, efetivamente, ser uma das causas das diferenças de velocidade entre árvores e toras. Esta indicação foi utilizada como base para a decisão de inserir este parâmetro no modelo de correção da velocidade na árvore.

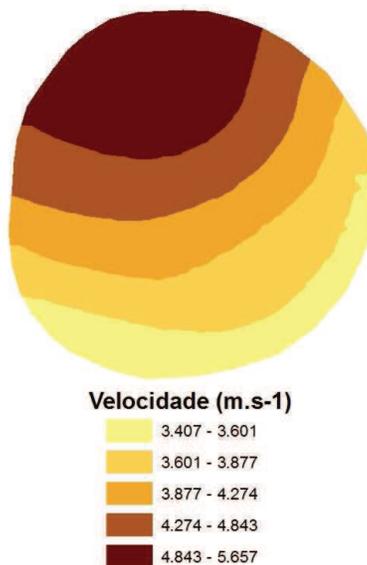
#### ***4.4.3 Dispersão da onda de ultrassom***

Para a geração dos mapas de dispersão foram utilizadas 5 zonas, que representam, por meio de diferentes cores, faixas de velocidade (Figuras 4.17b, 4.18, 4.19) obtidas na seção transversal mais próxima da base da árvore (maior diâmetro). Denominamos zona 1 as de menores velocidades e com cores mais claras e de zona 5 as de maiores velocidades e com cores mais escuras.

O comportamento dos mapas de dispersão foi semelhante para todas as toras ensaiadas tanto as toras das espécies de eucalipto como as toras de *Pinus pinaster*, indicando que as maiores velocidades são obtidas na face de medição (neste caso a face superior). Exemplos do comportamento da dispersão são apresentados nas Figuras 4.18 (*Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita*) e Figura 4.19 (*Pinus pinaster*), mas todos os mapas gerados para as demais toras encontram-se nas Figuras II.1 a II.4 do ANEXO II.

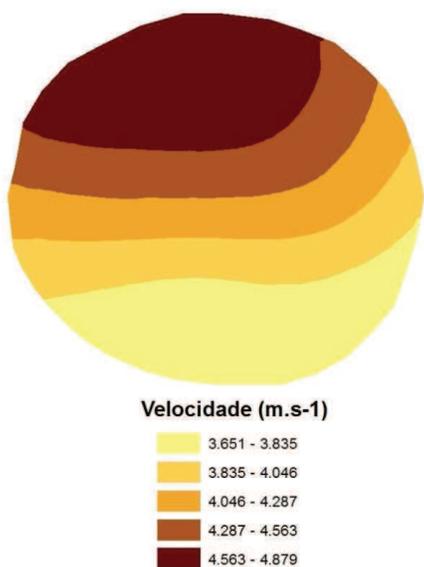


a

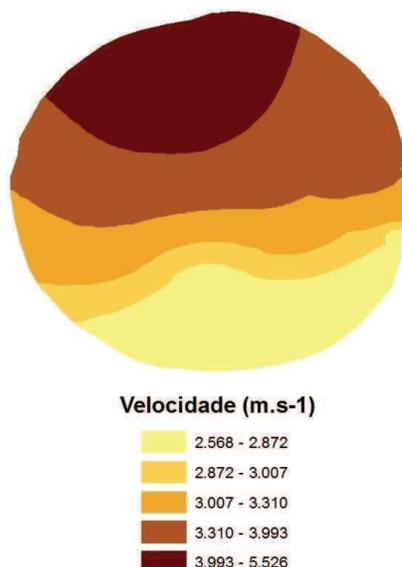


b

Figura 4.17. Localização da face superior na seção transversal da tora durante o ensaio de dispersão (a) e mapa de dispersão da velocidade na seção transversal da tora de *Eucalyptus grandis* (amostra 1).



a



b

Figura 4.18. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de *Corymbia citriodora* (amostra 4) - a e de *Eucalyptus pellita* (amostra 1) - b.

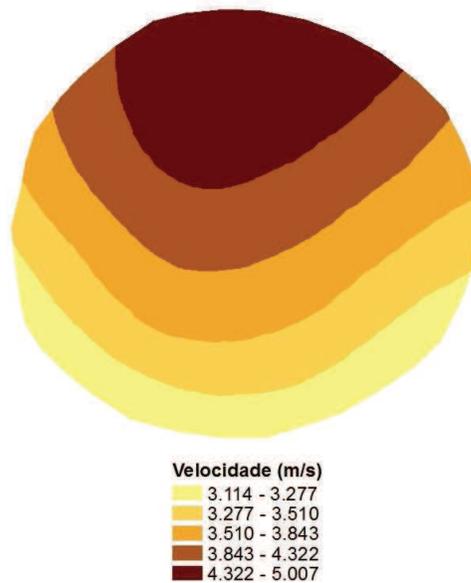


Figura 4.19. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de *Pinus pinaster* (amostra 2).

Para as árvores da espécie de eucalipto, na maioria dos casos a velocidade máxima na tora (utilizando a simulação da medição superficial) foi superior a velocidade obtida por meio do ensaio superficial na árvore. As amostras 2 (Figura II.2b do Anexo) e 3 (Figura II.2c do anexo) de *Corymbia citriodora* e a amostra 2 (Figura II.3ª do anexo) de *Eucalyptus pellita* apresentaram o valor máximo de velocidade na tora (utilizando a simulação da medição indireta) próximo da leitura de ultrassom na árvore (ensaio superficial). Somente para caso da amostra 4 (Figura 4.18a) de *Corymbia citriodora* a velocidade máxima na tora (utilizando a simulação da medição indireta) foi inferior ao valor da velocidade obtida por meio do ensaio indireto na árvore. Esse comportamento poderia ser atribuído ao efeito da acustoelasticidade e do coeficiente de Poisson, pois estaria sendo utilizado o mesmo tipo de ensaio (indireto) nas peças, sendo portanto o estado de tensões provocado pelo peso da árvore a diferença entre elas. Os ensaios de acustoelasticidade indicaram que, em geral, a velocidade na peça com carregamento externo foi menor do que na peça livre de tensões externas, coincidindo, portanto, com o resultado obtido neste ensaio. No caso do coeficiente de Poisson, no entanto, se esperaria resultado contrário, já que a peça com carregamento externo teria velocidade maior do que a livre de tensões externas (Equação 2.2).

As velocidades obtidas no ensaio indireto da árvore viva de *Pinus pinaster* foram superiores às máximas velocidades obtidas no ensaio indireto na tora recém abatida. Para esta espécie não foram realizados ensaios de acustoelasticidade, de forma que não há como discutir esta questão. Considerando o coeficiente de Poisson (Equação 2.2) os resultados estariam condizentes com a condição de carregamento.

Denominando as faixas de velocidade, representadas pelas cores, como zonas 1 (cor mais clara) a 5 (cor mais escura) – Figuras 4.17a a 4.19 foi analisado o enquadramento das velocidades obtidas nos ensaios diretos nas toras (Tabela 4.21).

Tabela 4.21. Velocidades médias obtidas em ensaios na árvore viva (superficial -  $V_a$ ) e nas toras recém abatidas (longitudinal -  $V_t$ ).

Espécie	Amostra	$V_a$ (m.s <sup>-1</sup> )	$V_t$ (m.s <sup>-1</sup> )
<i>Eucalyptus grandis</i>	1	5110	3700
	2	5110	3928
	3	5110	4098
<i>Corymbia citriodora</i>	1	5991	3976
	2	5991	4059
	3	5991	4109
	4	5251	3591
<i>Eucalyptus pellita</i>	1	5162	3779
	2	4685	2654
	3	4685	3469
<i>Pinus pinaster</i>	1	5510	4129
	2	5409	4285
	3	5531	4205

As velocidades médias, determinadas por meio das medições indiretas nas árvores e diretas nas toras recém abatidas (Tabela 4.21) confirmam o comportamento que já vem sendo observado por diversos autores, de que a velocidade obtida na árvore (ensaio superficial) é superior à velocidade obtida na tora (ensaio longitudinal), mesmo que recém abatida (WANG *et al.*, 2007b; WANG *et al.*, 2007a; ZHANG *et al.*, 2011; MOORE e LYON, 2008 e GONÇALVES *et al.*, 2011a). No caso da árvore de *Eucalyptus grandis* a diferença média foi de 31%, para as árvores de *Corymbia citriodora*, a diferença média foi de 46%, muito próxima da diferença média para as árvores de *Eucalyptus pellita* (47%). Para as 3 árvores de *Pinus pinaster* a diferença média foi de 30%.

As velocidades obtidas em ensaios longitudinais nas toras das espécies de eucalipto foram distribuídas nas diferentes zonas, não se enquadrando em nenhum caso na zona 5 (velocidades máximas obtidas nos ensaios das toras simulando as medições superficiais). Em 30% das amostras as velocidades se situaram na zona 1, em 20% na zona 2, 20% na zona 3, 10% na zona 4 e 20% apresentaram velocidades inferiores a mínima velocidade presente no mapa de dispersão, não se enquadraram em nenhuma zona. Considerando que o efeito acustoelástico depende do estado de tensões a que o material está submetido, e que o estado de tensões nas árvores depende das dimensões das árvores (altura e diâmetro) e das características da copa (diferentes pesos), mais uma vez o comportamento poderia ser atribuído à acustoelasticidade.

Para o *Pinus pinaster* o comportamento foi menos diferenciado, pois as velocidades obtidas em ensaios diretos nas toras se situaram na zona 4 para as três toras, indicando que nos pontos de leitura na árvore viva a velocidade obtida de forma indireta (onda superficial) é cerca de 13% superior à obtida de forma direta (onda longitudinal), mesmo considerando igual situação de carregamento (tora recém abatida).

Os mapas de velocidade na seção transversal das toras comprovaram a dispersão da onda e mostraram que, mesmo considerando condições iguais de medição (tora), as maiores velocidades foram captadas na região superior da seção transversal, local onde na prática são realizadas as medições nas árvores vivas. Tendo em vista a velocidade na árvore e o comportamento da dispersão da onda obtido na simulação do ensaio indireto na tora, conclui-se que parcela da variação da velocidade é devida a aspectos não ligados à forma de propagação da onda.

#### **4.5 Ensaio Superficiais na Tora**

Os ensaios superficiais na tora foram propostos com o objetivo de tentar compreender os mecanismos de propagação superficial da onda, ensaio realizado na árvore em pé, sendo realizado no material livre de tensões externas (tora). Dessa forma, nesse capítulo foi feita a comparação entre o ensaio de ultrassom realizado na árvore e o ensaio superficial de ultrassom realizado na tora.

A velocidade na árvore é superior à velocidade superficial na tora (Figura 4.20). Enquanto a diferença entre a velocidade na árvore e na tora (medição direta) para as espécies de eucalipto foi em média 27% a velocidade na árvore foi em média 16% superior que a velocidade superficial na

tora (Figura 4.20). Para o *Pinus pinaster* a velocidade na árvore foi 6% superior que a velocidade longitudinal na tora (medição direta) e apresentou valor muito próximo da velocidade superficial na tora (diferença entre velocidades de 1%) (Figura 4.20).

Para as espécies de eucalipto o ensaio superficial na tora foi, em média, 12,5% superior que o ensaio longitudinal na tora, resultado muito próximo aos obtidos por Grabianowski *et al.* (2006), os quais apresentaram resultados para o ensaio superficial na tora 12% superiores que o ensaio longitudinal na tora. A diferença entre as velocidades superficial na tora e longitudinal na tora de 10% obtida por Wang (1999), em revisão de Wang (2013), foi superior à apresentada para o *Pinus pinaster* nessa pesquisa (4,8%).

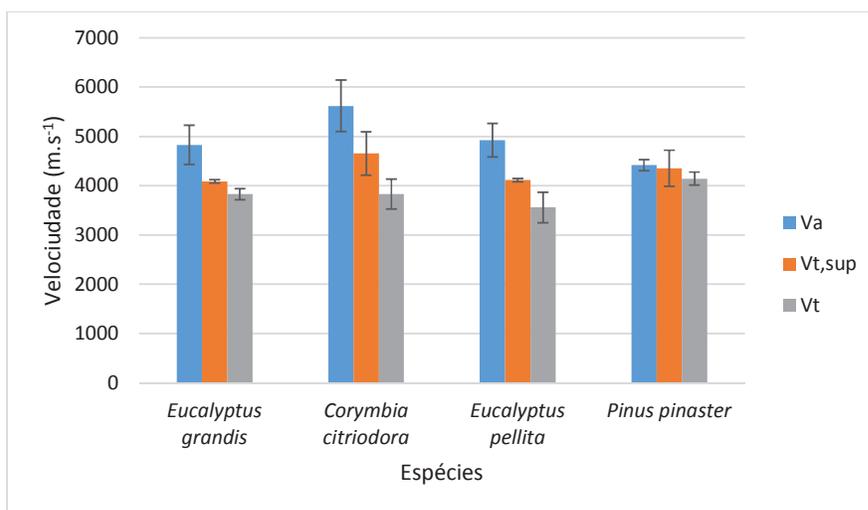


Figura 4.20. Valores de velocidade na árvore (Va), por espécie, velocidade superficial na tora (Vt,sup) e velocidade longitudinal na tora (Vt).

