

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DETERMINAÇÃO DE MÓDULOS DE ELASTICIDADE À
COMPRESSÃO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. COM O USO DE
ULTRA-SOM**

MARCELO NOGUEIRA

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Maio - 2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DETERMINAÇÃO DE MÓDULOS DE ELASTICIDADE À
COMPRESSÃO DA MADEIRA DE *Pinus taeda* L. COM O USO DE
ULTRA-SOM**

MARCELO NOGUEIRA

Orientador: Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Maio – 2003

“Uma árvore não fica de costas
para ninguém.
Dê a volta em torno dela.
A Árvore estará sempre
de frente para você.
Os Verdadeiros Amigos, também.
Dizem os Chineses:
Árvore Plantada com AMOR
nenhum vento derruba.
Uma Verdadeira Amizade, também.
Quem planta Árvores, cria raízes.
Quem cultiva bons amigos, também.
As Árvores, como os amigos,
produzem beleza para os olhos e os ouvidos,
na mudança sutil de suas cores,
com o passar das estações,
no ondular de suas folhas ao vento e
sombra, sempre.
Sombra protetora como a dos amigos;
Sombra que varia com o dia,
Que avança e faz variados rendados de luz,
semelhantes aqueles, de estrelas.
As Árvores são sinônimo de Eternidade.
Uma Verdadeira Amizade,
é PARA SEMPRE “

(Autor desconhecido)

MENÇÃO ESPECIAL

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin, por ter acreditado em meu potencial desde a época da graduação, pela dedicação, estima e apoio, em todas as fases desse projeto e, sem os quais, eu não teria obtido êxito neste trabalho. Mais do que um orientador, foi sempre um grande amigo. Minha eterna gratidão e carinho.

Marcelo

AGRADECIMENTO ESPECIAL

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – pela concessão da Bolsa e por ter acreditado na concepção deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Marcelo

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Lina e Avanir, por me incentivarem a seguir em frente, mesmo nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos Márcio e Mônica, por me apoiarem em mais essa vitória da minha vida.

Aos meus amigos Luiz Henrique Fioretto, Marcos Paulo Fávaro, Roberta Tavares de Lacerda, Silmara Sayuri Nomura e Valney Cassimiro da Silva, que sempre me ajudaram e incentivaram nesses anos de estudo.

Aos professores Dr. Elias Taylor Durgante Severo e Dr. Hernando Alfonso Lara Palma por participarem de minha banca de qualificação e por me ajudarem a enriquecer esse trabalho, através de suas largas experiências.

Aos professores do IB, em especial ao professor Dr. Adalberto José Crocci que sempre me atendeu com presteza, e pelo auxílio em toda parte estatística.

À Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, em especial à Profa. Dra. Raquel Gonçalves e ao prof. André Bartholomeu, pelo empréstimo do equipamento de ultra-som e pela infra-estrutura do laboratório.

À Estação Experimental de Itapeva, pela concessão das toras de *Pinus taeda* L., para a execução do programa experimental.

Ao Horto Florestal de Manduri, pela presteza com que executaram o processamento mecânico do material.

À Empresa Makenboy, de Manduri, pela colaboração na secagem da madeira.

Ao Aílton de Lima Lucas, pela colaboração nos ensaios, confecção dos corpos-de-prova e pela amizade.

Aos funcionários da marcenaria da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, pela disponibilidade e esmero na confecção dos corpos-de-prova.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural e do Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Campus de Botucatu, pela disponibilidade em ajudar sempre.

	Página
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	39
5.1 Material.....	39
5.2 Métodos	42
5.2.1 Determinação da densidade das toras	42
5.2.2 Desdobro das toras – produção de pranchas e tábuas	44
5.2.3 Processo de secagem dos toretes, das pranchas e das tábuas	47
5.2.4 Avaliação do módulo de elasticidade longitudinal.....	48
5.2.4 a) Avaliação visual dos defeitos das pranchas	48
5.2.4 b) Ensaio não-destrutivos nas pranchas.....	49
5.2.4 c) Ensaio não-destrutivos nos corpos-de-prova longitudinais	52
5.2.4 d) Ensaio destrutivos nos corpos-de-prova longitudinais .	56
5.2.5 Avaliação do módulo de elasticidade radial.....	58
5.2.5 a) Ensaio não-destrutivos nos corpos-de-prova radiais	60
5.2.5 b) Ensaio destrutivos nos corpos-de-prova radiais	60
5.2.6 Avaliação do módulo de elasticidade tangencial.....	62
5.2.6 a) Ensaio não-destrutivos nos corpos-de-prova tangenciais	64
5.2.6 b) Ensaio destrutivos nos corpos-de-prova tangenciais	64
5.2.7 Análise estatística	66
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
6.1 Madeira no estado verde.....	68
6.2 Madeira na umidade de equilíbrio ao ar	69
6.2.1 Avaliação do módulo de elasticidade longitudinal.....	70
6.2.1 a) Ensaio não-destrutivo nas pranchas	70
6.2.1 b) Ensaio não-destrutivos nos corpos-de-prova	71
6.2.1 c) Ensaio destrutivos nos corpos-de-prova	75

	Página
6.2.2 Avaliação do módulo de elasticidade radial.....	79
6.2.2 a) Ensaios não-destrutivos.....	79
6.2.2 b) Ensaios destrutivos	80
6.2.3 Avaliação do módulo de elasticidade tangencial.....	83
6.2.3 a) Ensaios não-destrutivos.....	83
6.2.3 b) Ensaios destrutivos	84
6.3 Relações entre variáveis	87
6.3.1 Dos ensaios estáticos	87
6.3.2 Dos ensaios dinâmicos	87
6.3.3 Dos ensaios estáticos e dinâmicos	88
6.3.3 a) Direção longitudinal.....	88
6.3.3 b) Direção radial	92
6.3.3 c) Direção tangencial	94
6.3.4 De resistência e elasticidade	100
 7 CONCLUSÕES.....	 101
 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 105
 9 APÊNDICES.....	 118

LISTA DE QUADROS

		Página
1	Velocidade de ultra-som em lenho inicial e tardio e outras correlações	18
2	Intervalos de variação dos valores do módulo de elasticidade longitudinal (E_L) calculados pelo método estático, método de ressonância e método do ultra-som.....	19
3	Constantes elásticas para <i>Sitka spruce</i> com teor de umidade de 12% obtidos de ensaios estáticos e dinâmicos	20
4	Módulos de elasticidade de Young E_L para a espécie <i>Douglas fir</i> com teor de umidade de 12% obtidos de ensaios estáticos e ensaios dinâmicos de ressonância e ultra-som.....	20
5	Velocidades e módulo de elasticidade para a espécie <i>Pinus radiata</i> D. obtidos de ensaios dinâmicos de ultra-som para diferentes dimensões de corpos-de-prova.....	21
6	Plantações de <i>Pinus</i> e <i>Eucalyptus</i> no Brasil (em 1000 ha)	30
7	Valores médios de madeiras coníferas nativa e de reflorestamento	31
8	Variação da proporção da madeira juvenil em função da idade de árvores de <i>Pinus taeda</i>	35
9	Dimensões principais dos indivíduos arbóreos abatidos	68
10	Resumo dos valores de umidade, densidade e densidade básica para os corpos-de-prova (discos) da madeira de <i>Pinus taeda</i> L.	69
11	Resumo dos valores de densidade, velocidade de propagação e módulo de elasticidade longitudinal obtidos através de ensaios não-destrutivos com o uso de ultra-som nas pranchas de <i>Pinus taeda</i> L....	70
12	Resumo dos valores de densidade, velocidade de propagação das ondas de ultra-som e módulo de elasticidade dinâmico para os corpos-de-prova longitudinais com 45 cm de comprimento.	71
13	Análise de variância para a densidade – corpos-de-prova longitudinais com 45 cm de comprimento.	72
14	Análise de variância para a densidade – corpos-de-prova longitudinais com 45 cm de comprimento.	72
15	Análise de variância para o módulo de elasticidade dinâmico (E_{dl}) – corpos-de-prova longitudinais com 45 cm de comprimento.	72
16	Valores de densidade, velocidade de propagação das ondas e ultra-som e módulo de elasticidade dinâmico para os corpos-de-prova longitudinais com 12 cm de comprimento.....	73

		Página
17	Resumo dos módulos de elasticidade obtidos através de ensaios convencionais destrutivos de compressão paralela às fibras da madeira de <i>Pinus taeda</i> L.....	76
18	Resumo dos valores de densidade, velocidade de propagação das ondas de ultra-som e módulo de elasticidade dinâmico para os corpos-de-prova radiais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L.	80
19	Resumo dos módulos de elasticidade estáticos obtidos através de ensaios de compressão normal às fibras nos corpos-de-prova radiais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L.....	81
20	Média das variáveis avaliadas segundo tratamento e resultado estatístico.....	83
21	Resumo dos valores de densidade, velocidade de propagação das ondas de ultra-som e módulo de elasticidade dinâmico para os corpos-de-prova tangenciais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L.....	84
22	Resumo dos módulos de elasticidade estáticos obtidos através de ensaios de compressão normal às fibras nos corpos-de-prova tangenciais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L.....	85
23	Sumário de estudos da relação entre o módulo de elasticidade obtido em função da velocidade de propagação em ensaios não-destrutivos e em ensaios estáticos convencionais para algumas espécies de madeira.....	91

LISTA DE FIGURAS

		Página
1	Influência do teor de umidade – na condição verde e a 12% de umidade – e do comprimento do corpo-de-prova na velocidade de propagação da onda de ultra-som (V_{LL}) quando a seção transversal é constante.....	24
2	Variação da velocidade de propagação (m/s) de ondas longitudinais em função da relação base/altura em corpos-de-prova de <i>Sapin douglas</i>	26
3	Variação da velocidade de propagação de ondas longitudinais (m/s) em função da relação L/λ em corpos-de-prova de <i>hêtre</i>	27
4	Influência da frequência na velocidade de ultra-som. (a) velocidade x frequência de 0,1 a 1,5 MHz; (b) comprimento de onda correspondente a V_{LL} x frequência	28
5	Madeira de <i>Pinus taeda</i> L	30
6	Principais espécies de <i>Pinus</i> plantadas no Brasil.....	31
7	Região de madeira juvenil, adulta e transição da madeira de <i>Pinus taeda</i>	36
8	Plantio tecnicamente conduzido de <i>Pinus taeda</i> L. na Estação Experimental de Itapeva — SP	40
9	a) medição do DAP dos indivíduos arbóreos de <i>Pinus taeda</i> ; b) corte das árvores selecionadas; c) medição da altura comercial e altura total e d) desgalhamento e traçamento das toras.....	41
10	a) retirada dos discos de <i>Pinus taeda</i> para os cálculos de umidade e densidade básica; b) discos completamente submersos, indicativo de que atingiram saturação; c) pesagem do disco saturado “ao ar”.....	43
11	a) e b) desdobro das toras em duas porções distintas de 1,25m e 2,50m a partir da base para a confecção dos corpos-de-prova; c) processamento das toras em discos para confecção dos corpos-de-prova radiais e tangenciais e d) torete destinados à confecção dos corpos-de-prova longitudinais	44
12	Modelo de extração dos corpos-de-prova a partir de uma tora para a determinação de módulos de elasticidade	45
13	Desdobro das pranchas centrais da tora. a) fixação da tora pelo menor diâmetro; b) detalhe da serra-fita; c) processamento mecânico da prancha e d) conformação final da prancha	46

		Página
14	a) desdobro das tábuas a partir das costaneiras laterais das toras; b) detalhe da costaneira; c) processamento mecânico das tábuas e d) vista geral do lote de tábuas	47
15	a) detalhe dos toretes destinados à confecção de discos e posteriormente corpos-de-prova radiais e tangenciais; b) vista geral dos toretes dentro da câmara de secagem; c) pranchas submetidas ao processo de secagem industrial e d) tábuas sendo introduzidas na câmara de secagem.....	48
16	a) identificação, quantificação e qualificação dos defeitos das pranchas. a) prancha 1 da árvore 1; b) prancha 2 da árvore 1; c) prancha 3 da árvore 1 e d) prancha 4 da árvore 1	49
17	Equipamento de ultra-som Steinkamp BP-5.....	50
18	Ensaio de ultra-som nas pranchas de <i>Pinus taeda</i> . a) vista geral do equipamento; b) região de madeira adulta; c) região de madeira juvenil e d) região medular	51
19	a) Desdobro das pranchas em 4 partes iguais; b) vista geral após processamento; c) descarte da casca e d) configuração final da prancha	53
20	Confecção dos corpos-de-prova longitudinais de madeira adulta. a) marcação da região de madeira adulta; b) processamento mecânico; c) e d) vista geral da prancha após processamento	54
21	Confecção dos corpos-de-prova longitudinais de madeira juvenil. a) marcação de 2,5cm a partir da medula; b) descarte da área medular....	54
22	Confecção dos corpos-de-prova longitudinais. a) acerto das faces na desempenadeira; b) passagem do corpo-de-prova pela desengrossadeira; c) acerto final na dimensão desejada e d) exemplares de madeira juvenil (ao centro) e madeira adulta (nas laterais).....	55
23	Execução do ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova longitudinais. a) calibração do aparelho; b) aplicação da camada de gel medicinal; c) vista geral do equipamento e d) obtenção da leitura do tempo de propagação da onda ultra-sonora	56
24	Execução do ensaio de compressão paralela nos corpos-de-prova longitudinais. a) vista geral do equipamento; b) detalhe do acoplamento do clip-gage; c) retirada do clip-gage e d) ruptura do corpo-de-prova	57