Era esperado que considerando apenas o resultado do ensaio de ultrassom superficial nas toras retiradas da base da árvore, coincidente com o local onde é realizado o ensaio na árvore, a diferença entre a velocidade na árvore e a velocidade superficial na tora fosse reduzida, porém este comportamento não foi verificado (Figura 4.21).

Quando considerou-se somente as toras da base e não mais a média das toras retiradas da árvore a diferença da velocidade na árvore e a velocidade superficial nas toras de eucalipto aumentou para 30% enquanto que a diferença entre velocidades na árvore e a velocidade superficial na tora da base para o *Pinus pinaster* aumentou para 5%.

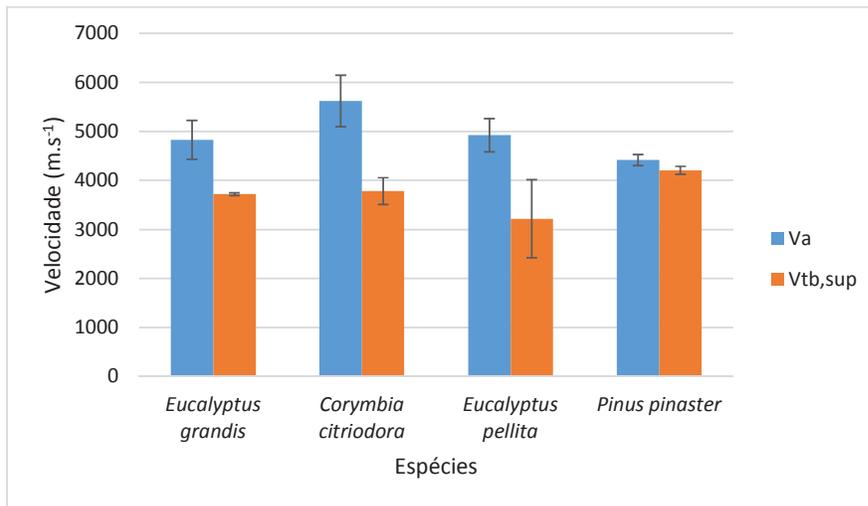


Figura 4.21. Velocidade na árvore ( $V_a$ ) e velocidade superficial na tora da base ( $V_{tb,sup}$ ).

Esses resultados indicam que possivelmente a variação de velocidade existente entre a árvore e a tora não está associada apenas à posição de leitura, mas sim ao fato da árvore estar sob tensões externas (peso do tronco e da copa), o que faz com que a velocidade seja maior nessa condição (influência do coeficiente de Poisson e da acustoelasticidade).

#### 4.6 Influência da Posição de Medição, do Diâmetro da Árvore e da Densidade da Madeira na Condição Saturada no Modelo de Predição da Velocidade de Propagação de Ondas na Tora a partir da Velocidade na Árvore

Para essa análise foi utilizada a amostragem total da pesquisa, ou seja, 40 árvores e 143 toras, distribuídas entre as espécies de eucalipto (*Eucalyptus grandis*, *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus resinifera*) e as espécies de pinus (*Pinus pinaster* e *Pinus elliottii*).

A relação numérica ( $k$ ) entre as velocidades (árvore/tora) variou entre espécies (Figura 4.22), tanto quando se considera o valor médio de velocidade de todas as toras retiradas da árvore, quanto quando se considera apenas a velocidade na tora da base. Como as medições nas árvores são realizadas apenas na base do tronco, a tora da base é a única que contém a zona de medição do ensaio na árvore.

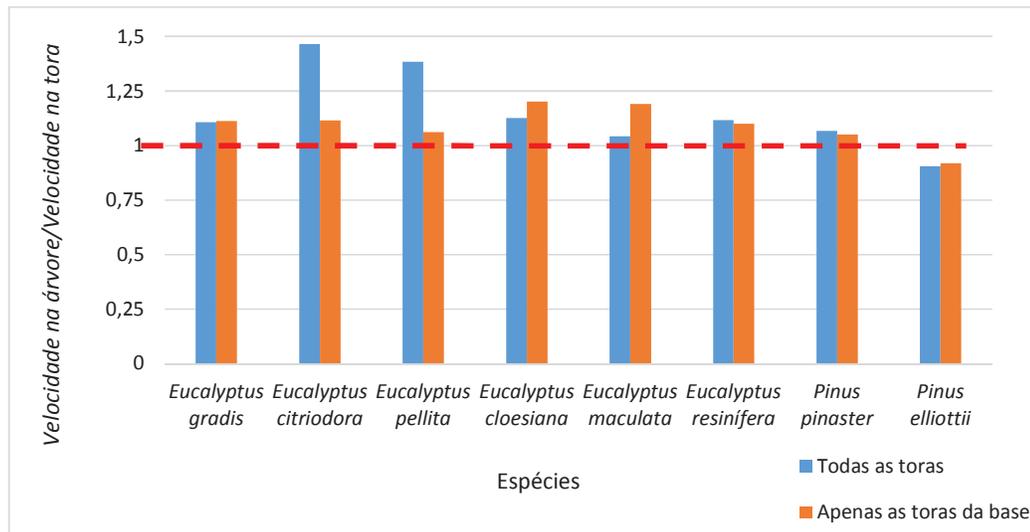


Figura 4.22. Relação média, por espécie, entre velocidade na árvore e velocidade na tora considerando todas as toras retiradas da árvore e somente as toras da base.

Os resultados dessa pesquisa mostram que a velocidade na árvore ( $V_a$ ) é numericamente diferente que a velocidade na tora ( $V_t$ ) e que, a velocidade na árvore é maior que a velocidade na tora (Figura 4.22), tanto quando é considerado todas as toras (relação média = 1,07 considerando todas as espécies) quando considera-se somente as toras da base (relação média = 1,07 considerando todas as espécies). A única exceção ocorreu para as árvores de *Pinus elliottii* com pequeno diâmetro (184 mm a 242 mm). Sasaki *et al.* (1998) relatou que para algumas espécies de coníferas a velocidade tende a diminuir com o aumento do carregamento. Em árvores com pequeno diâmetro, onde a equação da onda unidimensional tem maior validade (WANG, 2013), a relação ( $k$ ) entre velocidades (árvores/toras) são menores e o fenômeno da acustoelasticidade supera outros efeitos. Além disso, a presença excessiva de galhos próximos à atura do peito também podem explicar a redução da velocidade na árvore para essa espécie. Resultados semelhantes foram obtidos por Chauhan e Walker (2006), mencionados no artigo de revisão de Wang (2013).

Wang *et al.* (2007b) avaliaram 352 árvores de 5 diferentes espécies e retiraram de cada árvore uma tora de 3,66 metros a partir da base. Os autores obtiveram valores para a relação média ( $k$ ) entre velocidades na árvore/tora de 1,20 considerando todas as espécies, sendo que a menor relação entre velocidades foi apresentada pelo *Pinus radiata* (1,07) e o maior valor para a relação foi apresentada pelo *Pinus ponderosa* (1,36). A relação entre velocidades (árvore/tora) para a *Picea*

*sitchensis*, para a *Tsuga heterophylla* e para o *Pinus banksiana* apresentaram valores próximos, variando de 1,22 a 1,24. Gonçalves *et al.* (2011a) obtiveram valor médio de 1,11 para a relação (k) entre a velocidade ultrassom obtida na árvore e a velocidade de ultrassom obtida na tora saturada, sendo a mínima relação obtida para o *Pinus elliottii* (0,90) e a máxima para clones de *Eucalyptus* e para o *Eucalyptus grandis* (1,15). Esses valores foram obtidos pelos autores (GONÇALVES *et al.*, 2011a) a partir da avaliação de 4 diferentes espécies (clones de *Eucalyptus*, *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* e *Toona ciliata*). Wang (2013) apresenta uma revisão com resultados de muitos autores com a relação entre velocidades árvore-tora (k) variando de 1,07 a 1,35.

As medições na árvore são realizadas na base do tronco, no entanto em aplicações práticas deste método, o que se quer é antecipar o conhecimento das propriedades de toda a madeira proveniente da árvore, e não somente da madeira proveniente da base. Os resultados desta pesquisa indicaram que a posição de medição coincidente com a posição de retirada da tora reduziu a diferença numérica de velocidades (árvore/tora) apenas para aproximadamente metade das árvores. Esse resultado indica que a medição coincidente na árvore (na base do tronco) e na tora produziu um resultado aleatório de diferenças de velocidades (árvores e toras). Esse resultado foi estatisticamente comprovado (nível de confiança de 95%) pois mostrou não haver diferença (P-valor do teste t = 0,52) entre as relações de velocidades árvore/tora. Caso o fenômeno de acustoelasticidade estivesse influenciando a velocidade na árvore, seria esperado que a diferença de velocidade entre árvores e toras fosse maior para a tora da base, pois essa é a tora mais carregada da árvore. Porém, a magnitude do carregamento depende da altura e do tamanho da copa da árvore. Essas características são muito variáveis entre espécies e também entre árvores da mesma espécie.

Análise estatística (nível de confiança de 95%) mostrou haver diferenças significativas entre velocidade obtidas nas árvores e em todas as toras da árvore (P-valor do teste t = 0,003). O mesmo resultado estatístico foi obtido usando as velocidades nas árvores e apenas as velocidades nas toras da base (P-valor do teste t = 0,002).

Embora os resultados de velocidade na árvore e de velocidade nas toras dela extraídas não sejam numericamente ou estatisticamente equivalentes, a correlação linear entre estes parâmetros foi estatisticamente significativa (P-valor = 0,000), tanto considerando todas as toras quanto considerando apenas as toras da base (Figura 4.23). O coeficiente de correlação da regressão da velocidade na árvore e todas as toras dela retiradas foi inferior (R = 0,89) do que à regressão entre a velocidade na árvore e apenas as toras da base (R = 0,92). O erro de predição do modelo utilizando

apenas as toras da base foi inferior ( $415 \text{ m.s}^{-1}$ ) quando comparado ao modelo gerado utilizando todas as toras da árvore ( $428 \text{ m.s}^{-1}$ ).

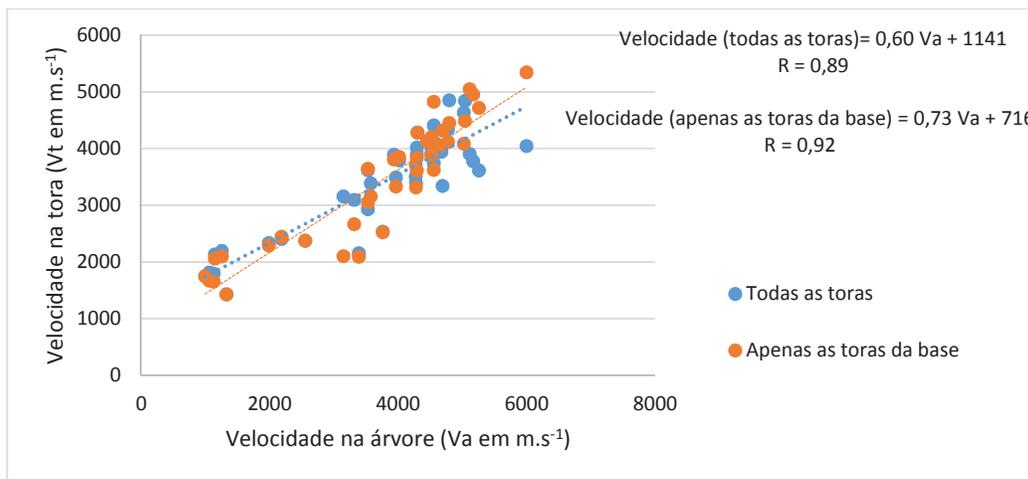


Figura 4.23. Modelos de predição da velocidade na tora à partir da velocidade na árvore.