	Página
25 Preparação dos discos para confecção dos corpos-de-prova radiais. a) marcação da região; b) e c) processamento mecânico e d) descarte da casca.	58
26 Confecção dos corpos-de-prova radiais. a) vista geral do torno; b) finalização do torneamento do corpo-de-prova; c) corpo-de-prova isento de defeito e d) corpo-de-prova com defeito	59
27 Execução do ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova radiais. a) calibração do aparelho; b) aplicação da camada de gel medicinal; c) e d) obtenção da leitura do tempo de propagação da onda ultrassônica	60
28 Execução do ensaio de compressão normal às fibras nos corpos-de-prova radiais. a) vista geral do equipamento; b) detalhe do acoplamento do clip-gage; c) retirada do clip-gage e d) conformação final do corpo-de-prova, após realização do ensaio	61
29 Preparação dos discos para confecção dos corpos-de-prova tangenciais. a) descarte da região medular para confecção dos corpos-de-prova de madeira juvenil; b) acerto das faces do bloco de madeira juvenil e c) descarte da região da casca para a confecção dos corpos-de-prova de madeira adulta e d) acerto das faces do bloco de madeira adulta.	62
30 Confecção dos corpos-de-prova tangenciais. a) vista geral do torno; b) detalhe do torneamento do corpo-de-prova; c) conformação final do corpo-de-prova e d) corpos-de-prova de madeira juvenil (à esquerda) e de madeira adulta (à direita)	63
31 Execução do ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova tangenciais. a) calibração do aparelho; b) aplicação da camada de gel medicinal; c) e d) obtenção da leitura do tempo de propagação da onda ultrassônica	64
32 Execução do ensaio de compressão normal às fibras nos corpos-de-prova tangenciais. a) vista geral do equipamento; b) detalhe do acoplamento do clip-gage; c) retirada do clip-gage e d) conformação final do corpo-de-prova na fase final do ensaio	65
33 Resultados dos ensaios de compressão paralela às fibras dos corpos-de-prova longitudinais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L.	78
34 Exemplo dos resultados dos ensaios de compressão normal às fibras dos corpos-de-prova radiais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L.	82
35 Resultados dos ensaios de compressão normal às fibras dos corpos-de-prova tangenciais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L.	86

		Página
36	Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático avaliados em corpos-de-prova longitudinais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L. – valores individualizados dos corpos-de-prova	88
37	Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático avaliados em corpos-de-prova longitudinais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L. – valores médios das parcelas.....	89
38	Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático avaliados em corpos-de-prova longitudinais da madeira adulta de <i>Pinus taeda</i> L. – valores médios das parcelas.....	90
39	Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático avaliados em corpos-de-prova longitudinais da madeira juvenil de <i>Pinus taeda</i> L. – valores médios das parcelas.....	90
40	Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático avaliados em corpos-de-prova radiais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L. – valores individualizados dos corpos-de-prova	93
41	Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático avaliados em corpos-de-prova radiais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L. – valores médios dos tratamentos	94
42	Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático avaliados em corpos-de-prova tangenciais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L. – valores individualizados dos corpos-de-prova	95
43	Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático avaliados em corpos-de-prova tangenciais da madeira de <i>Pinus taeda</i> L. – valores médios das parcelas.....	96
44	Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático avaliados em corpos-de-prova tangenciais da madeira adulta de <i>Pinus taeda</i> L. – valores médios das parcelas.....	96
45	Correlação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático avaliados em corpos-de-prova tangenciais da madeira juvenil de <i>Pinus taeda</i> L. – valores médios das parcelas.....	97
46	Ensaio de compressão paralela às fibras. a) avaliação de deformações com o clip-gage; b) associação de molas em paralelo; c) ruptura do corpo-de-prova	98
47	Ensaio de compressão normal às fibras. a) avaliação de deformações com o clip-gage; b) associação de molas em série; c) ruptura do corpo-de-prova.	99
48	Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão paralela da madeira de <i>Pinus taeda</i> L. – valores individualizados dos corpos-de-prova	100

1. RESUMO

A avaliação não-destrutiva da madeira (NDE – *Non-destructive evaluation*) compreende o uso de um ou mais métodos para a quantificação de suas propriedades físicas e mecânicas, sem que haja qualquer comprometimento de seu uso final.

Na madeira, torna-se, dia-a-dia, mais comum o uso dessa ferramenta na inferência dos característicos balizadores da qualidade do material.

Dando prosseguimento a trabalho de maior amplitude com os ensaios não-destrutivos aplicados à madeira, iniciado junto ao Laboratório de Ensaios de Materiais da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP – Botucatu, este trabalho se propõe analisar a sensibilidade do método não-destrutivo do ultra-som (AU – *acousto-ultrasonic emission*) na inferência de módulos de elasticidade à compressão da madeira.

Adotou-se o *Pinus taeda* L. devido, principalmente, à disponibilidade de plantios conduzidos na região, e também pela fácil visualização dos anéis de crescimento e de outras particularidades dessa conífera, que podem interferir na transmissão das ondas ultrassônicas.

A madeira a ser utilizada nos trabalhos experimentais era originária de árvores com idade aproximada de 34 anos de plantios tecnicamente controlados do Horto Florestal do município de Itapeva, S.P.

Foram amostradas 6 árvores distintas, escolhidas ao acaso do talhão selecionado, dentre as que apresentaram maior retidão dos troncos. De cada árvore foram retiradas 4 toras, com cerca de 3,75 m de comprimento cada.

Todo material foi submetido a secagem industrial até a umidade de equilíbrio em torno de 12%. Com esse material confeccionaram-se os corpos-de-prova para a determinação de módulos de elasticidade longitudinal, radial e tangencial utilizando o ultra-som e avaliação destrutiva, através de ensaios de compressão paralela e normal às fibras. Para os ensaios não-destrutivos utilizou-se transdutores piezoelétricos de faces plana e frequência 45kHz. Todos os ensaios destrutivos seguiram, no geral, as prescrições da NBR 7190 — norma brasileira para o projeto e execução de estruturas de madeira. Considerando-se a análise de resíduos e os valores dos coeficientes de determinação obtidos para as regressões, pode-se dizer que a constante dinâmica obtida com essa técnica é, no geral, um bom estimador para o módulo de elasticidade estático. O método do ultra-som revelou sensibilidade na avaliação desse parâmetro mecânico da madeira na direção longitudinal ($R^2 \approx 0,90$). Para a direção radial, o método não destrutivo utilizando o ultra-som revelou pouca sensibilidade na avaliação do módulo de elasticidade estático ($R^2 \approx 0,62$). O método não-destrutivo não se mostrou sensível na avaliação do parâmetro na direção tangencial ($R^2 \approx 0,40$).

Palavras-chave: módulo de elasticidade, ultra-som, método do ultra-som, *Pinus taeda* L.

DETERMINATION OF THE THREE ORTHOTROPIC MODULUS OF ELASTICITY (MOE) OF PINUS TAEDA L. (*Pinus taeda* L.) USING ULTRASOUND. Botucatu, 2003. 154 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: MARCELO NOGUEIRA

Adviser: ADRIANO WAGNER BALLARIN

2. SUMMARY

Non-destructive evaluation of wood (NDE) comprises the usage of one or more methods to quantify physical and mechanical properties of wood, without altering its end-use capabilities. On wood technology, the usage of this practical tool is increasing daily on the inference of wood quality. As a part of a broader study, this paper aims evaluating the sensitivity of non-destructive ultrasonic method on the determination of the three principal orthotropic moduli of elasticity of wood. Loblolly pine (*P. taeda* L.) was selected considering its regional disposability and the complete visualization of its growth ring patterns that may be useful on the analysis of wave transmission influences. Six trees of *Pinus taeda* L., 34 years old, from controlled plantations of the Horto Florestal de Itapeva – Sao Paulo State, Brazil were randomly chosen for the experimental program. Each tree resulted on four logs 3,75 m long. From each log, longitudinal, radial and tangential specimens were prepared for non-destructive and destructive tests. Ultrasonic waves were input on specimens using 45 kHz transducers. Mechanical destructive tests were done according to NBR 7190/97 (Wooden structures design code). Comparisons between results of both tests on the three principal orthotropic directions of wood may confirm that the ultrasonic non-destructive method had good sensitivity to evaluate longitudinal MOE ($R^2 \approx 0,90$) of this wood. The method didn't present good sensitivity on evaluating radial MOE ($R^2 \approx 0,60$) and tangential MOE ($R^2 \approx 0,40$).

Keywords: modulus of elasticity, ultrasound, ultrasonic method, *P. taeda* L.

3. INTRODUÇÃO

A avaliação não-destrutiva (NDE – *Non-destructive evaluation*) compreende o uso de um ou mais métodos para a quantificação das propriedades físicas e mecânicas de um determinado material, sem que haja qualquer comprometimento de seu uso final.

Na grande maioria dos casos, a avaliação não-destrutiva é encaminhada com a realização de ensaios não-destrutivos (NDT- *Non-destructive tests*).

Para os metais e ligas metálicas, essa prática tem sido largamente utilizada na detecção de defeitos e descontinuidades do material. Na madeira, como as descontinuidades e defeitos são característico intrínseco do material, os ensaios não-destrutivos são usados, em geral, para avaliar como essas ocorrências afetam o desempenho físico-mecânico do material.

Dentre as principais vantagens dos ensaios não-destrutivos em relação aos ensaios destrutivos convencionais, pode-se citar:

- custos reduzidos dos equipamentos;
- boa calibração dos resultados indiretos obtidos;
- rapidez e praticidade dos testes, que podem ser aplicados tanto na árvore, quanto em peças dela retiradas tais como postes, madeira serrada ou mesmo corpos-de-prova de diferentes geometrias e tamanhos.

As pesquisas pioneiras sobre a aplicabilidade de ensaios não-destrutivos na inferência de propriedades físicas e mecânicas da madeira foram realizadas na década de 50, nos Estados Unidos.

Embora os Estados Unidos ainda detenham a primazia no desenvolvimento de conhecimentos nessa área específica, países como França, Suíça, Romênia, Alemanha, Japão e Reino Unido, entre outros, já têm figurado com notoriedade nesse cenário.

No Brasil, diversos núcleos de pesquisa da ciência e tecnologia da madeira têm realizado estudos iniciais com os ensaios não-destrutivos.

O Laboratório de Ensaio de Materiais, da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP – Botucatu, formalmente iniciou seus trabalhos com essa técnica quando da visita do Dr. Frank C. Beall, da Universidade de Berkeley – Califórnia, ocorrida em 1997. A partir de então, diversos estudos laboratoriais foram conduzidos, utilizando-se, inicialmente, métodos mais elementares como é o caso do método das ondas de tensão (*stress wave method*) e do método da ressonância (*ressonance method*). Desses estudos originaram-se diversos trabalhos científicos, já publicados em congressos nacionais e internacionais sobre o assunto, além de uma dissertação de mestrado.

O estudo, que ora se apresenta, pretende enfocar o uso do método do ultra-som (AU – *acousto-ultrasonic emission*) na determinação de módulos de elasticidade longitudinal, radial e tangencial da madeira de *Pinus taeda* L.

A técnica do ultra-som, mais avançada e de maior potencial que as demais, permite um maior controle das fontes emissoras de pulsos, sobretudo no que diz respeito às frequências das emissões. Além disso, parece ser mais promissora, na medida em que sua extensão à indústria — objetivo maior de um trabalho científico-investigativo — se daria de uma forma mais imediata e direta, conforme mostram os exemplos internacionais.

A escolha da madeira de *Pinus taeda* L. se deveu, sobretudo, à disponibilidade da madeira na região, sua importância na área plantada de *Pinus* no Brasil — 46% dos *Pinus* plantados no Brasil são da espécie *Pinus taeda* — e suas relativamente elevadas propriedades mecânicas em relação às demais espécies desse gênero.