Wang *et al.* (2007b) apresentam modelo de regressão linear para correlacionar a velocidade na árvore e na tora com coeficiente de correlação (R) variando entre 0,84 e 0,97. O coeficiente de correlação (R) obtido por Bertoldo (2011) para a regressão entre velocidade na árvore e na tora foi de 0,91. Gonçalves *et al.* (2011a) obtiveram coeficientes de correlação de 0,93 para os modelos lineares entre a velocidade de ultrassom na árvore e a velocidade de ultrassom na tora. Chauhan e Walker (2006) obtiveram boa correlação, com R variando de 0,86 a 0,95, para a regressão entre a velocidade na árvore, obtida utilizando equipamento Fakopp, e a velocidade nas toras, obtidas por equipamento de ressonância (Hitman), provenientes das árvores recém cortadas.

Para os resultados obtidos nesta pesquisa a velocidade na árvore explica 79% da variação da velocidade na tora, quando se utiliza na regressão a média de todas as toras retiradas de cada árvore, e 85% quando se utilizam na regressão apenas os valores obtidos nas toras da base (Figura 4.23). Os resultados de diversos autores apresentados em artigo de revisão de Wang (2013), possuíam  $R^2$  variando de 71% a 93%. Tendo em vista que mesmo para as toras da base a velocidade na árvore não explica 100% da variabilidade da velocidade nas toras, é possível evidenciar que há outros parâmetros influenciando na propagação das ondas nas duas formas do material (árvores e toras), sendo responsável pela diferença de resultados de velocidade.

Dessa forma foram selecionados o diâmetro na altura do peito (DAP) e a densidade na madeira na condição saturada ( $\rho$ ) como parâmetros a serem inseridos nos modelos de regressão entre a velocidade na árvore e as velocidades na tora, com o objetivo de minimizar a diferença entre velocidades e melhorar o ajuste do modelo de previsão da velocidade na tora a partir da velocidade na árvore. Esses parâmetros (DAP e  $\rho$ ) foram escolhidos por serem muito utilizados pelo setor florestal para estimar a qualidade da madeira que a árvore irá fornecer. Todos os modelos gerados utilizando todas as toras retiradas das árvores foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% (Tabela 4.22). O DAP foi estatisticamente significativo nos modelos e a inclusão desse parâmetro aumentou o  $R^2$  e diminuiu o erro da regressão (Tabela 4.22). Por outro lado, a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) não foi estatisticamente significativa em nenhum dos modelos e sua inclusão não melhorou nem o  $R^2$  e nem o erro de predição (Tabela 4.22).

Quando foi considerada somente a tora da base na regressão, somente a velocidade na árvore foi estatisticamente significativa para o modelo (Tabela 4.23). O DAP e a  $\rho$  (saturada) não foram significativos em nenhum modelo e a inserção destes parâmetros de forma isolada não melhorou o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que permaneceu em 85% (Tabela 4.23). Considerando o modelo completo (com inserção do DAP e da  $\rho$ ) o erro de predição diminuiu pouco (1% - Tabela 4.23). Para esse caso (toras da base) o resultado para o DAP era esperado, uma vez que esse dado foi obtido da base do tronco, coincidente com a tora da base.

Tabela 4.22. Modelos de predição da velocidade na tora ( $V_{tm}$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor,  $R^2$  e Erro).

Variáveis independentes	Modelo	P-valor			R <sup>2</sup> (%)	Erro (m.s <sup>-1</sup> )	
		V <sub>a</sub> (m.s <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	DAP (m)			Modelo
V <sub>a</sub>	$V_{tm} = 1141 + 0,60 \cdot V_a$	-	-	-	0,00	79	428
V <sub>a</sub> e $\rho$	$V_{tm} = 1476 + 0,56 \cdot V_a - 0,17 \cdot \rho$	0,00	0,52	-	0,00	79	431
V <sub>a</sub> e DAP	$V_{tm} = 671 + 0,46 \cdot V_a + 27,6 \cdot \text{DAP}$	0,00	-	0,00	0,00	85	365
V <sub>a</sub> , $\rho$ e DAP	$V_{tm} = 972 + 0,50 \cdot V_a - 0,26 \cdot \rho + 21,6 \cdot \text{DAP}$	0,00	0,35	0,00	0,00	85	366

Tabela 4.23. Modelos de predição da velocidade na tora da base ( $V_{tb}$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor,  $R^2$  e Erro).

Variáveis independentes	Modelo	P-valor			R <sup>2</sup> (%)	Erro (m.s <sup>-1</sup> )	
		V <sub>a</sub> (m.s <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	DAP (m)			Modelo
V <sub>a</sub>	$V_{tb} = 716 + 0,73 \cdot V_a$	-	-	-	0,00	85	415
V <sub>a</sub> e $\rho$	$V_{tb} = 1447 + 0,67 \cdot V_a - 0,51 \cdot \rho$	0,00	0,24	-	0,00	85	414
V <sub>a</sub> e DAP	$V_{tb} = 787 + 0,66 \cdot V_a + 4,65 \cdot \text{DAP}$	0,00	-	0,29	0,00	85	413
V <sub>a</sub> , $\rho$ e DAP	$V_{tb} = 1349 + 0,64 \cdot V_a - 0,54 \cdot \rho + 5,57 \cdot \text{DAP}$	0,00	0,26	0,32	0,00	85	412

A velocidade ajustada (modelo incluindo a velocidade na árvore e o DAP) foi correlacionada com as velocidades experimentais de todas as toras (Figura 4.24). As regressões indicaram que a velocidade ajustada explicou 85% da velocidade experimental considerando o total das toras retiradas das árvores. Esse resultado permitiu concluir que com a inclusão do DAP no modelo de predição da velocidade na tora, o coeficiente de correlação foi igual ao modelo de predição utilizando somente as toras da base. O restante da variabilidade da velocidade na tora, que não foi explicada pela velocidade na árvore e pelo DAP, deve estar relacionado com outros parâmetros, já discutidos anteriormente.

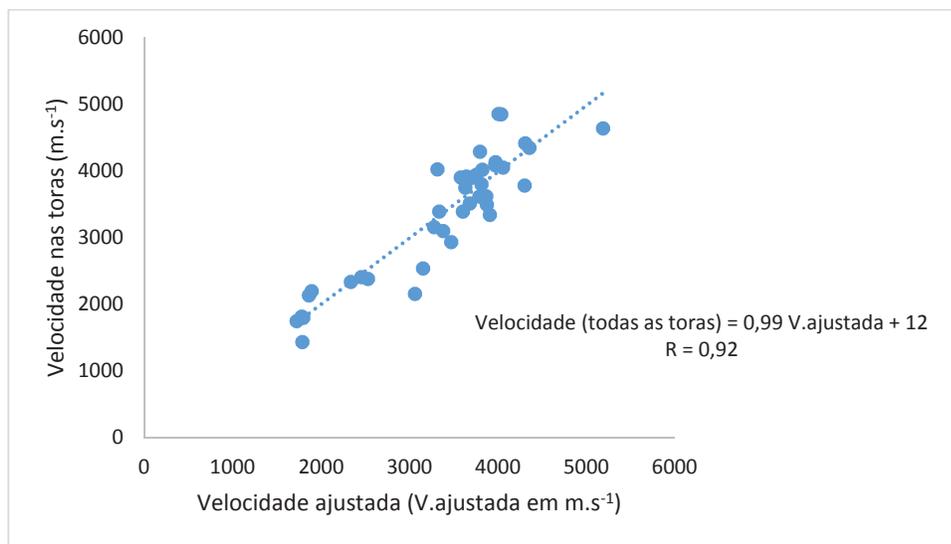


Figura 4.24. Modelos de predição da velocidade na tora a partir da velocidade ajustada.

De forma geral, com o uso da velocidade ajustada, a diferença entre a velocidade média prevista para as toras e a velocidade média experimental (Figura 4.25) foram reduzidas de 1,07 para 1,02. Esse resultado confirma que o uso da velocidade na árvore, associado com informações de DAP melhoram a condição de predição da velocidade na tora, e, conseqüentemente, da previsão de propriedades da madeira.

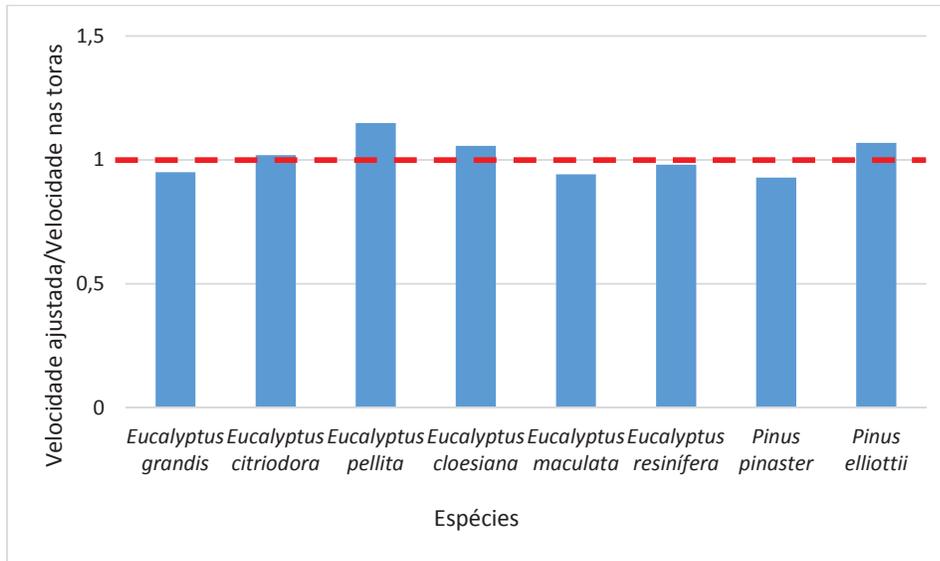


Figura 4.25. Relação média, por espécie, entre velocidade ajustada na árvore e velocidade na tora considerando todas as toras retiradas da árvore.

#### 4.7 Influência do Diâmetro da Árvore e da Densidade da Madeira na Condição Saturada no Modelo de Predição da Velocidade de Propagação de Onda na Viga Saturada, e nos Modelos de Predição das Propriedades de Resistência e de Rigidez da Madeira a partir da Velocidade na Árvore

Para essa análise foram usadas as árvores da espécie de eucalipto (*Eucalyptus grandis*, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita*) e de pinus (*Pinus elliotti* e *Pinus pinaster*) das quais as toras obtidas destas árvores foram desdobradas em vigas. Dessa forma, a amostragem utilizada foi composta de 26 árvores e de 452 vigas.

Tendo em vista que as vigas foram ensaiadas assim que a tora recém abatida foi desdobrada e, portanto em condições de umidade próximas às da árvore, caso não houvesse nenhum parâmetro de interferência, os resultados de velocidade na árvore e de velocidade média nas vigas retiradas da árvore seriam numericamente próximos, pois se trata da mesma estrutura anatômica e da mesma rigidez. No caso desta pesquisa a relação numérica (k) entre as velocidades (árvore/viga) variou entre espécies (Figura 4.26).

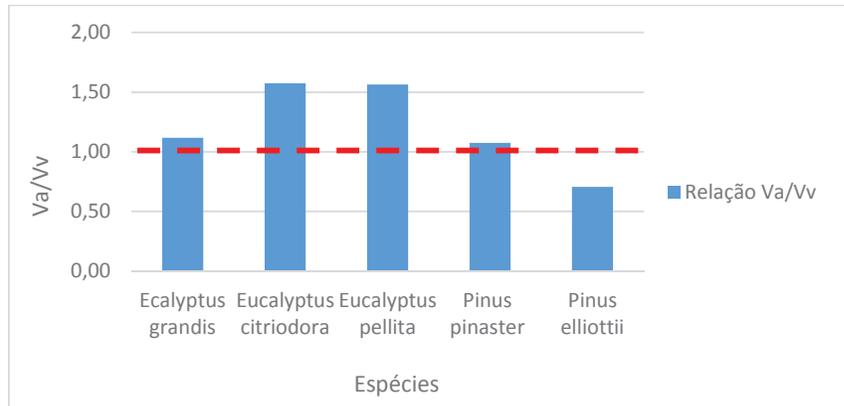


Figura 4.26. Velocidade de ultrassom na árvore ( $V_a$ ) e na viga saturada ( $V_v$ ).