Dando continuidade ao estudo das técnicas não-destrutivas aplicadas na caracterização físico-mecânica da madeira, este trabalho tem como objetivo principal **estudar a aplicação do método do ultra-som na determinação de módulos de elasticidade de *Pinus taeda* L.** na compressão nas direções paralela, radial e tangencial.

Pela sua oportunidade, o trabalho tem ainda os seguintes objetivos:

- realizar a calibração das respostas obtidas na técnica do ultra-som, mediante comparação de seus resultados com aqueles obtidos nos ensaios destrutivos convencionais;
- fornecer subsídios para a revisão da NBR 7190/97 no que tange aos ensaios estáticos;

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Métodos não-destrutivos

Historicamente, pesquisas para examinar o uso dos métodos de avaliação não-destrutiva na classificação estrutural da madeira e na classificação da qualidade da tora laminada foram feitas inicialmente por Bell et al. (1950), Galiginaitis et al. (1954), Jayne (1955, 1959), James (1959), Hoyle (1961) e McKean & Hoyle (1962);

Dois significativos progressos resultaram desses esforços iniciais:

- a máquina de classificação estrutural de madeira serrada — MSR - *Machine Stress Rating*;
- a classificação estrutural de lâminas para produção de painéis LVL - *Laminated Veneer Lumber*.

Esses equipamentos e métodos já têm uso sistemático na indústria madeireira americana.

Contudo, o mais significativo avanço propiciado pelos trabalhos inicialmente desenvolvidos nessa área foi a consolidação da hipótese, baseada nas propriedades fundamentais do material, que estabelece relações entre os parâmetros de medição utilizando técnicas não-destrutivas e as propriedades mecânicas.

As hipóteses fundamentais para ensaios não-destrutivos em madeira foram estabelecidas por Jayne (1959). Em seu trabalho, ele propôs que as propriedades de conservação e dissipação de energia na madeira, que podem ser mensuradas por métodos de

ensaios não-destrutivos, são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento estático estrutural do material. Consequentemente, podem ser estabelecidas relações matemáticas entre essas propriedades (conservação e dissipação de energia) e a resistência e elasticidade da madeira.

De fato, analisando a questão ao nível microscópico, pode-se constatar que as propriedades relacionadas à capacidade de armazenar energia são controladas pela orientação e composição estrutural das fibras da madeira. Esses fatores influem significativamente na resistência e elasticidade da madeira e, em ensaios não-destrutivos, são observáveis em termos de frequência de oscilação em vibração ou em termos de velocidade de propagação da onda.

Por outro lado, a dissipação de energia é ditada pelo atrito interno entre os elementos anatômicos do material, que está diretamente ligado às características de ligação e solidarização entre esses elementos. A taxa de amortecimento da vibração natural ou a atenuação de ondas acústicas são comumente empregadas na avaliação desse quesito.

Segundo Ross & Pellerin (1994), diversos são os métodos comumente empregados na avaliação não-destrutiva de produtos à base de madeira, podendo-se destacar como principais:

- método da flexão estática (Abbott & Elcock, 1987; Ross et al., 1997);
- método da vibração transversal (Hearmon, 1966; Perstorper, 1993; Cirad, 1998);
- método das ondas de tensão (Bertholf, 1965; Hearmon, 1966; Kaiserlik & Pellerin, 1977; Ross, 1985; Brashaw et al., 1996; Ross & Pellerin, 1994);
- método do ultra-som (Bucur, 1995, Fuentealba & Baradit, 2000; González & Karsulovic, 2000).

Diversos outros métodos não-destrutivos têm sido investigados para uso na madeira. Como exemplo, a atenuação de raio X foi utilizada para detectar vazios internos na madeira (Mothershead & Stacey, 1978) e para inspecionar postes e árvores em pé (Monro et al., 1990).

O método de retirada de pequenas amostras – baguetas (com diversos tipos de extratores de corpos-de-prova) também tem sido examinado. Embora de baixo custo, para alguns autores esse método tem aplicação limitada, sobretudo para

elementos de grandes dimensões. O método infere a resistência numa determinada região do material, tendo, assim, efeito localizado.

Outros testes, como por exemplo, o teste *Pilodyn*, têm sido empregados na avaliação de danos localizados ou superficiais na madeira. O teste *Pilodyn* consiste na avaliação da penetração de um pino impulsionado contra a madeira pelo efeito de molas. A profundidade de penetração avalia o grau de degradação do material (Hoffmeyer, 1978).

Nos últimos anos, diversos institutos de pesquisa têm voltado sua atenção para os métodos de ondas acústicas (*Acoustic emission* - *AE*) e ultra-sônicas (*Acousto-ultrasonic emission* - *AU*), que têm se mostrado eficientes para determinados propósitos, como por exemplo a avaliação da orientação da grã da madeira e outros aspectos morfológicos.

Por fim, tem-se utilizado ainda, em menor escala, os métodos de análise de imagens (*scanning techniques*), usando-se, por exemplo, a ressonância magnética (*NMR* - *nuclear magnetic resonance*) e a tomografia (*computer tomography images*) com diversos propósitos.

Dentre estes dois métodos, demonstra que a ressonância magnética teria maior aplicação para a área de tecnologia da madeira, uma vez que nesse método o elemento de contraste é a presença de água ou outros líquidos, enquanto no método da tomografia, a propriedade de contraste é a densidade do material.

Contudo, esses dois métodos são bastante caros e limitados para uso no campo, por conta dos equipamentos até o momento disponíveis (Ross et al., 1997).

4.2. Método do ultra-som

Os aspectos aqui tratados são uma compilação dos diversos capítulos de Bucur (1995), abordando-se quesitos teóricos e resultados práticos obtidos pela autora e por diversos outros pesquisadores da área de acústica da madeira.

As ondas acústicas de frequência superior a 20.000 Hz são chamadas ondas de ultra-som. O método ultrassonoro se apoia na análise de propagação de uma onda e de sua relação com as constantes elásticas da madeira. Em geral o método consiste em criar no interior de um corpo-de-prova uma ou várias ondas elásticas com ajuda

de uma sonda “piezoelétrica”. As ondas se propagam com velocidades que dependem da direção de propagação e das constantes elásticas do material. A tomada de tempo de propagação da onda, e consequentemente, de sua velocidade, permite indiretamente estimar essas constantes elásticas.

4.2.1. Matriz de rigidez e de flexibilidade

Métodos de vibração tais como o ultra-som ou outros cujas frequências se encontram em uma faixa audível possuem grande potencial para a caracterização mecânica de sólidos em geral e em particular para a madeira. Para uma compreensão mais aprofundada da propagação mecânica das ondas em meios de diferentes complexidades é necessária uma compreensão das teorias básicas que levam à determinação das propriedades elásticas da madeira ou de compósitos à base de madeira (módulos de elasticidade, coeficiente de Poisson e tensões). Harris & Crede (1961); Hearmon (1961); Snowdon (1968); Musgrave (1970); Auld (1973) e Dieulesaint & Royer (1974) são referências clássicas destes fundamentos, que aqui serão apresentadas resumidamente.

As propriedades elásticas dos sólidos podem ser definidas por meio da generalização da Lei de Hooke:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad , \text{ ou} \quad (1)$$

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2)$$

onde C_{ijkl} é a matriz de rigidez, S_{ijkl} contem os termos da matriz de flexibilidade e $i, j, k, l = 1, 2 \text{ ou } 3$.

Simplificadamente, expressando-se os tensores de tensão e deformação na forma vetorial, e os tensores C_{ijkl} e S_{ijkl} na forma matricial, as equações podem ser escritas como:

$$[\sigma] = [C] [\epsilon] \text{ e } [\epsilon] = [S] [\sigma]$$

Pelas expressões, nota-se que a matriz de rigidez $[C]$ é a inversa da matriz de flexibilidade $[S]$, ou seja, $[S] = [C]^{-1}$.

Experimentalmente, os termos da matriz $[C]$ podem ser determinados pelas medições realizadas por ultra-som, enquanto os termos da matriz $[S]$ podem ser determinados por ensaios estáticos.

Bodig & Jayne (1982) mostram a transformação da matriz de rigidez em matriz de flexibilidade para materiais com simetrias particulares, ditadas pela microestrutura de seus elementos constituintes (materiais isotrópicos, ortotrópicos, etc.)

Para todos os tipos de materiais torna-se possível correlacionar os termos da matriz de rigidez com os módulos de elasticidade longitudinal (E) e transversal (G) e com os coeficientes de Poisson (ν). Por outro lado, os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson podem ser relacionados à velocidade de propagação da onda no material. A complexidade das expressões que correlacionam estes parâmetros depende dos aspectos de simetria dos materiais.

Considerando que a madeira possui três eixos de simetria elástica ortogonais entre si (longitudinal, radial e transversal) pode ser considerada simplificada como um material ortotrópico linear.

As respostas do material às tensões em diferentes direções estão ligadas à organização de sua estrutura interna. A matriz de rigidez dos materiais isotrópicos é constituída de apenas duas constantes independentes.

Nos sólidos ortotrópicos as constantes elásticas são influenciadas mutuamente pelos três planos de simetria, tornando-se a análise mais complexa. A matriz de rigidez para estes materiais é simétrica e contém nove constantes independentes: seis termos diagonais (C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} e C_{66}) e três termos não diagonais (C_{12} , C_{13} e C_{23}).

$$\begin{bmatrix} C_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & (sim.) & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Na prática, é importante o conhecimento de parâmetros elásticos dos materiais de Engenharia. Love (1944), Green & Zerna (1968), Hearmon (1961) e Bodig & Jayne (1982) apresentam os fundamentos da relação entre estes parâmetros e os termos da matriz de rigidez e de flexibilidade para a madeira e para materiais compósitos à base de madeira.

Considerando a madeira como um material ortotrópico, os termos da matriz de flexibilidade são:

$$\begin{bmatrix} S_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & S_{44} & 0 & 0 \\ & (sim.) & & & S_{55} & 0 \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

O significado físico dos termos pode ser entendido pela equação:

$$[\epsilon_{ij}] = [S_{ijkl}][\sigma_{kl}] \quad , \text{ ou seja:}$$

$$\epsilon_{11} = S_{1111} \sigma_{11} + S_{1112} \sigma_{12} + S_{1113} \sigma_{13} + S_{1114} \sigma_{14} + S_{1115} \sigma_{15} + S_{1116} \sigma_{16} \quad (5)$$

Para a determinação de ϵ_{22} , ϵ_{33} , ϵ_{44} , ϵ_{55} e ϵ_{66} são utilizadas cinco equações similares.

4.2.2. Constantes técnicas (de Engenharia)

Os valores de S_{qq} ($q = 1, 2, 3$) relacionam uma tensão longitudinal a uma deformação longitudinal, ambas na mesma direção. Particularmente para a madeira, esta relação fornece os módulos de elasticidade de Young nas direções longitudinal, radial e transversal:

$$S_{11} = 1/E_L ; S_{22} = 1/E_R ; S_{33} = 1/E_T \quad (6)$$

Os valores de S_{qr} ($q \neq r$ e $q, r = 1, 2, 3$) relacionam uma deformação longitudinal a uma tensão perpendicular, e esta relação é dada por:

$$S_{qr} = -\nu_{rq}/E_r \quad (7)$$

Os seis coeficientes de Poisson podem ser determinados desta forma.

Os valores de S_{qq} ($q = 4, 5, 6$) relacionam uma deformação tangencial com uma tensão tangencial no mesmo plano e a relação é dada por:

$$S_{qq} = 1/G_q \quad (8)$$

Para a madeira, os termos S_{44} , S_{55} e S_{66} correspondem aos planos RT, LT e LR, respectivamente.