Os resultados de velocidade de ultrassom na árvore ( $V_a$ ) foram diferentes da velocidade média de ultrassom das vigas saturadas ( $V_v$ ) retirada da árvore sendo que, a velocidade na árvore foi maior que a velocidade na viga saturada (Figura 4.26). A única exceção ocorreu para as árvores de *Pinus elliottii* com pequeno diâmetro (184 mm a 242 mm), da mesma forma como ocorreu para essa espécie na comparação entre a velocidade na árvore e na tora. Este resultado pode estar associado à acustoelasticidade que, para algumas espécies, indicam que a velocidade tende a diminuir com o aumento do carregamento. Outra explicação pode estar ligada à presença excessiva de galhos próximos à atura do peito, que também podem explicar a redução da velocidade na árvore para essa espécie. A relação ( $k$ ) média entre velocidades (árvore/viga), considerando todas as árvores de todas as espécies foi de 0,99, essa relação apresentou valor menor que 1,0 devido às árvores de *Pinus elliottii* de pequeno diâmetro. Desconsiderando essas árvores de *Pinus elliottii*, a relação ( $k$ ) média entre a velocidade na árvore e na viga saturada foi de 1,15.

Apesar das diferenças numéricas, a análise estatística (nível de confiança de 95%) indicou não haver diferenças entre a velocidade obtida nas árvores e as velocidades obtidas nas vigas saturadas provenientes das árvores (P-valor do teste  $t = 0,871$ ). Este resultado estatístico pode ter sido influenciado pela grande variabilidade da amostra, pois fica evidente que para o *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita* as diferenças numéricas são grandes (Figura 4.26).

A correlação linear entre as velocidades nas árvores e nas vigas foi estatisticamente significativa (P-valor = 0,0001), ao nível de significância de 5%, mas o coeficiente de correlação foi moderado (Figura 4.27), indicando que a velocidade na árvore explica apenas 47,8% da variação da velocidade na viga. Dessa forma, fica evidente que há outros parâmetros influenciando na propagação das ondas nas duas formas do material (árvores e vigas), sendo

responsável pela diferença de resultados de velocidade. Bertoldo (2011) obteve o valor de 57% para o coeficiente de determinação da regressão entre velocidade na árvore e a velocidade na viga saturada. Esse valor foi obtido pelo autor (BERTOLDO, 2011) a partir da avaliação de 2 diferentes espécies (*Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*).

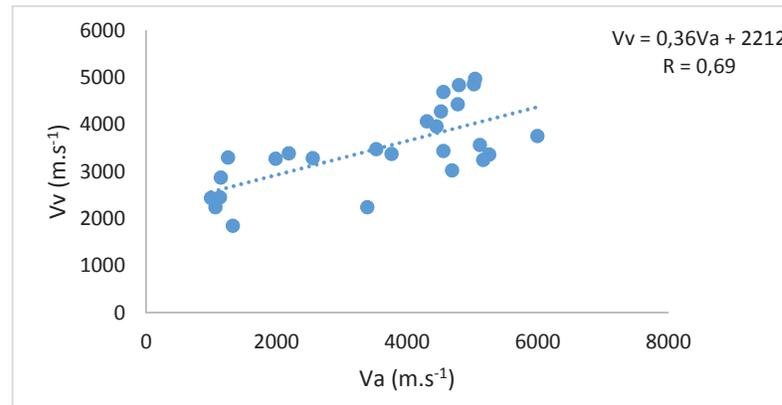


Figura 4.27. Relação entre a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e a velocidade retirada de todas as vigas da árvore ( $V_v$ ).

Ao considerar cada uma das vigas de forma isolada é de se esperar que a velocidade obtida diretamente na viga prediga com muito maior precisão suas propriedades de resistência ( $f_m$ ) e de rigidez ( $E_M$ ) quando comparado com a predição das propriedades a partir da velocidade na árvore. A comparação direta dos valores de coeficientes de correlação não é válida, pois ao considerar a amostra contendo todas as vigas e todos os valores de  $f_m$  e de  $E_M$  a amostra tem 451 pares de valores, enquanto considerando a média dos valores obtidos das vigas de cada árvore o número de pares é de 26. A significância do coeficiente de correlação não é independente do número de pares de valores que são considerados no modelo. Quanto maior a amostra menor a exigência para considerar o valor do coeficiente de correlação significativo. A redução da amostra aumenta de forma exponencial o valor do coeficiente de correlação considerado significativo.

Ao considerar os valores médios obtidos nas vigas retiradas de cada árvore as diferenças de correlação obtidas com a velocidade na árvore ou na viga devem ser menores. Os resultados desta pesquisa indicaram que os coeficientes de correlação entre velocidade na árvore e as propriedades obtidas de forma estática ( $f_m$  e  $E_M$ ) e entre valores médios de velocidade na viga e as propriedades obtidas de forma estática ( $f_m$  e  $E_M$ ) foram muito próximos, sendo as diferenças menores que 5% (Figura 4.28). Como esperado, os resultados de módulo

de elasticidade são melhores explicados pela velocidade do que os resultados de resistência. A velocidade na árvore explica 62% da resistência e 67% do módulo de elasticidade enquanto a velocidade na viga explica 58% da resistência e 74% do módulo de elasticidade.

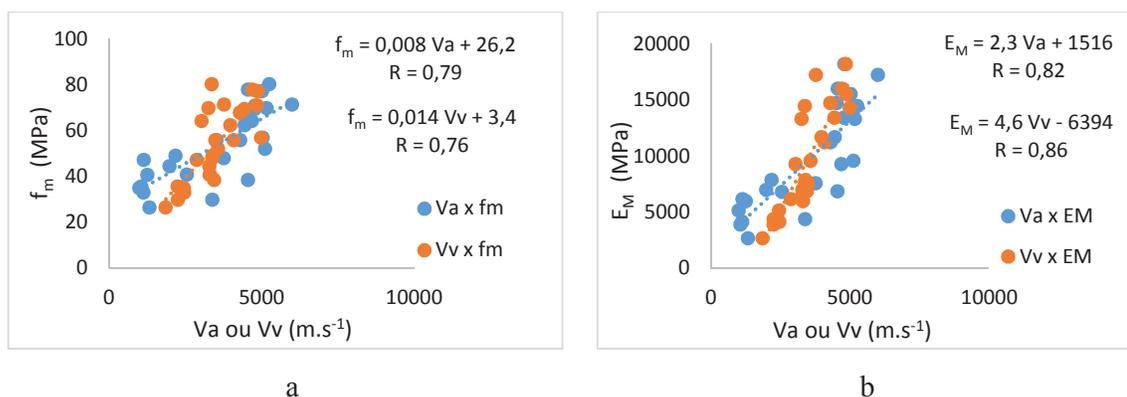


Figura 4.28. Relação entre a velocidade na árvore (Va) ou a velocidade na viga (Vv) e a propriedade de resistência ( $f_m$  - a) e de rigidez ( $E_M$  - b) da madeira.

Os valores encontrados para os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) da regressão entre a velocidade na árvore (Va) e as propriedades de resistência ( $R^2 = 0,62$ ) e de rigidez ( $R^2 = 0,67$ ) da madeira nessa pesquisa, foram superiores aos encontrados por trabalho realizado por Auty e Achim (2008) que obtiveram valores de  $R^2$  de 0,53 e de 0,59, respectivamente.

Na busca por fatores que procurem explicar melhor a correlação entre a velocidade na árvore e a velocidade na viga saturada, assim como melhorar a previsão das propriedades da madeira a partir da velocidade na árvore foi selecionado o diâmetro na altura do peito (DAP) e a densidade da madeira saturada ( $\rho$ ) como parâmetros a serem inseridos no modelo.

Todos os modelos gerados para correlacionar a velocidade na árvore com a velocidade na viga foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% (Tabela 4.24). A densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) foi estatisticamente significativa nos modelos e a inclusão desse parâmetro aumentou o  $R^2$  e diminuiu o erro da regressão (Tabela 4.24). O DAP não foi estatisticamente significativo quando foi inserido ao modelo, juntamente com a velocidade na árvore e a densidade da madeira saturada, sua inclusão melhorou pouco o  $R^2$  (1%) e aumentou o erro de predição em 0,3% (Tabela 4.24).

Para o modelo de predição da resistência da madeira ( $f_m$ ) a partir da velocidade na árvore (Va) somente o DAP, juntamente com a velocidade na árvore, foi estatisticamente significativo em todos os modelos e sua inserção aumentou o coeficiente de determinação em

8% e diminuiu em 9% o erro de predição (Tabela 4.25). Por outro lado, a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) não foi estatisticamente significativa em nenhum dos modelos apesar de sua inclusão ter melhorado em 2% o  $R^2$ , o erro de predição se manteve inalterado (Tabela 4.25).

Quando foi utilizado modelos para prever a rigidez da madeira ( $E_M$ ) a inserção do DAP melhorou o coeficiente de determinação e diminuiu o erro de predição, porém esse parâmetro não foi estatisticamente significativo em nenhum dos modelos que foi inserido (Tabela 4.26). Já a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) foi estatisticamente significativa em todos os modelos e sua inserção melhorou o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) em 10,4% e diminuiu o erro de predição do modelo em 11,5% (Tabela 4.26).

A velocidade prevista para as vigas, utilizando o modelo que apresentou menor erro de predição (modelo incluindo a velocidade na árvore e a  $\rho$  - Tabela 4.24), foi denominada de velocidade ajustada (Vajustada - Figura 4.29). A relação (k) média entre velocidades, considerando todas as árvores de todas as espécies passou de 0,99 (para a relação  $V_a/V_v$ ) para 1,02 (para a relação  $V_{ajustada}/V_v$ ), ou seja, praticamente não alterou a relação entre as velocidades. Desconsiderando as árvores de *Pinus elliotii* de pequeno diâmetro, a relação (k) média entre a velocidade ajustada e a velocidade na viga saturada foi de 1,15 para 1,00. Desta forma, a relação entre as velocidades foi efetivamente reduzida para as espécies de eucalipto.

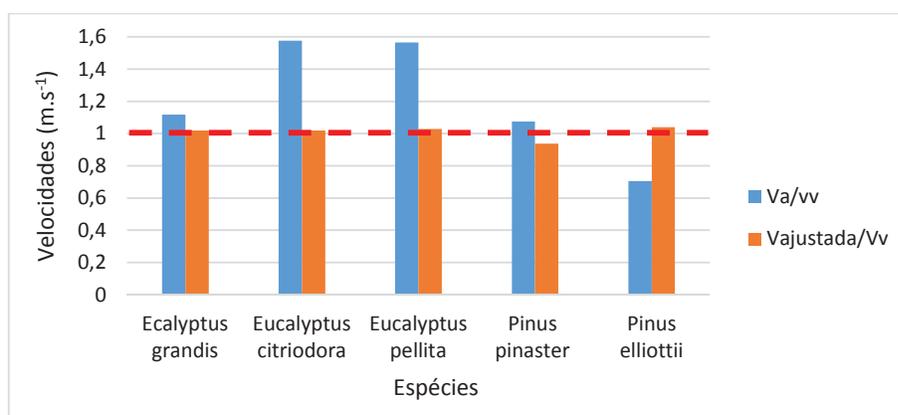


Figura 4.29. Relação entre a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e a velocidade na viga ( $V_v$ ) e entre a velocidade ajustada ( $V_{ajustada}$ ) e a velocidade na viga ( $V_v$ ).

As velocidades ajustadas ( $V_{ajustada}$ ) foram correlacionadas com as velocidades experimentais (Figura 4.30). As regressões indicaram que a velocidade ajustada explicou 79% da velocidade experimental das vigas saturadas (Figura 4.30), 22,5% superior quando

comparada com a previsão da velocidade na viga a partir da velocidade na árvore (Figura 4.27). O restante da variabilidade da velocidade na viga, que não foi explicada pela velocidade na árvore e pela densidade da madeira na condição saturada, deve estar relacionado com outros parâmetros, já discutidos anteriormente.

Tabela 4.24. Modelos de predição da velocidade na viga ( $V_v$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor,  $R^2$  e Erro).

Variáveis independentes	Modelo	P-valor					
		Va (m.s <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	DAP (m)	Modelo	R <sup>2</sup> (%)	Erro (m.s <sup>-1</sup> )
Va	$V_v = 2212 + 0,36*V_a$	-	-	-	0,00	48	630
Va e $\rho$	$V_v = 3850 + 0,21*V_a - 1,47*\rho$	0,00	0,00	-	0,00	78	419
Va e DAP	$V_v = 1695 + 0,22*V_a + 29,02*DAP$	0,01	-	0,00	0,00	63	539
Va, $\rho$ e DAP	$V_v = 3508 + 0,19*V_a - 1,30*\rho + 8,18*DAP$	0,01	0,00	0,37	0,00	79	420

Tabela 4.25. Modelos de predição da resistência da madeira ( $f_m$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor,  $R^2$  e Erro).