Desta maneira, adotando-se para a madeira os três eixos de simetria L, R e T, a matriz de flexibilidade se relaciona às constantes utilizadas na Engenharia da seguinte maneira:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-v_{RL}}{E_R} & \frac{-v_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & \frac{-v_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{LT}}{E_L} & \frac{-v_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

As relações entre os termos da matriz de rigidez e os termos da matriz de flexibilidade para materiais ortotrópicos são dadas pelas expressões:

$$C_{11} = [(S_{22} S_{33} - (S_{23})^2) / |S|]$$

$$C_{22} = [(S_{11} S_{33} - (S_{13})^2) / |S|]$$

$$C_{33} = [(S_{11} S_{22} - (S_{12})^2) / |S|]$$

$$C_{12} = [(S_{21} S_{33} - S_{23} S_{31}) / |S|]$$

$$C_{13} = [(S_{31} S_{22} - S_{21} S_{32}) / |S|]$$

$$C_{23} = [(S_{31} S_{12} - S_{11} S_{32}) / |S|]$$

$$C_{44} = 1/S_{44}$$

$$C_{55} = 1/S_{55}$$

$$C_{66} = 1/S_{66} \quad , \text{ onde}$$

$$|S| = S_{11}S_{22}S_{33} + 2S_{12}S_{23}S_{31} - S_{11}(S_{23})^2 - S_{22}(S_{13})^2 - S_{33}(S_{12})^2$$

$$|S| = \frac{1}{E_1 E_2 E_3} (1 - 2v_{21}v_{32} - v_{13}v_{31} - v_{23}v_{32} - v_{12}v_{21})$$

Considerando as relações mencionadas podem-se escrever as relações entre a matriz de rigidez e as constantes técnicas:

$$C_{11} = E_1 f(v_{ij}) \text{ ou}$$

$$C_{11} = E_1 (1 - v_{32}v_{23}) / (1 - 2v_{12}v_{23}v_{31} - v_{13}v_{31} - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32})$$

$$C_{22} = E_2 f(v_{ij}) \text{ ou}$$

$$C_{22} = E_2 (1 - v_{13}v_{31}) / (1 - 2v_{12}v_{23}v_{31} - v_{13}v_{31} - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32})$$

$$C_{33} = E_3 f(v_{ij}) \text{ ou}$$

$$C_{33} = E_3 (1 - v_{12}v_{21}) / (1 - 2v_{12}v_{23}v_{31} - v_{13}v_{31} - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32})$$

Portanto, os três módulos de elasticidade de Young são proporcionais aos elementos correspondentes da matriz de rigidez, corrigida pelos coeficientes de Poisson. Para corpos-de-prova longos, considerados infinitos, o fator de correção se situa próximo de 1.

Para os termos fora da diagonal da matriz de rigidez, tem-se:

$$C_{12} = E_1 (v_{12} + v_{32}v_{13}) / (1 - 2v_{12}v_{23}v_{31} - v_{13}v_{31} - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32})$$

$$C_{13} = E_1 (v_{13} + v_{12}v_{23}) / (1 - 2v_{12}v_{23}v_{31} - v_{13}v_{31} - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32})$$

$$C_{23} = E_2 (v_{23} + v_{13}v_{21}) / (1 - 2v_{12}v_{23}v_{31} - v_{13}v_{31} - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32})$$

Tomando-se como base os pontos abordados, assume-se que nove termos independentes da matriz de rigidez ou de flexibilidade caracterizam o comportamento elástico da madeira considerada como material ortotrópico. Ao se determinar os termos da matriz de rigidez, podem ser obtidos os doze parâmetros da Engenharia: três módulos de elasticidade de Young, três módulos de elasticidade transversais e seis coeficientes de Poisson.

A determinação destes termos pode ser realizada por meio da propagação de ondas de volume nos materiais. A teoria que envolve a determinação das equações que correlacionam a propagação da onda aos termos da matriz de rigidez, expressa na equação de Christoffel, foi apresentada por Hearmon (1961), Musgrave (1970), Green (1973), Auld (1973), Dieulesaint & Royer (1974) e Alippi & Mayer (1987), entre outros.

A forma geral para a determinação dos seis termos da diagonal da matriz de rigidez é:

$$C_{ii} = V_{ii}^2 \rho \quad , \text{ onde:} \quad (10)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, 6$

V = velocidade de propagação da onda no material na direção ii

ρ = densidade do material

Sendo que C_{11} , C_{22} e C_{33} propagação na direção longitudinal e C_{44} , C_{55} e C_{66} com propagação de onda de cisalhamento.

Para o cálculo dos termos não diagonais da matriz de rigidez, a propagação da onda deve se dar fora dos eixos principais de simetria. O cálculo dos termos não-diagonais requer, portanto, valores de velocidade obtidos para as ondas quase longitudinais e quase transversais. Estes valores, por sua vez, dependem do vetor de propagação e, conseqüentemente, da orientação do corpo-de-prova.

4.2.3. Propagação de ondas em sólidos ortotrópicos

Dois tipos de ondas podem ser reconhecidas nos sólidos: ondas de volume e ondas de superfície. As ondas de volume podem ainda se subdividir em ondas de compressão (longitudinal), ondas de cisalhamento (transversal) e ondas de torção.

Os métodos mais comuns de análise por ultra-som utilizam tanto as ondas longitudinais quanto as de cisalhamento. Quando o movimento da partícula se dá ao longo da direção de propagação da onda diz-se que a onda é longitudinal. Quando o movimento da partícula se dá perpendicularmente à direção de propagação da onda é denominada transversal ou de cisalhamento.

No caso das ondas de superfície a polarização ocorre de maneira elíptica no plano perpendicular à superfície ensaiada e paralela à direção de propagação Bucur (1995).

A medição da velocidade do ultra-som na madeira é a base da avaliação não destrutiva das propriedades elásticas da madeira.

A velocidade do ultra-som depende da frequência e é dada por:

$$v = f \cdot \lambda \quad , \text{ onde:} \quad (11)$$

f - frequência de propagação da onda;

λ - comprimento de onda.

A dispersão da onda pode ocorrer em função da geometria do corpo-de-prova, da natureza do material, da dispersão da energia dentro do material durante a propagação (atenuação da onda) etc.

Segundo Frederick (1965), a velocidade da onda na madeira, com teor de umidade de 12%, submetida à uma frequência de 1MHz, gira em torno de 6000 m/s para ondas longitudinais na direção das fibras e de 400 m/s para ondas transversais no plano radial-tangencial, desde que o tamanho da peça permita que a propagação da onda não seja afetada, ou seja, é necessário que a barra tenha comprimento infinito, ou muitas vezes superior ao comprimento da onda e diâmetro da ordem de 1/10 do comprimento da onda que nele se propaga.

Relativamente à influência das propriedades físicas na velocidade de propagação do ultra-som, Burmester (1965) realizou uma análise detalhada na qual inseriu em um gráfico, separadamente, velocidades de ultra-som e densidade para duas espécies — *spruce* e *limba*. Notou que a primeira reagiu às ondas de ultra-som da mesma maneira complicada como reagem os materiais compósitos, enquanto que a espécie *limba* reagiu de maneira mais parecida com os materiais homogêneos e ortotrópicos.

O mesmo autor realizou, ainda, análise da influência da madeira de inverno — lenho tardio — e de primavera — lenho inicial — na velocidade, usando para isso os anéis de crescimento. Em relação a este aspecto, há divergências entre os autores. Burmester (1965) concluiu que a velocidade na madeira de primavera é menor do que na madeira de inverno. Yiannos & Taylor (1967) encontraram velocidades maiores em madeira de inverno do que em madeira de primavera para a espécie *pine*. Já Gerhards (1978)

concluiu que madeira de inverno ou primavera não têm efeito na velocidade de ultra-som quando medida paralelamente às fibras, para as espécies *Stika spruce* e *Southern pine*.

O Quadro 1 apresenta resultados no que tange à velocidade de ultra-som em lenho inicial e tardio, em estudos realizados por Bucur (1983). Os resultados mostram que as velocidades nas direções L e T (V_{LL} e V_{TT}) são diferentes nas regiões de lenho inicial e tardio, sendo ligeiramente maiores para o lenho tardio do que para o lenho inicial. O quadro mostra ainda que a velocidade difere, também, quando se toma a madeira de maneira geral, ou seja, sem subdividi-la nos dois diferentes lenhos. No mesmo trabalho de Bucur (1983), relações estatisticamente significantes a 1% também foram estabelecidas entre velocidade e densidade.

Quadro 1 – Velocidade de ultra-som em lenho inicial e tardio e outras correlações

Variáveis	Madeira de primavera (74%)	Madeira de inverno (26%)	Madeira (100%)
V_{LL} (m/s)	3226	3650	5500
V_{TT} (m/s)	1062	1468	1500
Densidade (kg/m^3)	364	636	426
Coefficiente de correlação (V e ρ)	0,578	0,613	

Fonte: Bucur (1983)

Bucur & Feeney (1992), ao estudar a influência da frequência na velocidade do ultra-som utilizando ondas longitudinais e transversais nas frequências: 100, 250, 500, 1000 e 1500 KHz notaram que a velocidade v_{11} é a mais influenciada pela frequência, com um grande acréscimo de valores quando as frequências variam de 100 kHz à 250 kHz, observando, ainda, um constante mas pequeno acréscimo na velocidade de quando as frequências variaram de 250 kHz a 1500 kHz. As velocidades V_{22} , V_{33} , V_{44} , V_{55} e V_{66} foram insensíveis à variação das frequências maiores que 250kHz. Acima deste valor, assume-se que o comprimento de onda é muito maior do que a dimensão dos elementos estruturais do material. Todavia, quanto mais o comprimento de onda se aproxima das dimensões dos comprimentos celulares, mais a velocidade se torna dependente da frequência.

Musgrave (1961) foi o primeiro a determinar todos os termos na matriz de rigidez para a espécie *spruce*. Utilizando os dados de Horig (1935), Musgrave deduziu os nove termos da matriz de rigidez.

O Quadro 2 apresenta a comparação entre resultados de ensaios estáticos e dinâmicos utilizando 8 corpos-de-prova da espécie *Douglas fir*. O quadro evidencia que os valores de E_L calculados pelo método do ultra-som foram maiores do que aqueles obtidos nos outros ensaios.

Quadro 2 – Intervalos de variação dos valores do módulo de elasticidade longitudinal (E_L) calculados pelo método estático, método de ressonância e método do ultra-som. Espécie: *Douglas fir*

Método de ensaio	Ensaio estático E_L	Ressonância E_L	Ultra-som C_{LL}
Valores em 10^8 N/m^2	73,4 – 117,4	59,0 – 118,0	149,7

Fonte: Sinclair & Farshad, apud Bucur (1995)

A comparação de resultados pode ser feita, com maior precisão, quando se analisa um grande número de ensaios dinâmicos e estáticos. Nos Quadros 3 e 4 são apresentados os resultados de Bucur et al. (1987) e Haines et al. (1993), respectivamente.

Os dados apresentados por Bucur demonstram que o módulo de Young na compressão paralela às fibras em corpos-de-prova cúbicos é ligeiramente maior para os ensaios dinâmicos utilizando o ultra-som. Pluinage (1985) e Launay et al. (1988) chegaram a mesma conclusão ensaiando as espécies *beech* e *Sitka spruce*, respectivamente à flexão e à compressão paralela.

Do Quadro 4 nota-se que o módulo de Young E_L obtido pelo método da ressonância é aproximadamente 10% mais alto do que o obtido no ensaio estático. Os termos C_{LL} da matriz de rigidez são em torno de 22% mais altos do que os valores de E_L obtidos no ensaio estático devido a não correção do coeficiente de Poisson.

Quadro 3 – Constantes elásticas para *Sitka spruce* com teor de umidade de 12% obtidos de ensaios estáticos e dinâmicos

Constantes Elásticas		Ensaio Estático	Ensaio Dinâmicos (ultra-som)
Módulos de Elasticidade (10^8 N/m ²)	E_L	90,36	95,64
	E_R	8,17	10,37
	E_T	4,03	4,87
	G_{TR}	-	0,91
	G_{LT}	-	10,95
	G_{LR}	-	11,96
Coeficientes de Poisson (10^{-3})	ν_{LR}	57	45
	ν_{LT}	29	49
	ν_{RT}	438	43

Fonte: Bucur apud Bucur (1995).

Quadro 4 – Módulo de elasticidade de Young E_L para a espécie *Douglas fir* com teor de umidade de 12% obtidos de ensaios estáticos e ensaios dinâmicos de ressonância e ultra-som.

Parâmetros	Unidades	Média	Coeficiente de Variação (%)
Densidade	Kg/m ³	465	11
E_L estático	10^8 N/m ²	126	19
E_L ressonância	10^8 N/m ²	139	17
C_{LL} ultra-som	10^8 N/m ²	154	15

Fonte: Haines apud Bucur (1995)

Das constantes elásticas utilizadas na engenharia (especialmente aquelas obtidas por ensaios estáticos) pode-se notar que, na maioria dos casos, somente o módulo de elasticidade longitudinal de Young (E_L) é mencionado na literatura nacional. Os outros módulos E_R , E_T , ou o módulo de elasticidade transversal, raramente são mencionados.

Fuentealba & Baradit (2000), ao determinarem as constantes elásticas da madeira de *Pinus radiata* D. com o uso de ultra-som, utilizaram corpos-de-prova de formato cúbico nas dimensões: 16, 20, 25, 30 e 50 mm e verificaram que os módulos de elasticidade obtidos por ensaios não-destrutivos, quando comparados aos ensaios mecânicos, apresentaram valores muito próximos (Quadro 5). No entanto, torna-se necessária uma otimização da potência de emissão dos pulsos e um estudo profundo com a

finalidade de resolver a situação vinculada à superposição de ondas, principalmente devido ao efeito de reflexão das mesmas.