Variáveis independentes	Modelo	P-valor					
		Va (m.s <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	DAP (m)	Modelo	R <sup>2</sup> (%)	Erro (MPa)
Va	$f_m = 26,2 + 0,008*V_a$	-	-	-	0,00	62	10,2
Va e $\rho$	$f_m = 34,4 + 0,007*V_a - 0,007*\rho$	0,00	0,26	-	0,00	64	10,1
Va e DAP	$f_m = 19,3 + 0,006*V_a + 0,39*DAP$	0,00	-	0,02	0,00	70	9,2
Va, $\rho$ e DAP	$f_m = 16,8 + 0,006*V_a + 0,002*\rho + 0,42*DAP$	0,00	0,82	0,05	0,00	70	9,4

Tabela 4.26. Modelos de predição da rigidez da madeira ( $E_M$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor,  $R^2$  e Erro).

Variáveis independentes	Modelo	P-valor					
		Va (m.s <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	DAP (m)	Modelo	R <sup>2</sup> (%)	Erro (MPa)
Va	$E_M = 1516 + 2,3*V_a$	-	-	-	0,00	68	2653
Va e $\rho$	$E_M = 6057 + 1,9*V_a - 4,1*\rho$	0,00	0,01	-	0,00	76	2346
Va e DAP	$E_M = 191 + 2,0*V_a + 74,3*DAP$	0,00	-	0,10	0,00	72	2555
Va, $\rho$ e DAP	$E_M = 5504 + 1,9*V_a - 3,8*\rho + 13,2*DAP$	0,00	0,05	0,80	0,00	76	2395

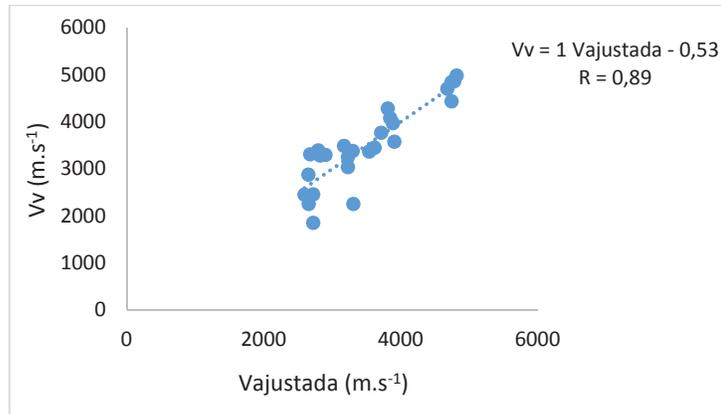


Figura 4.30. Modelo de predição da velocidade na viga ( $V_v$ ) a partir da velocidade ajustada ( $V_{ajustada}$ ).

A resistência prevista pelo modelo ajustado (incluindo a  $V_a$  e o DAP) foi correlacionada com a resistência experimental das vigas saturadas (Figura 4.33a), assim como a rigidez prevista pelo modelo ajustado (incluindo a  $V_a$  e a  $\rho$ ) foi correlacionada com a rigidez experimental das vigas saturadas (Figura 4.31b). A resistência e a rigidez previstas pela velocidade na árvore ajustada se correlacionaram melhor com a resistência e com a rigidez obtidas experimentalmente do que quando foi utilizada somente a velocidade na viga ( $V_v$ ) para prever as propriedades da madeira ( $f_m$  e  $E_M$ ). Para a resistência da madeira em flexão ( $f_m$ ), a utilização da resistência prevista pela velocidade na árvore ajustada melhorou o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) em 17,7% comparada a previsão dessa propriedade feita a partir da velocidade na viga ( $V_v$ ). Já para a rigidez da madeira, a utilização da rigidez prevista pela velocidade na árvore ajustada melhorou o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) em 2,6% comparada a previsão dessa propriedade feita a partir da velocidade na viga ( $V_v$ ).

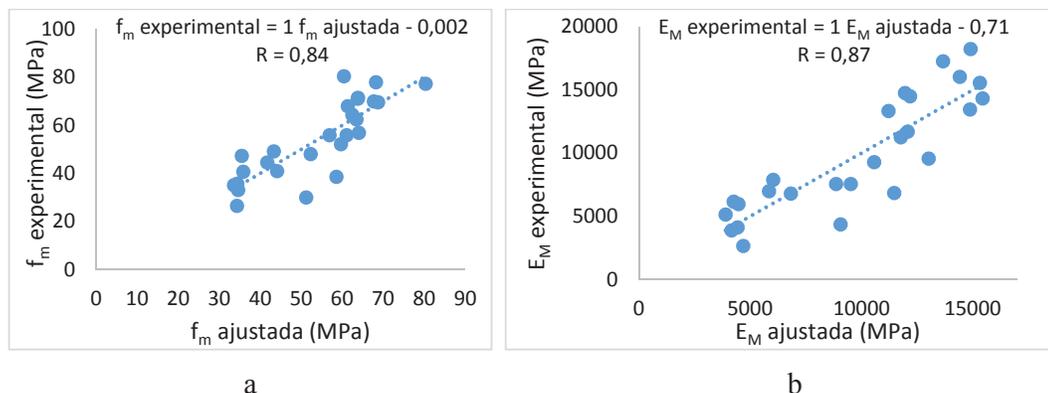


Figura 4.31. Relação entre a resistência prevista pelo modelo ajustado ( $f_m$  ajustada) e a resistência experimental ( $f_m$  experimental) das vigas (a) e relação entre a rigidez prevista pelo modelo ajustado ( $E_M$  ajustada) e a rigidez experimental ( $E_M$  experimental) das vigas (b).

#### 4.8 Influência do Diâmetro da Árvore, da Densidade da Madeira na Condição Saturada e do Coeficiente de Poisson nos Modelos de Predição da Velocidade de Propagação de Ondas na Tora e na Viga a partir da Velocidade na Árvore

A avaliação da influência do diâmetro da árvore (DAP), da densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) nos modelos de predição da velocidade de propagação de ondas na tora e na viga a partir da velocidade na árvore só foi possível para as espécies de eucalipto (*Eucalyptus grandis* – 10 anos, *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus pellita*), nas quais o coeficiente de Poisson das árvores foi determinado. Dessa forma, a amostragem utilizada para essa análise foi de 6 árvores, 18 toras e 92 vigas.

A inserção de parâmetros na equação de predição da velocidade na tora a partir da velocidade na árvore fez com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) aumentasse e o erro diminuísse para a maioria dos modelos gerados (Tabela 4.27). O modelo que utilizou a velocidade na árvore ( $V_a$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e o DAP explicou 99% da variabilidade da velocidade na tora ( $V_t$ ), diminuiu o erro em 87% quando comparado ao modelo de predição da velocidade na tora considerando somente a velocidade na árvore (Tabela 4.44). Adicionalmente, todos os parâmetros considerados no modelo foram estatisticamente significativos (Tabela 4.27). O menor erro de predição da velocidade na tora ( $V_t$ ) foi obtido pelo modelo que considerou o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o DAP, juntamente com a velocidade na árvore ( $V_a$ ), embora esses parâmetros ( $\nu$ ,  $\rho$  e DAP) não tenham sido estatisticamente significativos para o modelo (Tabela 4.27).

Para a previsão da velocidade na viga a partir da velocidade na árvore, a inserção do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), da densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e do DAP, diminui o erro de predição em todos os casos (Tabela 4.28). Os maiores coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e menores erros foram obtidos a partir da inclusão do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) aos modelos (Tabela 4.28). A variabilidade da velocidade na viga foi 100% explicada pelo modelo que considerou a velocidade na árvore ( $V_a$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e o DAP, tendo o erro diminuído em 98%, comparado à previsão da velocidade na viga somente com a velocidade na árvore (Tabela 4.28). A inclusão da densidade da madeira ( $\rho$ ) na condição saturada a essa equação, apesar de não ter sido estatisticamente significativa para o modelo, diminui o erro (Tabela 4.28).

Tabela 4.27. Modelos de predição da velocidade na tora ( $V_t$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), o coeficiente de Poisson ( $v$ ) a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor,  $R^2$  e Erro).

Variáveis independentes	Modelo	P-valor				Modelo	$R^2$ (%)	Erro ( $m.s^{-1}$ )
		$V_a$ ( $m.s^{-1}$ )	$v$	$\rho$ ( $kg.m^{-3}$ )	DAP (m)			
$V_a$	$V_t = 2073 + 0,32*V_a$	-	-	-	-	0,14	46	202
$V_a$ e $\rho$	$V_t = 2648 + 0,34*V_a - 0,70*\rho$	0,11	-	0,21	-	0,16	70	172
$V_a$ e DAP	$V_t = 2520 + 0,27*V_a - 5,94*DAP$	0,31	-	-	0,68	0,36	49	225
$V_a$ e $v$	$V_t = 2960 + 0,34*V_a - 1308*v$	0,03	0,04	-	-	0,03	90	102
$V_a$ , $v$ e $\rho$	$V_t = 2977 + 0,33*V_a - 2145*v + 0,67*\rho$	0,06	0,10	0,34	-	0,09	94	93
$V_a$ , $v$ e DAP	$V_t = 2342 + 0,46*V_a - 1837*v + 12,98*DAP$	0,00	0,00	-	0,02	0,01	99	26
$V_a$ , $\rho$ e DAP	$V_t = 1526 + 0,58*V_a - 1,68*\rho + 25,51*DAP$	0,08	-	0,11	0,21	0,16	89	128
$V_a$ , $v$ , $\rho$ e DAP	$V_t = 2206 + 0,48*V_a - 1617*v - 0,27*\rho + 15,70*DAP$	0,04	0,08	0,44	0,11	0,06	99	24

Tabela 4.28. Modelos de predição da velocidade na viga ( $V_v$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), o coeficiente de Poisson ( $v$ ) a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o diâmetro na altura do peito (DAP) e parâmetros de análise da regressão (P-valor,  $R^2$  e Erro).

Variáveis independentes	Modelo	P-valor				Modelo	$R^2$ (%)	Erro ( $m.s^{-1}$ )
		$V_a$ ( $m.s^{-1}$ )	$v$	$\rho$ ( $kg.m^{-3}$ )	DAP (m)			
$V_a$	$V_v = 2720 + 0,37*V_a$	-	-	-	-	0,19	39	263
$V_a$ e $\rho$	$V_v = 3752 + 0,40*V_a - 1,26*\rho$	0,03	-	0,02	-	0,03	91	116
$V_a$ e DAP	$V_v = 4341 + 0,18*V_a - 21,54*DAP$	0,45	-	-	0,18	0,16	70	213
$V_a$ e $v$	$V_v = 4002 + 0,39*V_a - 1891*v$	0,00	0,00	-	-	0,00	99	28
$V_a$ , $v$ e $\rho$	$V_v = 3996 + 0,39*V_a - 1594*v - 0,24*\rho$	0,00	0,01	0,14	-	0,00	99	17
$V_a$ , $v$ e DAP	$V_v = 4172 + 0,36*V_a - 1745*v - 3,57*DAP$	0,00	0,00	-	0,01	0,00	99	5
$V_a$ , $\rho$ e DAP	$V_v = 3428 + 0,47*V_a - 1,54*\rho + 7,36*DAP$	0,12	-	0,14	0,66	0,12	92	133
$V_a$ , $v$ , $\rho$ e DAP	$V_v = 4139 + 0,36*V_a - 1691*v - 0,06*\rho - 2,90*DAP$	0,00	0,01	0,14	0,04	0,00	99	2

A velocidade prevista para as toras, utilizando o modelo que apresentou todos os parâmetros estatisticamente significativos (incluindo a velocidade na árvore, o  $v$  e o DAP - Tabela 4.27), foi denominada de velocidade na tora ajustada ( $V_{t,ajustada}$ ). A velocidade na tora ajustada diminui a diferença de velocidade na árvore e na tora para todas as espécies consideradas nessa pesquisa (Figura 4.32). A relação ( $k$ ) média entre velocidades ( $V_{t,ajustada}/V_t$ ), considerando todas as árvores de todas as espécies passou de 1,37 para 1,00 (Figura 4.32).