O Quadro 5 apresenta os valores de velocidades e dos módulos de elasticidade de *Pinus radiata* D. obtidos por Fuentealba & Baradit (2000) em ensaios utilizando-se ultra-som. Vale salientar que nos ensaios mecânicos os valores do módulo de elasticidade oscilaram entre 9000 e 15000 MPa na direção longitudinal, 650 a 1100 MPa na direção tangencial e 1500 a 1800 MPa na direção radial.

Quadro 5 – Velocidades e Módulo de elasticidade para a espécie *Pinus radiata* D. obtidos de ensaios dinâmicos de ultra-som para diferentes dimensões de corpos-de-prova.

Dimensões Cubos (mm)	Densidade (kg/m ³)	Velocidade (m/s)			Módulo de Elasticidade (MPa)		
		V _{LL}	V _{RR}	V _{TT}	LL	RR	TT
16	500	4472	1839	1680	9200	1555	1300
20	550	4467	2000	1427	10974	2200	1120
25	530	4717	1952	1638	11792	2020	1422
30	460	4667	2097	1606	11543	2330	1367
50	550	5142	2040	1565	14542	2288	1347

Fonte: Fuentealba & Baradit (2000)

Bozo & Karsulovic (2000), estudando o efeito da densidade, a presença de nós e a inclinação das fibras na velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas em corpos-de-prova cúbicos de *Pinus radiata* verificaram que existe um efeito da densidade na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas. Este efeito ficou muito claro para o caso da velocidade de propagação na direção longitudinal ou paralela às fibras. A relação que existe entre a densidade da madeira e a velocidade de propagação longitudinal (V_L) é inversa, ou seja, quanto maior a densidade, menor a velocidade de propagação. No caso da velocidade de propagação nas direções tangencial (V_T) e radial (V_R) o efeito da densidade não ficou tão evidenciado.

Os autores descreveram, ainda, o efeito que a ortogonalidade da madeira tem na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas, encontrando-se uma maior velocidade na direção longitudinal ou paralelo às fibras (V_L) seguido pela velocidade na direção radial (V_R) e finalmente pela velocidade na direção tangencial (V_T), na razão

5:2:1,5 respectivamente, o que concorda com a relação existente entre os módulos de elasticidade: $E_L > E_R > E_T$.

No que tange a madeira com presença ou não de nós, a grande diferença que existe entre a densidade da madeira com nós e a madeira livre de defeitos é um fator fundamental para a detecção deste tipo de defeito utilizando o ultra-som. Puccini (2002) observou que para a madeira de *Pinus taeda* L. a velocidade média de propagação longitudinal das ondas para a madeira com presença de nós é 17% menor quando comparada a velocidade média obtida na madeira sã.

Segundo Bozo & Karsulovic (2000), a madeira que apresenta nós confere uma velocidade de propagação significativamente inferior a madeira livre de defeitos (cerca de 47%). Isto se deve fundamentalmente ao fato de que a madeira do nó é absolutamente distinta a da madeira normal, tanto quanto a estrutura, composição química e densidade, o que significa que a madeira do nó apresenta uma maior resistência a propagação das ondas ultrassônicas do que a madeira normal.

Os mesmos autores discutiram ainda o efeito da inclinação das fibras. Uma inclinação das fibras no eixo “R” representa uma diminuição na velocidade de propagação na direção paralela às fibras (V_L) e um aumento na velocidade de propagação na direção tangencial (V_T). Isto se deve ao fato de que quando se aumenta a inclinação das fibras no eixo “R”, a direção longitudinal vai se transformando paulatinamente em tangencial e a direção tangencial em longitudinal.

O efeito do ângulo de inclinação das fibras no eixo “T” se processa de forma similar, ou seja, um maior ângulo de inclinação das fibras manifesta uma diminuição da velocidade de propagação das ondas na direção paralela às fibras (V_L) e um aumento da velocidade de propagação na direção radial (V_R).

4.2.4 Fatores que afetam a propagação do ultra-som na madeira

4.2.4.1 Teor de Umidade

Da mesma forma que o teor de umidade afeta as propriedades mecânicas da madeira nos ensaios estáticos, ele o faz nas propriedades mecânicas via ensaios dinâmicos.

A água existente no interior das madeiras pode ser encontrada em três diferentes formas:

- ✓ Água livre ou capilar, ocupando parcial ou completamente o lúmen das células, os espaços intercelulares e aberturas de pontuações;
- ✓ Água de impregnação ou higroscópica, quimicamente ligada por pontes de hidrogênio, às cadeias de celulose das paredes celulares;
- ✓ Vapor d'água, que pode estar, assim como a água livre, contido nos espaços vazios das cavidades celulares.

A transição de água higroscópica para água livre ocorre a partir do ponto de saturação das fibras (PSF), que corresponde ao valor de umidade abaixo do qual toda água existente é higroscópica. O PSF situa-se numa faixa entre 22 e 30% de umidade, variando de espécie para espécie e, a partir desse ponto é que ocorrem as alterações na estrutura da madeira, tais como: contrações que podem causar defeitos como empenamentos e rachaduras e conseqüentemente alterações na sua resistência mecânica e física.

De maneira geral, o teor de umidade da madeira é função da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente. O valor de umidade no qual a madeira estabiliza-se, ou seja, não ganha e não perde água para o ambiente é definido como umidade de equilíbrio da madeira.

A velocidade de propagação da onda ultrassônicas decresce consideravelmente com o aumento do teor de umidade do corpo-de-prova, até o ponto de saturação das fibras. A partir deste valor, a velocidade tende a estabilizar-se e tornar-se praticamente constante.

Tiemann (1906) foi o pioneiro a observar que as propriedades mecânicas da madeira são afetadas somente pela água higroscópica ou de impregnação, uma vez que somente a parede celular contribui efetivamente na resistência.

Estudando a variação da velocidade longitudinal do ultra-som em função de vários teores de umidade, em corpos-de-prova da espécie *metasequoia*

(*Metasequoia glyptostroboides*), Sakai et al., citados por Bucur (1995) elaboraram um gráfico que mostra a variação da velocidade longitudinal de ultra-som em corpos-de-prova em função do teor de umidade (Figura 1) e este apresentou um decréscimo de 21% na velocidade do ultra-som entre os teores de umidade de 0 e 38%.

Nesta faixa de teor de umidade, há uma quantidade variável de água de impregnação presente na madeira, até o ponto de saturação das fibras (PSF). A partir do PSF, as células da madeira preenchem-se com água livre e a velocidade do ultra-som tende a estabilizar-se, uma vez que a presença da água em grande quantidade aumenta a atenuação das ondas ultrassônicas. Até o ponto de equilíbrio, o mecanismo de atenuação está relacionado às características da parede celular. Do ponto de equilíbrio ao ponto de saturação das fibras (PSF), a atenuação se dá no contorno do elemento anatômico e acima do ponto de saturação das fibras a dispersão se dá em função da porosidade.

De 0 % de umidade até o PSF, a água de impregnação presente confere baixa atenuação às ondas e não prejudica substancialmente a transferência de energia ultra-sônica de célula à célula, conferindo à velocidade uma condição não-perturbada.

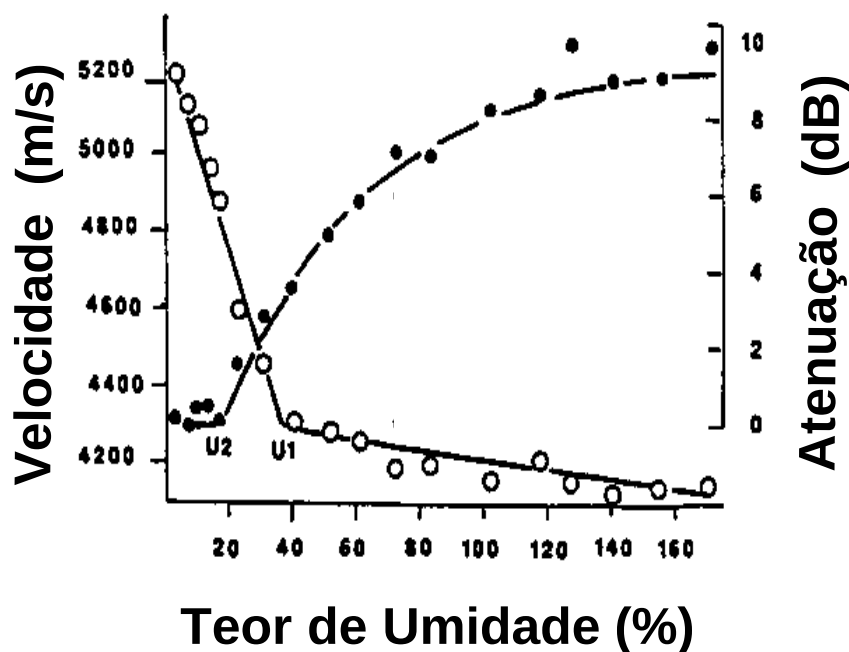


Figura 1 – Variação da velocidade longitudinal de ultra-som (curva U1) e da atenuação das ondas ultrassônicas (curva U2) em função do teor de umidade em corpos-de-prova de metasequoia. Sakai et al., apud Bucur (1995) modificado pelo autor.

Gerhards, citado por Herzig (1992), estudou a variação da velocidade de propagação, módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático na flexão, de 5 peças de Sweetgum (*Liquidambar styraciflua*), de seção nominal 0,051 x 0,102 e 2,438m de comprimento, com teores de umidade variando entre 15 e 150%. O autor constatou uma diminuição da velocidade de 14% entre os teores de umidade de 15 e 50% e uma diminuição de 6% entre os teores de 50 a 150%.

No cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, dado pela Equação (10), utiliza-se a densidade aparente (ρ). Quando a peça de madeira possui teor de umidade acima do PSF, a água livre influi consideravelmente na densidade aparente, superestimando o valor de C_{LL} .

Da revisão de literatura pode-se concluir que a velocidade de propagação é consideravelmente influenciada pela existência de água higroscópica, enquanto a atenuação é sensivelmente influenciada pela presença de água livre.

4.2.4.2 Dimensões da seção transversal e comprimento do corpo-de-prova

Em virtude da madeira constituir-se num material visco-elástico, o pulso ultra-sonoro que se propaga em seu interior é decomposto em componentes frequenciais, que se propagam em velocidades que lhe são próprias (Herzig, 1992).

As equações gerais apresentadas nos estudos sobre propagação de ondas em meio sólido partem do princípio ideal de que o comprimento da onda é muito superior às dimensões da seção transversal do corpo pela qual essa onda atravessa. Segundo Frederick (1965), para que a equação da velocidade (10) não seja afetada, o meio no qual a onda se propaga deve ser infinito, ou seja, quando a barra possuir comprimento muitas vezes superior ao comprimento da onda que a perturba, a influência das condições de contorno são negligenciadas. Isso não acontece, por exemplo, numa barra circular, cujo diâmetro tenha a mesma ordem de grandeza do comprimento da onda.

Para que a equação (10) seja realmente válida, é necessário que a barra tenha comprimento infinito, ou muitas vezes superior ao comprimento de onda e diâmetro da ordem de 1/10 do comprimento da onda que nela se propaga.

Na prática, quando não se tem uma situação ideal, tais princípios são aplicados em peças de madeira de seção comercial fazendo-se uma aproximação da teoria.

Bucur (1984) estudou a variação da velocidade de propagação da onda de ultra-som, em função da variação da seção transversal, em corpos-de-prova de *Douglas sapin* (*Abies alba*) de 0,30m de comprimento e com relação base/altura da seção transversal variando entre 1 e 14.

Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 2.