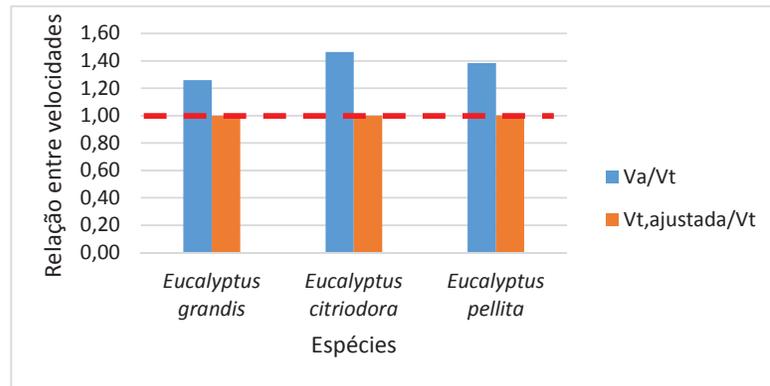


Figura 4.32. Relação entre a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e a velocidade na tora ( $V_t$ ) e entre a velocidade na tora ajustada ( $V_{t,ajustada}$ ) e a velocidade na tora ( $V_t$ ).

As velocidades nas toras ajustadas ( $V_{t,ajustada}$ ) foram correlacionadas com as velocidades experimentais ( $V_t$  - Figura 4.33). As regressões indicaram que a velocidade ajustada explicou 99% da velocidade experimental das toras recém abatidas, o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) foi 54% superior quando comparada com a previsão da velocidade na tora a partir da velocidade na árvore (Figura 4.33).

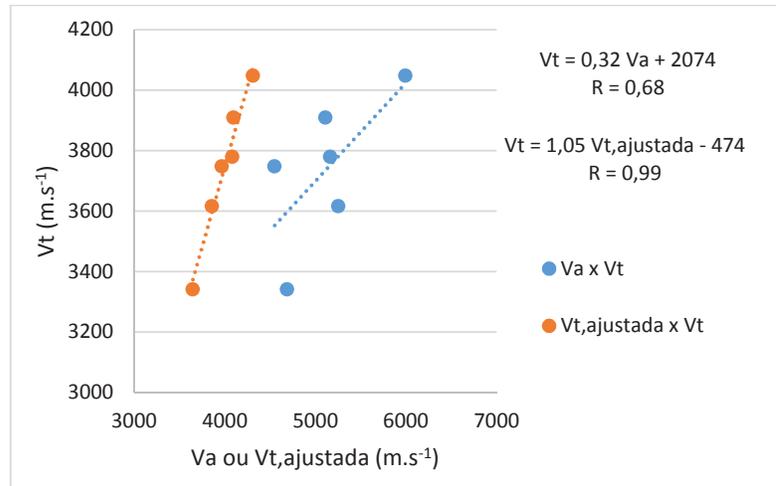


Figura 4.33. Modelos de predição da velocidade na tora ( $V_t$ ) à partir da velocidade na árvore ( $V_a$ ) ou a partir da velocidade na tora ajustada ( $V_{t,ajustada}$ ).

A velocidade na viga ajustada (modelo incluindo a  $V_a$ , o  $v$  e o DAP) foi correlacionada com as velocidades experimentais das vigas (Figura 4.34). A regressão indicou que a velocidade na viga ajustada ( $V_{v,ajustada}$ ) explicou 99% da velocidade na viga experimental ( $V_v$ ) (Figura 4.34). A relação ( $k$ ) média entre velocidades, considerando todas as espécies passou de 1,11 ( $V_a/V_v$ ) para 1,00 ( $V_{v,ajustada}/V_v$ ) (Figura 4.35).

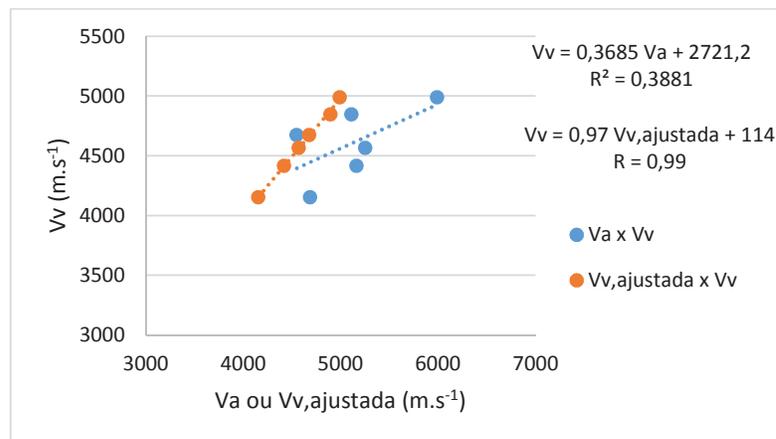


Figura 4.34. Modelos de predição da velocidade na viga ( $V_v$ ) à partir da velocidade na árvore ( $V_a$ ) ou a partir da velocidade na viga ajustada ( $V_{v,ajustada}$ ).

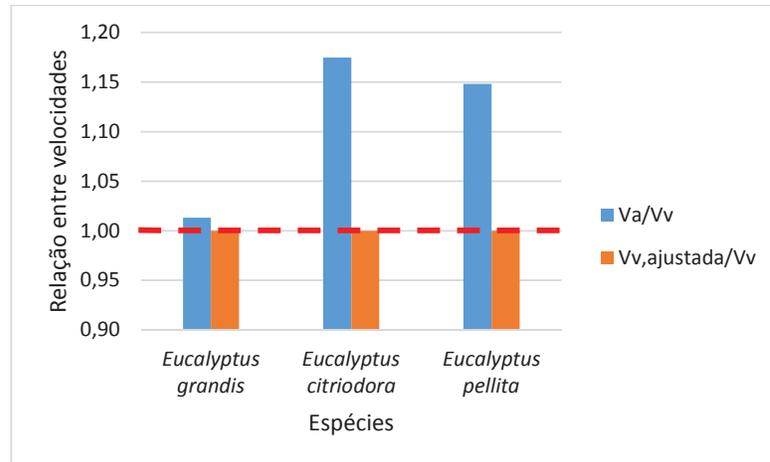


Figura 4.35. Relação entre a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e a velocidade na viga ( $V_v$ ) e entre a velocidade na viga ajustada ( $V_{v,ajustada}$ ) e a velocidade na viga ( $V_v$ ).

Esse resultado permitiu concluir que com a inclusão do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e do DAP no modelo de predição da velocidade na tora ou da velocidade na viga, a partir da velocidade na árvore, foi possível explicar 99% da variabilidade da velocidade nessas duas formas do material (tora/viga), sendo que para obtenção de menores erros de predição, a densidade na madeira na condição saturada ( $\rho$ ) deve ser incluída ao modelo (Tabelas 4.27 e 4.28).

#### 4.9 Resistência e Rigidez da Madeira Obtida a partir da Velocidade Acústica na Árvore

Esse capítulo teve como objetivo apresentar os modelos de obtenção das propriedades de resistência ( $f_m$ ) e de rigidez ( $E_M$ ) da madeira obtidos a partir da velocidade na árvore ( $V_a$ ), porém, para facilitar a comparação, também foram apresentados as regressões entre a velocidade na tora ( $V_t$ ) e na viga ( $V_v$ ) e as propriedades da madeira ( $f_m$  e  $E_M$ ).

Para as velocidades ajustadas (1) foram utilizados os modelos que apresentaram menor erro de predição de velocidade (Tabelas 4.39 e 4.41). Para a equação da velocidade na tora ajustada ( $V_{t,a1}$ ) foi utilizado o modelo que inclui a velocidade na árvore e o DAP (Tabela 4.39) e para a equação da velocidade na viga ajustada ( $V_{v,a1}$ ) foi utilizado o modelo que inclui a velocidade na árvore e a densidade da madeira saturada ( $\rho$ ) (Tabela 4.24).

O modelo de correlação ( $\nu = 0,0006*\rho+0,14$ ) entre o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e a densidade ( $\rho$ ) foi estatisticamente significativa (P-valor = 0,0165) com coeficiente de correlação de 0,89 e erro relativo de 6% (erro absoluto da regressão/média dos Poissons). Esse

modelo foi utilizado nas árvores para as quais não foi possível a obtenção do coeficiente de Poisson experimentalmente.

Dessa forma, para as velocidades ajustadas (2) foram utilizados os modelos que apresentaram o menor erro de predição e que incluíam, tanto para a velocidade na tora ajustada ( $V_{t,a2}$ ) como para a velocidade na viga ajustada ( $V_{v,a2}$ ), a velocidade na árvore ( $V_a$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) a densidade da madeira na condição saturada ( $\rho$ ) e o DAP (Tabelas 4.27 e 4.28).

Considerando o ensaio de ultrassom direto realizado nos materiais (árvore, tora e viga) a resistência da madeira ( $f_m$ ) apresentou melhor correlação com o ensaio de ultrassom na viga (Tabela 4.29). Contudo foi possível, utilizando a velocidade na tora ajustada ( $V_{t,a1}$ ), prever com maior precisão (maior coeficiente de correlação e menor erro) a resistência da madeira ( $f_m$ ) comparada com a previsão dessa propriedade utilizando a velocidade na viga ( $V_v$ ) (Tabela 4.29). A velocidade na tora ajustada (1) explica 82% da variabilidade da resistência da madeira (Tabela 4.29).

A velocidade na tora ( $V_t$ ) predisse com maior coeficiente de correlação e menor erro a propriedade de rigidez da madeira ( $E_M$ ) do que a velocidade na árvore ( $V_a$ ) e a velocidade na viga ( $V_v$ ) (Tabela 4.30). Ao utilizar a velocidade na tora ajustada ( $V_{t,a2}$ ), foi possível prever a rigidez da madeira ( $E_M$ ) com o mesmo coeficiente de correlação obtido pela previsão a partir da velocidade na tora ( $V_t$ ), porém com um erro 4,4 % inferior (Tabela 4.30). A velocidade na tora ajustada (2) explica 84% da variabilidade da rigidez da madeira (Tabela 4.30).

Tabela 4.29. Modelos de predição da resistência da madeira ( $f_m$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a velocidade na tora ( $V_t$ ), a velocidade na viga saturada ( $V_v$ ), as velocidades nas toras ajustadas (1) e (2) ( $V_{t,a1}$  e  $V_{t,a2}$ , respectivamente), as velocidades nas vigas ajustadas (1) e (2) ( $V_{v,a1}$  e  $V_{v,a2}$ , respectivamente) e parâmetros de análise da regressão (P-valor, R,  $R^2$  e Erro).

Modelos de predição da $f_m$	R	$R^2$ (%)	P-valor	Erro (MPa)
$f_m = 25,7 + 0,008 \cdot V_a$	0,82	67	0,000	10
$f_m = 14,5 + 0,012 \cdot V_t$	0,83	70	0,000	9
$f_m = 0,79 + 0,014 \cdot V_v$	0,85	73	0,000	9
$f_m = 12,0 + 0,013 \cdot V_{t,a1}$	0,91	82	0,000	7
$f_m = -24,8 + 0,024 \cdot V_{v,a1}$	0,76	58	0,000	11
$f_m = 15,1 + 0,013 \cdot V_{t,a2}$	0,87	76	0,000	8
$f_m = -25,2 + 0,020 \cdot V_{v,a2}$	0,83	69	0,000	9

Tabela 4.30. Modelos de predição da rigidez da madeira ( $E_M$ ) considerando como variáveis independentes a velocidade na árvore ( $V_a$ ), a velocidade na tora ( $V_t$ ), a velocidade na viga saturada ( $V_v$ ), as velocidades nas toras ajustadas (1) e (2) ( $V_{t,a1}$  e  $V_{t,a2}$ , respectivamente), as velocidades nas vigas ajustadas (1) e (2) ( $V_{v,a1}$  e  $V_{v,a2}$ , respectivamente) e parâmetros de análise da regressão (P-valor, R,  $R^2$  e Erro).

<b>Modelos de predição da <math>E_M</math></b>	<b>R</b>	<b><math>R^2</math> (%)</b>	<b>P-valor</b>	<b>Erro (MPa)</b>
$E_M = 1862 + 2,2*V_a$	0,80	64	0,000	2754
$E_M = -2539 + 3,8*V_t$	0,92	85	0,000	1787
$E_M = -5306 + 4,0*V_v$	0,86	74	0,000	2334
$E_M = -1860 + 3,6*V_{t,a1}$	0,90	82	0,000	1857
$E_M = -14699 + 7,4*V_{v,a1}$	0,87	76	0,000	2138
$E_M = -1669 + 3,7*V_{t,a2}$	0,92	84	0,000	1709
$E_M = -3048 + 3,6*V_{v,a2}$	0,89	80	0,000	1958

Com os resultados apresentados pôde-se concluir que foi possível obter, a partir de modelos que incluem a velocidade de ultrassom na árvore, as propriedades de resistência e de rigidez da madeira com precisão semelhante ou superior do que a obtida pelos modelos de previsão dessas propriedades ( $f_m$  e  $E_M$ ) a partir das velocidades na tora ou na viga.

## 5. CONCLUSÕES

A velocidade na árvore é maior que a velocidade na tora e na viga saturada e a velocidade na viga saturada é superior à velocidade na tora recém abatida, mas existem correlações estatisticamente significativas entre elas.

As diferenças entre velocidades (árvore/tora, árvore/viga) são minimizadas com a inserção de parâmetros (densidade na condição saturada, diâmetro na altura do peito e coeficiente de Poisson) nos modelos de predição da velocidade na tora ou da velocidade na viga a partir da velocidade na árvore.

A regressão entre a velocidade de ultrassom na viga saturada e a resistência da madeira ( $f_m$ ) apresentou maior coeficiente de correlação e menor erro do que a regressão dessa propriedade ( $f_m$ ) e a velocidade de ultrassom na tora. A velocidade obtida à partir de ensaios na árvore, juntamente com o DAP, prediz com maior precisão (maior coeficiente de correlação e menor erro) a propriedade de resistência da madeira ( $f_m$ ) obtida em flexão quando comparado com a previsão dessa propriedade à partir da velocidade obtida em ensaios na viga saturada.

A velocidade obtida à partir de ensaios na tora prediz com maior precisão a propriedade de rigidez da madeira ( $E_M$ ) do que a velocidade obtida à partir de ensaios na viga saturada. Com o modelo que inclui o coeficiente de Poisson, a densidade da madeira na condição saturada e o DAP, juntamente com a velocidade obtida em ensaio na árvore, é possível prever a rigidez da madeira ( $E_M$ ) com a mesma precisão obtida pela previsão a partir da velocidade obtida na tora ( $V_t$ ), porém com menor erro.

Os resultados dessa pesquisa permitem comprovar a viabilidade de obtenção das propriedades de resistência e de rigidez da madeira a partir de ensaios acústicos realizados nas árvores.

## 6. 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.

ANDRINO, M. H.; CAETANO, S. F.; SANTOS, A. A.. **Avaliação das Tensões em Chapas de Alumínio 7050 Utilizando o Efeito Acustoelástico**. In: 6a CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS (COTEQ), 10p., Salvador, 2002.

ANDRINO, M. H.. **Aplicação de Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas para a Medição de Tensões em Dutos**. 203 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

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

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

AUTY, 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.

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

BERTOLDO, C.; GONÇALVES, R.; BATISTA, F.; SECCO, C. B.. **Velocity of ultrasonic waves in live trees and in freshly-felled logs**. In: 17th International Nondestructive Testing and evaluation of wood symposium WoodNDT, Vol. 1, pp.1-3, Sopron, Hungria, 2011.

BERTOLDO, C.; GONÇALVES, R.; MASSAK, M. V.; SECCO, C.. **Assessment of Wood Quality by Tree Evaluation Using Ultrasound**. In: XIII Congresso Florestal Mundial, 2009, Buenos Aires. XIII Congresso Florestal Mundial. v. 1. p. 304-304, 2009.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York, Van Nostrand Reinhold, 419 p. 1982.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. 2. ed. Malabar, Flórida: Krieger, 712 p., 1993.

- BUCUR, Voichita. **Acoustics of wood**. Springer-Verlag, Berlin, Germany. P. 223-225, 2006.
- BUCUR, V.; ARCHER, R. R.. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. **Wood Sci Technol** 18:255-265, 1984.
- BUCUR, V.; PERRIN, J. P.. **Ultrasonic waves-wood structure interaction**. Proc Inst Acousti Edinb 10 (2): 199-206, 1988.
- CAETANO, S. F.. **Determinação das Constantes Acustoelásticas para Aço API 5L X70 para Gasodutos**. 167 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- 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.
- CHAUHAN, S. S.; WALKER, J. C. F.. Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationship in radiate pine. **Forest Ecology and Management**, v. 229, p. 388-394, 2006.
- 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.
- FRANÇOIS, M. **Identification des symmetries matérielles de matériaux anisotropes**. França, Tese de Doutorado – Universidade de Paris, 137p. 1995.
- FURLANI, J.E.. **Um estudo sobre a variação numérica do coeficiente de Poisson na madeira, considerando a anisotropia do material**. Campinas, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Departamento de Construção Civil/ UNICAMP, 1995.
- GRABIANOWSKI, M.; MANLEY, B.; WALKER, J. C. F.. Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. **Wood Sci. Technology**, v. 40, p. 205–216, 2006.
- GONÇALVES, R.; BERTOLDO, C.; MASSAK, M. V.; BATISTA, F.; SECCO, C. B. Technical note: Velocity of ultrasonic waves in live trees and in freshly-felled logs. **Wood and Fiber Science**, v. 43, n. 2, p. 232-235, 2011a.
- GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; CERRI, D. G. P. Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression test. **Wood and Fiber Science**, 43 (1): 64-75, 2011b
- GONÇALVES R, TRINCA AJ, PELLIS BP. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. **Wood Science and Technology** 48: 269-287, 2014.

HASEGAWA, M.; SASAKI, Y.; IWATA, T. Acoustoelastic effect of wood III: effect of applied stresses on the velocity of ultrasonic waves propagating normal to the direction of the applied stress. **Journal of Wood Science**, 46, p.102-108, 2000.

LASSERE, J. P.; MASON, E. G.; WATT, M. S.. Assessing corewood acoustic velocity and modulus of elasticity with two impact based instruments in 11-years-old trees from a clonal-spacing experiment of *Pinus radiata* D. Don. **Forest Ecological Management** 239:217-221, 2007.

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

MASCIA, N.T. **Considerações à respeito da anisotropia na madeira**. São Carlos, Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos/USP, 295p. 1991.

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.

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

MERLO, E.; ZAS, R.; PIÑEIRO G. Y.; PEDRAS, F.. Variabilidad de parámetros de calidad de madera entre y dentro de procedencias de *Pseudotsuga menziesii*. **Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales**, v. 24, p. 262-266, 2009

MAHON, J. M. Jr.; JORDAN, L.; SCHMILECK, L. R.; CLARK, A. III; DANIELS, R. F.. A comparison of sampling methods for a standing tree acoustic device. **South J Appl For** 33(2):62-68, 2009.

MORA, C. R.; SCHIMLECK, L. R.; ISIK, F.; MAHON, J. M.; CLARK, A.; DANIELS, R. F.. Relationship between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees. **Canadian Journal of Forest Research**. 39:1421-1429, 2009.

ORMONDE, P. C.; GONÇALVES, R.. **Avaliação do Fenômeno Acustoelástico na Madeira por Meio de Ultra-som**, 05/2006, 1º Seminário sobre a Aplicação de Ensaios não Destrutivos na Madeira e Materiais a Base de Madeira, Vol. 1, pp.1-6, Itatiba, SP, Brasil, 2006.

PEREIRA Jr., P.. **Influência da Anisotropia gerada por laminação sobre a medição de tensões por ultrassom em ligas de Alumínio 7050**. Monografia para Exame de Qualificação. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2011.

PREZIOSA, C; Mudry ,M.; LAUNAY, J.; GILLETTA, F.. Détermination des constantes élastiques du bois par une méthode acoustique goniométrique. **CR Acad Sci Paris**, 293(2):91-94, 1981.

PREZIOSA, C.. **Méthode de détermination des constantes élastiques du matériau bois par utilisation des ultrasons**. Université d'Orléans (Orléans), 1982

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.

SASAKI, Y.; IWATA, T.; ANDO, K.. Acoustoelastic effect of wood II: effect of compressive stress on the velocity of ultrasonic waves parallel to the transverse direction of wood. **J Wood Sci**, 44:21–27, 1998.

TRINCA, A. J. **Metodologia para determinação das constantes elásticas da madeira por ultrassom**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Na área de concentração de Construções Rurais e Ambiente, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2011.

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. Acoustic Measurements on Trees and Logs: a Review and Analysis. **Wood Sci Technol**. 47: 965-975, 2013.

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, 2007a.

WANG, X.; ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PUNCHES, J.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; PELLERIN, R. F.. Diameter effect on stress-wave evaluation of modulus of elasticity of small-diameter logs. **Wood Fiber Sci**. 36(3):368–377, 2004.

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

WANG, X.; ROSS, R. J.; MCCLELLAN, M.; BARBOUR, R. J.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; MCGINNIS, G. D.. Strength and Stiffness Assessment of Standing Trees Using a Nondestructive Stress Wave Technique. **Research Paper FPL–RP–585**. p. 1-9, 2000.

WANG, X.; ROSS, R. J.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; MCCLELLAN, M.; BARBOUR, R. J.; PELLERIN, R. F.. **Nondestructive Evaluation of Standing Trees With Stress Wave Methods**. In: 12th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. v. 1, p. 197-206, Sopron, 2000.

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.

WANG X.; VERRILL S.; LOWELL, E.; ROSS, R. J.; HERIANT, V. L.. Acoustic sorting models for improved log segregation. **Wood and Fiber Science**, 45(4), 2013, pp. 343-352.

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

## ANEXO I

Tabela I.1. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 1.2.C (*Eucalyptus grandis*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,00	0,00	0,00
0,69	0,35	0,21
0,96	0,49	0,30
1,26	0,64	0,39
1,56	0,79	0,48
1,86	0,95	0,57
2,40	1,22	0,74
3,06	1,56	0,94
4,05	2,06	1,25

Tabela I.2. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 15.2.B (*Eucalyptus grandis*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,2	0,68	0,44
1,9	1,02	0,66
2,5	1,35	0,87
3,0	1,67	1,07
3,7	2,02	1,30
4,8	2,66	1,71
6,1	3,34	2,14

Tabela I.3. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 6.1.A (*Corymbia citriodora*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,9	1,10	0,70
2,8	1,63	1,04
3,7	2,17	1,38
4,6	2,70	1,72
5,5	3,23	2,06
7,1	4,23	2,69
9,1	5,37	3,42

Tabela I.4. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 15.2.E (*Eucalyptus pellita*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,2	0,56	0,36
1,8	0,84	0,53
2,4	1,11	0,70
3,1	1,40	0,88
3,6	1,66	1,05
4,9	2,22	1,40
6,1	2,77	1,75

Tabela I.5. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 9.1.C (*Corymbia citriodora*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,9	0,83	0,53
2,8	1,25	0,79
3,7	1,64	1,04
4,6	2,04	1,29
5,5	2,44	1,55
7,3	3,25	2,06
9,1	4,06	2,57

Tabela I.6. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 9.1.A (*Corymbia citriodora*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,8	1,01	0,65
2,7	1,50	0,97
3,6	2,00	1,28
4,5	2,49	1,60
5,4	2,99	1,92
7,2	3,98	2,56
9,0	4,97	3,20

Tabela I.7. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 9.2.A (*Corymbia citriodora*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,8	1,01	0,65
2,7	1,51	0,97
3,6	2,01	1,29
4,5	2,50	1,61
5,4	3,00	1,93
7,2	3,98	2,56
9,0	4,98	3,20

Tabela I.8. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 6.1.B (*Corymbia citriodora*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,8	1,07	0,68
2,7	1,59	1,02
3,6	2,12	1,35
4,5	2,64	1,69

Tabela I.9. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 6.2.A (*Corymbia citriodora*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,8	1,02	0,65
2,7	1,51	0,98
3,6	2,01	1,30
4,5	2,51	1,62
5,4	3,01	1,94
7,2	4,01	2,58
9,0	5,01	3,23

Tabela I.10. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.1.C (*Eucalyptus pellita*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,2	0,75	0,48
1,8	1,12	0,71
2,4	1,48	0,94
3,0	1,85	1,17
3,6	2,22	1,40
4,8	2,95	1,87
6,0	3,68	2,33

Tabela I.11. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.3.F (*Eucalyptus pellita*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,2	0,71	0,45
1,8	1,06	0,67
2,4	1,41	0,90
3,0	1,76	1,12
3,6	2,11	1,34
4,8	2,80	1,78
6,0	3,50	2,22

Tabela I.12. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 1.2.B (*Eucalyptus grandis*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,00	0,00	0,00
0,69	0,42	0,26
0,96	0,58	0,37
1,26	0,76	0,48
1,56	0,94	0,60
1,86	1,12	0,71
2,40	1,45	0,92
3,06	1,84	1,17
4,05	2,44	1,55

Tabela I.13. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 3.2.B (*Eucalyptus grandis*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
0,6	0,33	0,21
0,9	0,49	0,32
1,3	0,71	0,46
1,6	0,88	0,57
1,8	0,99	0,64
2,4	1,32	0,85
3,0	1,65	1,06
4,0	2,20	1,41

Tabela I.14. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.1.P (*Eucalyptus pellita*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,2	0,70	0,44
1,8	1,04	0,67

Tabela I.15. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.1.A (*Eucalyptus pellita*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
0,6	0,32	0,20
0,9	0,48	0,31
1,3	0,69	0,44
1,6	0,85	0,55
1,8	0,95	0,61
2,4	1,27	0,82
3,0	1,59	1,02
4,0	2,12	1,36

Tabela I.16. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.1.D (*Eucalyptus pellita*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
0,6	0,26	0,16
0,9	0,39	0,25
1,3	0,56	0,35
1,6	0,68	0,44
1,8	0,77	0,49
2,4	1,03	0,65
3,0	1,28	0,82
4,0	1,71	1,09

Tabela I.17. Cálculo das tensões teóricas normais nos pontos 1 e 2 da zona comprimida e 3 e 4 da zona tracionada da viga 11.2.E (*Eucalyptus pellita*).