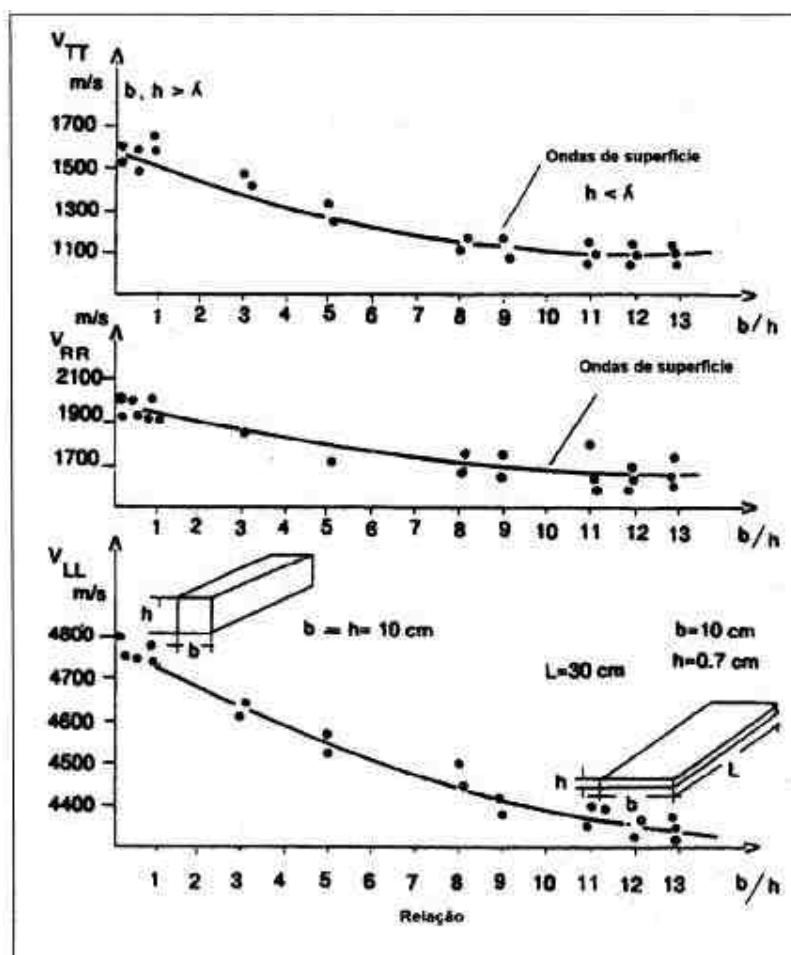


Figura 2 – Variação da velocidade de propagação (m/s) de ondas longitudinais em função da relação base/altura em corpos-de-prova de *Douglas sapin* (Bucur, 1984 adaptado por Bartholomeu, 2001).

Através da curva apresentada observa-se, nas velocidades, uma diferença de 12% entre a relação $b/h=1$ e a relação $b/h=14$.

Outro fator preponderante na variação da velocidade longitudinal é a relação L/λ , onde:

L = comprimento do corpo-de-prova ou peça estrutural;

λ = comprimento de onda.

Da equação (11) o comprimento de onda é dado por:

$$\lambda = V / f \quad \text{onde:} \quad (12)$$

V = velocidade de propagação da onda de ultra-som;

f = frequência da onda de ultra-som.

Bucur (1984) analisou a variação da velocidade de ondas longitudinais em função da relação L/λ , em corpos-de-prova de *Hêtre* (*Fagus sylvatica*), obtendo os resultados apresentados na Figura 3.

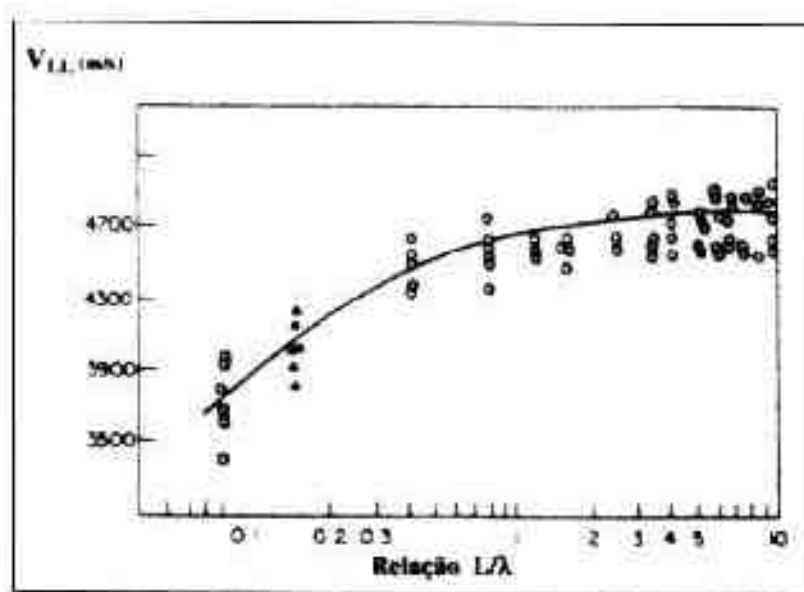


Figura 3 – Variação da velocidade de propagação de ondas longitudinais (m/s) em função da relação L/λ , em corpos-de-prova de *Hêtre* (Bucur, 1984 adaptado por Bartholomeu, 2001).

Pela Figura 3, nota-se que a taxa mais acentuada de variação da velocidade longitudinal ocorre entre as relações $L/\lambda = 0,1$ e $L/\lambda = 1$, ou seja, uma variação de aproximadamente 30%, enquanto que entre as relações $L/\lambda = 1$ e $L/\lambda = 10$, a variação fica em 2,6%.

4.2.4.3 Frequência

A influência da frequência na propagação de ondas ultrassônicas em peças de madeira é dependente, sobretudo, do tamanho dos corpos-de-prova.

Alguns autores estudaram os efeitos das variações de frequência, chegando a resultados aparentemente contraditórios.

Bucur & Feeney (1992) realizaram um estudo com ondas longitudinais e transversais, no qual utilizaram frequências de 100, 250, 500, 1000 e 1500 kHz. A Figura 4 representa as observações realizadas na experimentação.

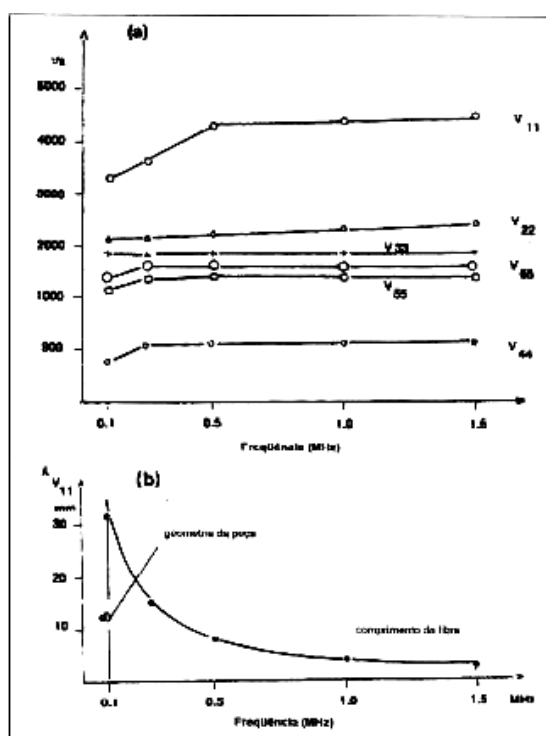


Figura 4 – Influência da frequência na velocidade de ultra-som. (a) velocidade x frequência de 0,1 a 1,5 MHz; (b) comprimento de onda correspondente a V_{LL} x frequência (Bucur, 1984, adaptado por Bartholomeu, 2001).

A velocidade longitudinal V_{LL} foi a mais influenciada pela frequência, sofrendo grande acréscimo no intervalo compreendido entre 100 e 250 kHz e um pequeno, porém constante acréscimo no intervalo compreendido entre 250 e 1500 kHz. Os valores relativamente pequenos de velocidades, medidas a 100 kHz, foram provavelmente induzidos pela dispersão geométrica. As velocidades V_{22} , V_{33} , V_{44} , V_{55} e V_{66} foram insensíveis à variação das frequências para valores acima de 250 kHz.

Herzig (1992) ensaiou corpos-de-prova de seção transversal de 0,025 x 0,025m e de comprimento de 0,005; 0,01; 0,015; 0,025; 0,05; 0,075 e 0,1m, da espécie *Picea* sp. Neste trabalho, o autor utilizou frequências de 1 a 5 MHz, em ondas longitudinais. Seus resultados demonstraram que, até um comprimento de 0,05m, a velocidade aumenta com o aumento da frequência, confirmando o fato da madeira constituir-se num material visco-elástico — as frequências elevadas se propagam mais rapidamente que as baixas frequências.

A partir do comprimento de 0,05m, as velocidades obtidas na frequência de 5MHz foram inferiores àsquelas obtidas na frequência de 1 MHz, fato explicado pelo fenômeno da atenuação, que perturba a transmissão dos sinais e provoca uma diminuição da velocidade.

Em contrapartida, Mishiro & Miwa (1994), em seus ensaios com as espécies Spruce (*Picea* sp.) e Katsura (*Cercidiphyllum japonicum*), não encontraram variação de velocidade numa faixa de frequências entre 50 kHz e 5MHz.

4.2.5 Breve descrição do gênero *Pinus*

O *Pinus taeda* é uma conífera do gênero *Pinus*, da família botânica das Pinaceae. É uma árvore de grande porte, podendo atingir alturas de até 30 a 50m, dependendo da espécie.

O gênero *Pinus* ocorre em todo o hemisfério Norte, sendo que o *Pinus taeda* é originário das regiões leste e sudeste dos Estados Unidos.

O Brasil possui grandes áreas de plantios do gênero *Pinus*, principalmente na região sul do país, sendo o Estado do Paraná responsável por cerca de 35% do plantio nacional, conforme mostra o Quadro 6.

Quadro 6 – Plantações de *Pinus* e *Eucalyptus* no Brasil (em 1000 ha).

ESTADO	PINUS	EUCALYPTUS	TOTAL
AMAPÁ	78.870	12.500	91.370
PARÁ	14.300	45.700	60.000
RIO GRANDE DO SUL	136.800	115.900	252.700
SANTA CATARINA	318.120	41.550	349.670
PARANÁ	605.130	76.000	672.130
SÃO PAULO	202.010	574.150	778.160
MATO GROSSO DO SUL	49.900	80.000	129.900
MINAS GERAIS	143.410	1.523.750	1.887.160
BAHIA	238.390	213.400	451.790
ESPÍRITO SANTO	---	152.330	152.330
OUTROS	37.830	128.500	166.330
TOTAL	1.824.760	2.954.780	4.779.540

Fonte: Tomaselli (1998)

O *Pinus taeda* L. possui uma densidade básica média em torno de 0,47 g/cm³ à 0,51 g/cm³, sendo uma madeira muito utilizada na indústria moveleira, em construções civis, na produção de compensados e laminados, e na produção de chapas de fibras e partículas. (Bortoletto Jr, 1993). Seções longitudinais e transversais da madeira de *Pinus taeda* L. são apresentadas na Figura 5.

O Brasil cultiva várias espécies de *Pinus*, sendo o *Pinus taeda* L. plantado em maior escala, conforme se visualiza na Figura 6.



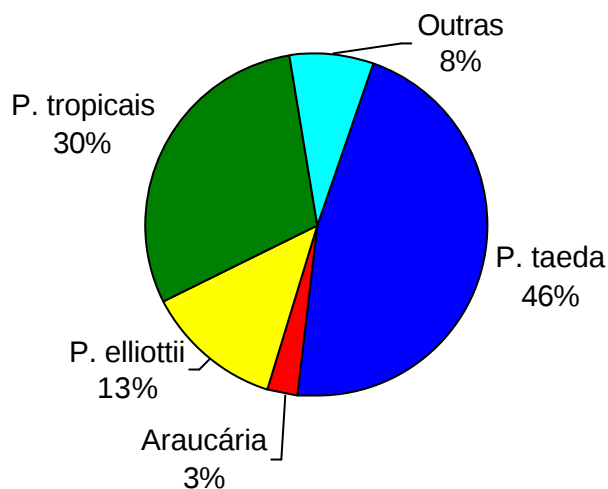
a) Seção longitudinal



b) Seção transversal

Figura 5 – Madeira de *Pinus taeda*. L.

Fonte: Longsdon (1998)



Fonte: Tomaselli (1998)

Figura 6 – Principais espécies de *Pinus* plantadas no Brasil

O Quadro 7, extraído da NBR 7190 (ABNT, 1997) – Norma para o projeto de estruturas de madeira – mostra, para algumas espécies de *Pinus* e para a *Araucária*, as respectivas resistências à compressão paralela às fibras, à tração normal e paralela às fibras, ao cisalhamento, além de seus módulos de elasticidade obtidos no ensaio de compressão paralela às fibras.

Quadro 7 - Valores médios de madeiras coníferas nativas e de florestamento

Nome comum (coníferas)	Nome científico	$r_{ap(12\%)}$ (kg/m ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_v (MPa)	E_{c0} (MPa)	n
Pinho do Paraná	<i>Araucaria angustifolia</i>	580	40,9	93,1	1,6	8,8	15225	15
Pinus caribea	<i>Pinus caribea</i> var. <i>caribea</i>	579	35,4	64,8	3,2	7,8	8431	28
Pinus bahamensis	<i>Pinus caribea</i> var. <i>bahamensis</i>	537	32,6	52,7	2,4	6,8	7110	32
Pinus hondurensis	<i>Pinus caribea</i> var. <i>hondurensis</i>	535	42,3	50,3	2,6	7,8	9868	99
Pinus elliottii	<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	560	40,4	66,0	2,5	7,4	11889	21
Pinus oocarpa	<i>Pinus oocarpa shiede</i>	538	43,6	60,9	2,5	8,0	10904	71
<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda</i> L.	645	44,4	82,8	2,8	7,7	13304	15
$r_{ap(12\%)}$ - massa específica aparente a 12% de umidade f_{c0} - resistência à compressão paralela às fibras f_{t0} - resistência à tração paralela às fibras f_{t90} - resistência à tração normal às fibras f_v - resistência ao cisalhamento E_{c0} - módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras n - número de corpos-de-prova ensaiados Coeficiente de variação para resistências às solicitações normais $\delta = 18\%$ Coeficiente de variação para resistências às solicitações tangenciais $\delta = 28\%$								

Fonte: NBR 7190 (ABNT, 1997)

4.2.6 Madeira Juvenil e Adulta

4.2.6.1 Conceito de madeira juvenil

A madeira juvenil corresponde a uma região central na árvore de forma cilíndrica, com diâmetro aproximadamente uniforme, estendendo-se desde a base até o topo da árvore, podendo formar parte do alburno ou do ceme no tronco, se este último já estiver presente na árvore (Krahmer, 1986; Zobel & Buijtenen, 1989; Cown, 1992; Evans et al., 2000).

Segundo Ramsay & Briggs (1986), a madeira juvenil é o xilema secundário, formado durante a fase jovem do câmbio vascular da árvore (estágios iniciais da vida da árvore). Este período varia conforme a espécie e pode ser afetado pelas condições ambientais. A madeira caracteriza-se anatomicamente por um progressivo acréscimo nas dimensões das células e correspondentes alterações na sua forma, estrutura e disposição em sucessivos anéis de crescimento.

Comparando-se coníferas com folhosas, a formação de madeira juvenil é mais acentuada nas coníferas (Krahmer, 1986; Zobel & Buijtenen, 1989; Evans et al. 2000).

De uma forma geral, a maioria dos artigos sobre madeira juvenil enfatiza que o crescimento rápido nas plantações origina a formação de madeira de qualidade inferior e que, na atualidade, é grande a proporção de madeira juvenil comercializada nos mercados, trazendo como resultado problemas de qualidade nos produtos obtidos deste tipo de matéria-prima (Brown & McWilliams, 1989).

Independente da idade da árvore, a região de madeira juvenil ocorre desde o topo até a base da árvore e dentro de um determinado número de anéis de crescimento desde o centro. Assim, a zona de madeira juvenil é semelhante a um cilindro localizado no centro da árvore, em que a ponta do tronco é constituída principalmente de madeira juvenil e a base contendo uma maior porcentagem de madeira adulta.

4.2.6.2 Ocorrência e demarcação da madeira juvenil

Segundo Zobel (1979) e Zobel & Kellison (1984), a madeira de pinus nas regiões tropicais e sub-tropicais tem rendimento e qualidade inferior à madeira produzida nas regiões temperadas, devido ao crescimento muito rápido das árvores, atingindo tamanhos comerciais muito jovens, com grande proporção de madeira juvenil.

De acordo com Zobel (1981) e McAlister et al. (1997), nas florestas naturais de climas temperados, a madeira juvenil normalmente fica restrita a uma pequena região do volume total da árvore, e nas plantações a quantidade de madeira juvenil é maior, especialmente naquelas árvores provenientes dos primeiros desbastes ou de plantações cortadas mais cedo. Este fenômeno é muito mais acentuado nas plantações das regiões tropicais.

Zobel (1980) ressaltou que não há uma mudança absoluta da madeira juvenil para a madeira adulta em um ano, mas sim em vários anos. Quase todas as propriedades físicas e químicas da madeira, dentro da zona juvenil são muito variáveis, e quase constantes na madeira adulta.

Vários estudos têm sido conduzidos para determinar o ponto ou idade de transição entre a madeira juvenil e adulta em várias espécies, tais como: Loo et al (1985) em *Pinus sp*, Bendtsen & Senft (1986) em *Pinus taeda* e *Populus deltoides* Bartr., Yang et al (1986) em *Larix laricina*, Clark e Saucier (1989) em *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* Engelm., Roos et al (1990) em *Populus tremuloides* Michx., Abdel-Gadir & Krahmer (1993) em *Pseudotsuga menziesii*, Yang & Hazenberg (1994) em *Picea mariana* e Tasissa & Burkhart (1998) em *Pinus taeda*.

Segundo Zobel (1980) e Krahmer (1986), o comprimento dos traqueídes ou fibras, constitui a principal variável na definição do limite entre a madeira adulta e juvenil. Os traqueídes são mais curtos na região de madeira juvenil do que na madeira adulta. Na zona de madeira juvenil são muito mais curtos perto da medula, aumentando rapidamente na zona de madeira juvenil em direção à casca. Mudanças no comprimento dos traqueídes da zona adulta da árvore são muito pequenas.

Segundo Zobel & Buijtenen (1989), a mudança de madeira juvenil para madeira adulta não se processa da mesma forma para as diferentes características e

propriedades da madeira. Por exemplo, a estabilização e mudança se dá de maneira mais rápida para a densidade do que para o comprimento dos traqueídes.

A demarcação entre lenho juvenil e adulto não é clara, devido às mudanças graduais nas células. De fato, o número real de anéis do lenho juvenil depende de como ele é definido anatomicamente, por exemplo, o comprimento dos traqueídes pode atingir uma estabilidade antes da espessura da parede celular (Bendtsen & Senft, 1986).

Loo et al (1985) reportaram que a idade de transição da madeira juvenil para adulta, mensurada através das variações de densidade ou do comprimento das fibras, é diferente de acordo com as espécies. Por exemplo, essa transição, avaliada pela variação de densidade, ocorre entre 5 a 6 anos em *Pinus elliottii*, *Pinus caribea* e *Pinus radiata*, com cerca de 10 anos em *Pinus taeda* e de 20 anos em *Pinus ponderosa*.

Zobel (1971) e Kramher (1986) caracterizaram a madeira juvenil e adulta baseados na evolução dos elementos anatômicos que as constituem; assim a madeira adulta refere-se ao lenho que apresenta traqueídes estabilizados em crescimento. Para o *Pinus taeda*, com 30 anos de idade, essa estabilização foi encontrada a partir do 11º ao 13º anel de crescimento.

Bendtsen (1978) concluiu que a mudança das características de madeira juvenil para adulta não se dava de maneira abrupta, mas sim gradativa, de maneira que sua demarcação não é muito clara. O período de formação de madeira juvenil varia segundo a espécie e condições de crescimento. Tuset & Duran (1986) classificaram o lenho juvenil como um defeito proveniente de árvores que tiveram um rápido crescimento inicial em diâmetro. Zobel (1971) caracterizou os tipos de lenho juvenil e adulto baseado na evolução dos elementos anatômicos que os constituem. A madeira adulta refere-se ao lenho que apresenta traqueídes estabilizados em crescimento. Em concordância, Mendonça (1982) encontrou a estabilização do comprimento dos traqueídes de *Pinus elliottii* com 17 anos de idade, a partir do intervalo do 8º ao 11º anel de crescimento.

Tasissa & Burkhart (1998), analisando em seu estudo a massa específica de *Pinus taeda*, obtiveram dados de grande relevância em relação a utilização da mesma como uma ferramenta na demarcação entre lenho juvenil e adulto. Os resultados indicaram que esta diferenciação ocorre aproximadamente aos 11 anos de idade fisiológica do câmbio. Bueur et al (1994) estudando as características dos anéis anuais de *Pinus taeda*,

concluíram que o lenho juvenil pode ser bem definido através do uso de técnicas de ultrassom. Em um outro estudo Bendtsen & Senft (1986) calcularam a proporção de lenho juvenil em *Pinus taeda* e chegaram à conclusão que o último ano de lenho juvenil é o 12º no *Pinus taeda*. A proporção de lenho juvenil era de 60% aos 40 anos, já para o intervalo de 40 a 100 anos a proporção de lenho juvenil decresceu 5%. A mesma tendência é vista no estudo promovido por Kellison (1981), citado por Klock (2000), o qual comentou que a proporção de madeira juvenil numa tora depende da idade de corte. Em seu estudo o autor comparou as porcentagens de madeira juvenil em *Pinus taeda* de diferentes idades, sendo os resultados analisados no Quadro 8.

Quadro 8 – Variação da proporção da madeira juvenil em função da idade de árvores de *Pinus taeda*

Idade da árvore (anos)	Porcentagem de madeira juvenil	
	% em peso seco	% em volume
15	75	85
25	50	55
45	15	19

Fonte: KELLISON (1981).

Segundo Goggans (1961), o lenho juvenil tem seu limite em alguma parte do 5º ao 20º anel, dependendo principalmente, da espécie e, até certo ponto, da localidade.

Tsoumis (1968) afirmou em seu trabalho que o lenho juvenil tem sido investigado em madeiras macias especialmente em espécies de *Pinus* de rápido crescimento no Sul dos Estados Unidos, aonde aproximadamente os dez primeiros anéis de crescimento são freqüentemente considerados como lenho juvenil.

Muitos pesquisadores têm utilizado vários métodos para determinar a idade ou limite entre madeira juvenil e adulta. Por exemplo, Loo et al. (1985) determinaram este limite como sendo o ponto de interseção de duas regressões lineares de densidade; Bendtsen & Senf (1986) usaram análises de regressões por partes, análise diferencial, análises da inclinação da curva e análise visual subjetiva da densidade; Clark e Saucier (1989) utilizaram inspeção visual em gráficos de densidade; Yang et al. (1986) utilizaram as mudanças na largura dos anéis de crescimento e Abdel-Gadir & Krahmer (1993) aplicaram também regressões por partes.

Pesquisadores têm reportado a dificuldade na determinação precisa e consistente do limite entre a madeira juvenil e adulta, principalmente devido à transição gradual desta mudança, às variações existentes entre as espécies e à localização geográfica (Bendtsen & Senft, 1986; Clark & Saucier, 1989; Roos et al., 1990; Abdel-Gadir & Krahmer, 1993; Evans et al., 2000).

Lara Palma & Ballarin (2002), estudando a demarcação e densidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L., com 37 anos de idade, concluíram que a região compreendida entre o 14º e 18º anel de crescimento é considerada de transição, ficando definidas a região de madeira juvenil desde o centro até o 14º anel e a região de madeira adulta desde o anel 18 até o anel 37, como ilustra a Figura 7.



Figura 7 – Região de madeira juvenil, adulta e transição da madeira de *Pinus taeda*.

4.2.6.3 Características, propriedades e qualidade da madeira juvenil

A madeira juvenil, de uma forma geral, caracteriza-se por menor densidade, maior ângulo das microfibrilas na camada S2 da parede celular, traqueídes mais curtos, contração transversal menor, maior contração longitudinal, maior proporção de lenho de reação, menor porcentagem de lenho tardio, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina e hemicelulose, menor conteúdo de celulose e menor resistência, em relação à madeira mais adulta (Bendtsen, 1978; Zobel, 1984; Senft et al., 1985; Rowell et al., 2000).

Peças estruturais que contenham uma determinada quantidade de lenho juvenil apresentam classes de resistências inferiores, sendo este o motivo pelo qual as

diferenças entre as propriedades do lenho juvenil e adulto são importantes para a utilização da madeira (McAlister & Clark, 1991 e Geimer et al., 1997).

Tanto os módulos de elasticidade, como as resistências à compressão paralela e normal, à flexão estática e à tração paralela, são seriamente afetados pela presença de madeira juvenil (Kretschmann & Bendtsen, 1992; Kretschmann, 1997; McAlister et al, 1997; Evans et al, 2000).

Diversas pesquisas têm demonstrado haver diferenças significativas entre a densidade da madeira juvenil e adulta em coníferas, tais como: Bendtsen (1978), em *Pinus caribaea*, encontrou densidades em torno de 0,36 g/cm³ e 0,68 g/cm³, para o lenho juvenil e adulto; Clark et al. (1989), em *Pinus taeda*, com 28 anos e em diferentes localidades geográficas, encontraram diferenças que variaram de 14% a 21% (sempre menor na madeira juvenil); McAlister & Clark (1991), em *Pinus taeda* com 36 anos de idade e três localidades distintas, encontraram diferenças de 22% a 28% entre as densidades (referenciada à madeira juvenil); Yang & Hazengerg (1994), em *Picea mariana* com 38 anos de idade, encontraram diferenças entre densidades das madeiras juvenil e adulta 8% maiores em árvores com espaçamento inicial de 1,8m x 1,8m, em relação a espaçamentos maiores e Kretschmann (1997), em *Pinus taeda* com 28 anos de idade, encontrou densidades na madeira juvenil 15% menor (referenciada à madeira adulta).

Várias pesquisas têm demonstrado haver modificações nas propriedades da madeira, em função do rápido crescimento e da maior proporção de lenho juvenil. Segundo Bendtsen (1978), Clark et al. (1996), McAlister et al. (1997) e Kretschmann (1997), isto justifica um questionamento em relação à utilização da madeira proveniente de plantações manejadas, pois os mesmos valores mínimos de tensões admissíveis, recomendados pelas normas para madeiras provenientes de povoamentos naturais, são utilizados para esta nova matéria-prima.