Carga (kN)	Tensão Teórica (kN/cm <sup>2</sup> - valores absolutos)	
	Pontos 1 e 4	Pontos 2 e 3
0,0	0,00	0,00
1,2	0,73	0,45
1,8	1,08	0,68
2,4	1,44	0,90
3,0	1,79	1,12
3,6	2,14	1,34
4,8	2,85	1,78
6,0	3,54	2,22

## ANEXO II

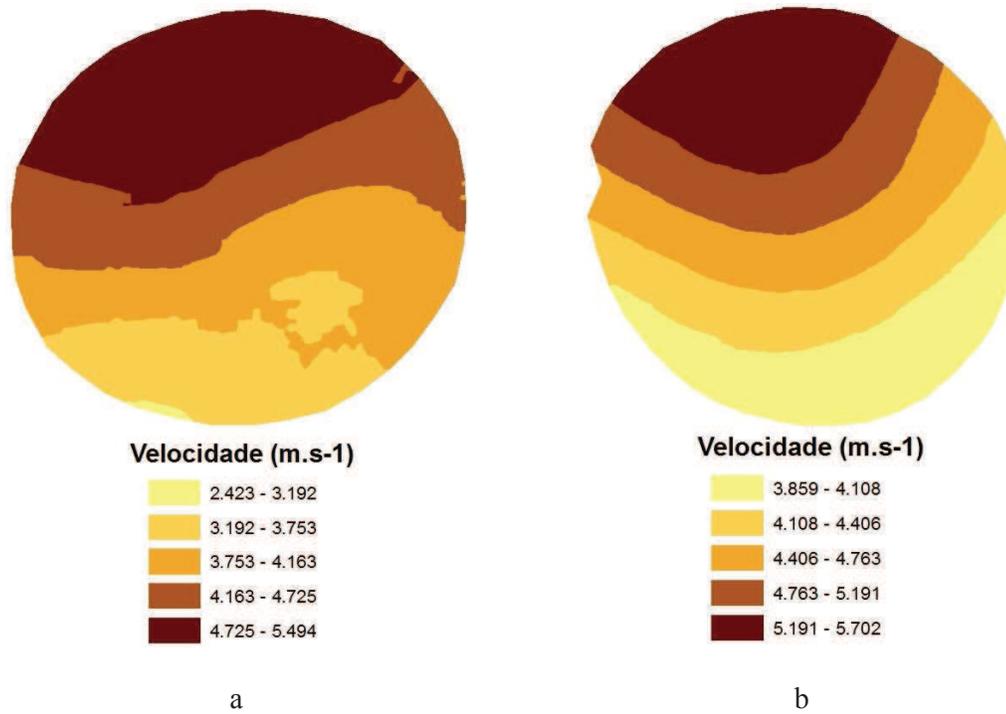


Figura II.1. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de *Eucalyptus grandis* para a amostra 2 (a) e para a amostra 3 (b).

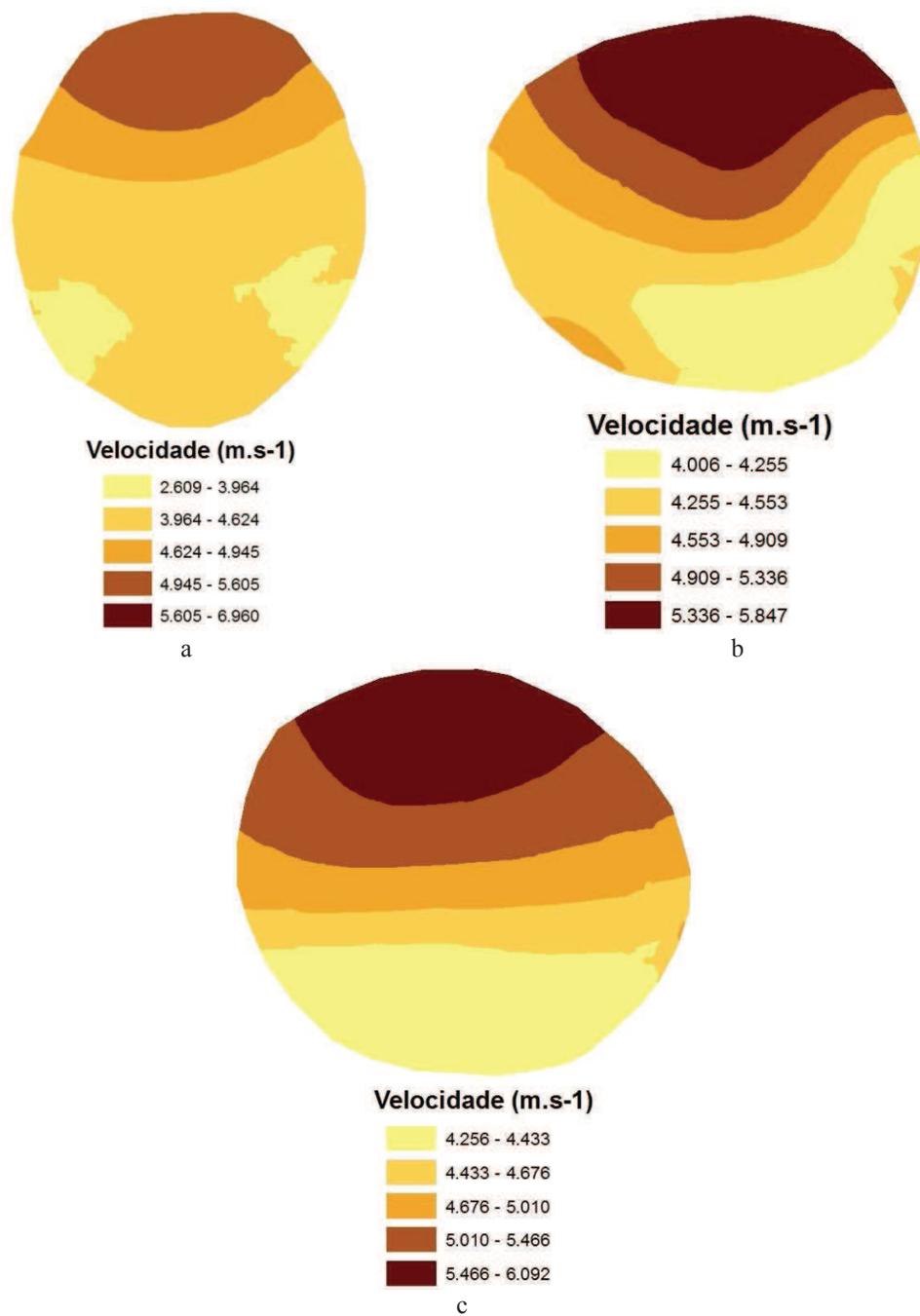


Figura II.2. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de *Corymbia citriodora* para a amostra 1 (a), para a amostra 2 (b) e para a amostra 3 (c).

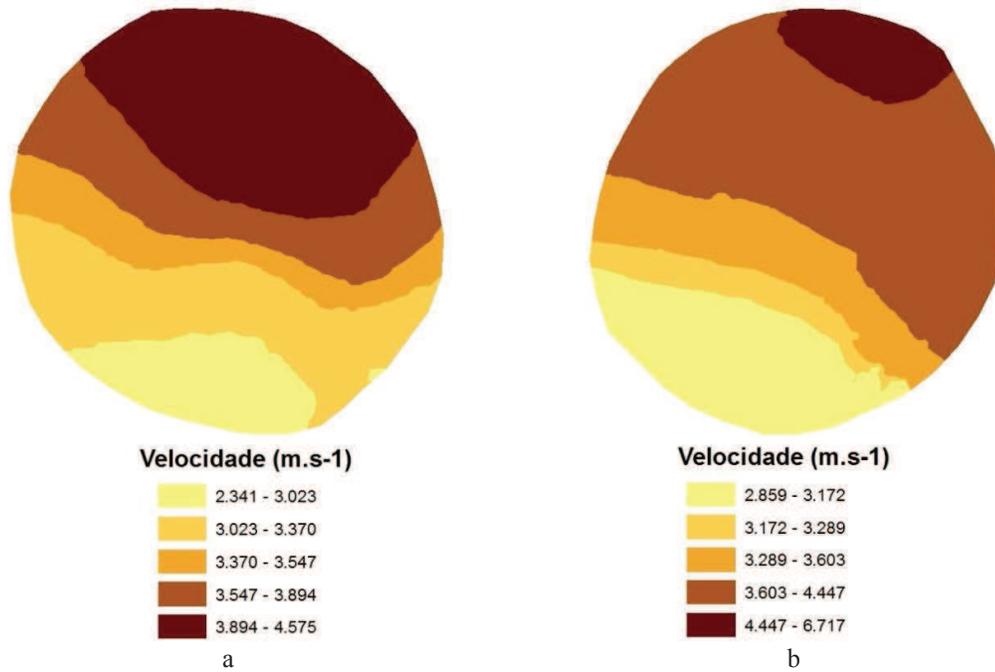


Figura II.3. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de *Eucalyptus pellita* para a amostra 2 (a) e para a amostra 3 (b).

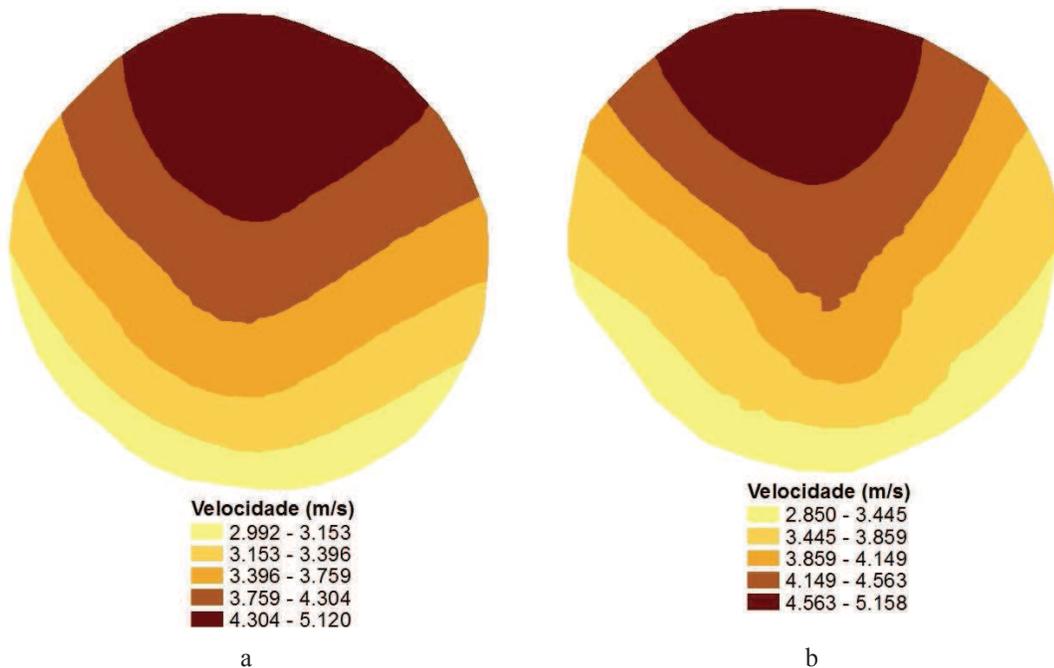


Figura II.4. Mapa de dispersão da velocidade na seção transversal das toras de *Pinus pinaster* para a amostra 1 (a) e para a amostra 3 (b).