A produção de um tipo de madeira juvenil é resultado do processo de crescimento fisiológico normal da árvore. Portanto, não há muitas alternativas que os silvicultores possam escolher. A quantidade de madeira juvenil, que pode ser reduzida pela mudança no modelo de crescimento das árvores, é muito pequena. Zobel & Buijtenen (1989) notaram que quase todas as alternativas para conseguir um maior crescimento nas árvores, resultam em maiores quantidades de madeira juvenil. Por exemplo, reportam que

quando fertilizadas com nitrogênio, as árvores de *Pinus resinosa*, a região de madeira juvenil aumenta no tronco (Zobel & Buijtenen, 1989).

É importante ressaltar que não é o maior crescimento dos anéis anuais que origina a madeira juvenil. A madeira juvenil das toras de crescimento lento tem a mesma baixa densidade que aquelas de crescimento rápido. A não apreciação deste fato, tem conduzido a graves erros, pois muitos silvicultores têm acreditado que se uma árvore cresce rapidamente sua densidade será menor. Esta é a situação de algumas coníferas, principalmente os *Pinus* mais densos que apresentam, segundo McMillin (1969), pouca correlação entre a largura dos anéis de crescimento e a densidade.

Essa interpretação equivocada ocorre quando a madeira juvenil localizada no centro da árvore que é de baixa densidade e de anéis largos, é comparada com a madeira adulta da periferia da árvore que é de alta densidade. Isto incorre a conclusões errôneas, no sentido de relacionar anéis largos com produção de baixa densidade e os anéis estreitos de alta densidade da madeira. Assim, altas taxas de crescimento resultariam em madeira de baixa densidade. Portanto, deve-se enfatizar que as comparações entre o efeito da taxa de crescimento com as propriedades da madeira devem ser feitas somente em regiões com o mesmo número de anéis.

Para entender melhor as mudanças das propriedades da madeira em relação à altura da árvore, vários autores têm sugerido estudar a tendência da madeira juvenil e adulta de forma separada. Quando isso não é feito, as diferentes proporções de madeira juvenil nas diferentes alturas poderão determinar estas tendências.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material

As toras para determinação dos módulos de elasticidade (longitudinal, radial e tangencial) da madeira de *Pinus taeda* L., eram provenientes de plantios tecnicamente conduzidos da Estação Experimental de Itapeva – SP (latitude 24°02’sul, longitude 49°06’oeste e altitude de 750 m) (Figura 8).

O plantio ocorreu em 1968, em um espaçamento inicial de 1,50 x 2,80 m, e desde essa data até o corte foram realizados 3 desbastes (sendo des: 1979, 1989 e 1999) o que resultou em uma densidade de cerca de 162 árvores/ha.

O solo onde se localiza o talhão possui predominância de “intergrade” para Latossolo Vermelho Escuro e “intergrade” para Latossolo Vermelho Amarelo — grupamento indiscriminado (LE-LV).

Nessa região, o tipo climático é Cfb — temperatura moderada com chuva bem distribuída e verão brando, podendo ocorrer geadas, tanto no inverno como no outono. A temperatura média anual é de 18,5°C, sendo a precipitação média anual de 1250 mm.



Figura 8 – Plantio tecnicamente conduzido de *Pinus taeda* L. na Estação Experimental de Itapeva — S.P..

Foram amostrados seis indivíduos arbóreos desta espécie, escolhidos ao acaso do talhão selecionado, dentre os que apresentavam maior retidão de fuste e melhores condições fitossanitárias.

De cada árvore selecionada foram efetuadas medidas de DAP – diâmetro à altura do peito, altura ao diâmetro comercial (15cm) e altura total, como mostra a Figura 9.

As árvores foram então derrubadas, desganhadas e imediatamente traçadas, dividindo o fuste nas dimensões pré-estabelecidas (Figura 9-c).



Figura 9 – a) medição do DAP dos indivíduos arbóreos de *Pinus taeda*; b) corte das árvores selecionadas; c) medição da altura comercial e altura total e d) desganhamento e traçamento das toras.

De cada árvore retiraram-se quatro toras, com cerca de 3,75m de comprimento cada uma. As toras foram então encaminhadas para o Horto Florestal de Manduri, S.P., para que fossem desdobradas ainda com casca.

Antes do desdobro, de cada tora, de sua extremidade com maior diâmetro, retirou-se um disco com aproximadamente 5cm de espessura (Figura 10-a) para que fossem realizadas as avaliações da umidade e da densidade básica.

5.2 Métodos

5.2.1 Determinação da densidade das toras

A densidade da madeira será expressa aqui em duas bases distintas: densidade básica (ρ_{bas}) e densidade aparente (ρ), essa última simplificada aqui referida como densidade.

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), a densidade básica é uma massa específica convencional, definida pela razão entre a massa seca de uma determinada amostra e seu respectivo volume saturado, sendo dada por:

$$r_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad \text{onde,} \quad (13)$$

m_s = massa seca, em quilogramas

V_{sat} = volume da madeira saturada, em metros cúbicos.

O volume saturado é determinado pela medição dos corpos-de-prova, quando estes atingem massa constante, depois de saturados (Figura 10-b).

Para o cálculo do volume úmido dos corpos-de-prova dos discos, utilizou-se a expressão 14:

$$V_{sat} = P_{ar} - P_{imerso} \quad \text{onde:} \quad (14)$$

P_{ar} = peso “ao ar” do disco

P_{imerso} = peso do disco imerso em água, após saturação.

As Figuras 10c) e 10d) retratam o procedimento da pesagem dos discos nestas condições.



Figura 10 – a) Retirada dos discos de *Pinus taeda* para os cálculos de umidade e densidade básica; b) discos completamente submersos, indicativo que atingiram saturação; c) pesagem do disco saturado “ao ar” e d) pesagem hidrostática do disco

A densidade aparente é expressa pela relação entre a massa e o volume de um corpo-de-prova a uma determinada umidade. No caso mais usual, a densidade (aparente) é determinada à umidade de referência de 12%, ficando então expressa por:

$$r = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad \text{onde:} \quad (15)$$

m_{12} = massa da madeira a 12% de umidade, em quilogramas

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

5.2.2 Desdobro das toras — produção de pranchas e tábuas

Cada tora foi dividida em duas partes (Figura 11-a e 11-b), ficando a primeira porção (I) (Figura 11-b) para a confecção dos corpos-de-prova orientados radial e tangencialmente e a porção (II) (Figura 11-c) para a obtenção dos corpos-de-prova orientados longitudinalmente. Os corpos-de-prova da porção (I) foram extraídos de doze discos previamente cortados a partir da tora, com 10 cm de espessura cada um, obedecendo-se, da maneira como a situação melhor permitiu, as orientações radial e tangencial, sendo retirados, alternadamente, corpos-de-prova radiais (R) e tangenciais de madeira adulta (T_1) e corpos-de-prova tangenciais de madeira juvenil (T_2) respectivamente, como indicado na Figura 12. Na porção II, os corpos-de-prova foram extraídos das pranchas centrais, com 45 cm de comprimento cada um, obedecendo-se perfeitamente a orientação planejada, como mostra a Figura 12.



Figura 11 – a) e b) Desdobro das toras em duas porções distintas de 1,25m e 2,50m a partir da base para a confecção dos corpos-de-prova; c) processamento das toras em discos para confecção dos corpos-de-prova radiais e tangenciais e d) tореte destinado à confecção dos corpos-de-prova longitudinais.

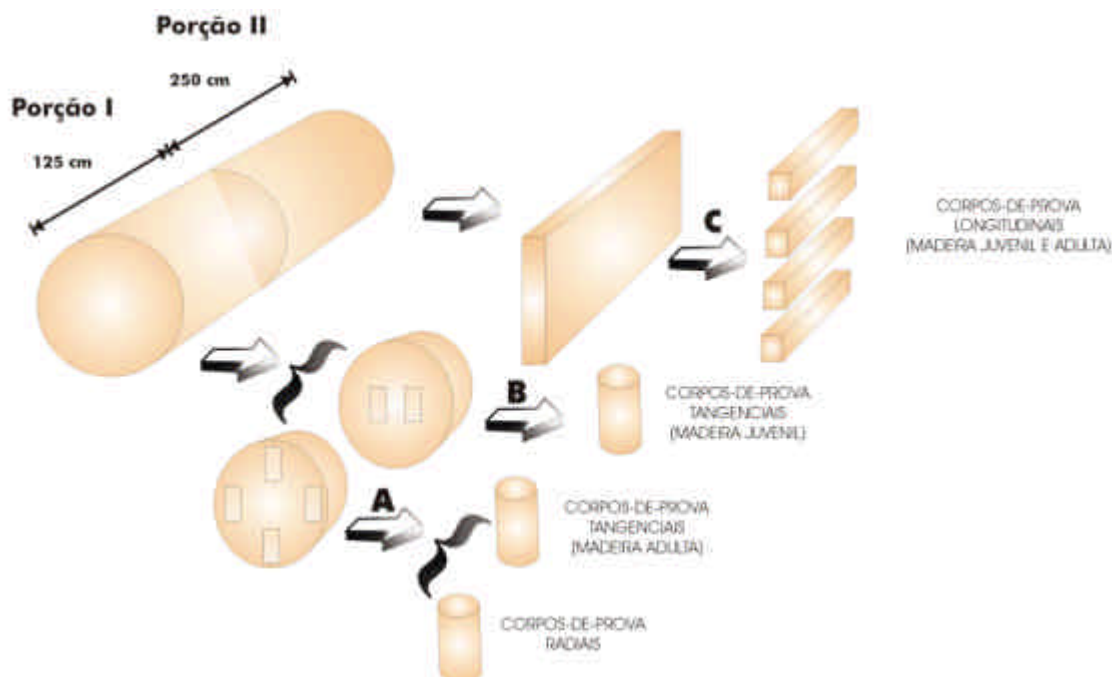


Figura 12 – Modelo de extração dos corpos-de-prova a partir de uma tora para a determinação de módulos de elasticidade

O desdobro das pranchas foi feito a partir do topo de menor diâmetro da tora (Figura 13). Assim, nessa extremidade, as pranchas apresentaram sempre a presença de medula. Contudo, por conta de desvios discretos da grã da madeira, em alguns poucos casos as pranchas não apresentaram presença integral da medula na extremidade oposta. As pranchas foram desdobradas com aproximadamente 2,50m de comprimento, 8 cm de espessura e largura variável, resultando um universo de 24 pranchas.



Figura 13 – Desdobro das pranchas centrais da tora. a) fixação da tora pelo menor diâmetro; b) detalhe da serra-fita; c) processamento mecânico da prancha e d) conformação final da prancha.

Das toras foram retiradas também tábuas das costaneiras laterais esquerda e direita (Figura 14). O número de tábuas retiradas foi variado para cada tora, dependendo do diâmetro de cada uma delas. O universo de tábuas retiradas foi de 159 peças.



Figura 14 – a) desdobro das tábuas a partir das costaneiras laterais das toras; b) detalhe da costaneira; c) processamento mecânico das tábuas e d) vista geral do lote de tábuas.

5.2.3 Processo de secagem dos toretes, das pranchas e das tábuas

Antes do desdobro para confecção dos corpos-de-prova, os toretes, as pranchas e as tábuas (Figura 15) foram submetidos a um processo de secagem, em secador industrial da Indústria Madeireira Makenboy, localizada na cidade de Manduri — SP, seguindo-se procedimento de praxe naquela empresa, uma vez que a mesma comercializa produtos de madeira serrada da mesma espécie e dimensões, até a umidade de equilíbrio, em torno de 12% de umidade.



Figura 15 – a) detalhe dos toretes destinados à confecção de discos e, posteriormente, corpos-de-prova radiais e tangenciais; b) vista geral dos toretes dentro da câmara de secagem; c) pranchas submetidas ao processo de secagem industrial e d) tábuas sendo introduzidas na câmara de secagem.

5.2.4 Avaliação do módulo de elasticidade longitudinal

Para a obtenção dos módulos de elasticidade longitudinais as toras foram processadas mecanicamente em pranchas e destas foram confeccionados corpos-de-prova para a avaliação não-destrutiva com uso de ultra-som, e convencional destrutiva através de ensaios de compressão paralela às fibras.

5.2.4 a) Avaliação visual dos defeitos nas pranchas

Buscando uma gama maior de parâmetros de avaliação e correlação entre os ensaios não-destrutivos e destrutivos, cada prancha foi dividida em 4 partes iguais, para a identificação visual, medição e quantificação dos defeitos como preconiza a NB 1381 (ABPM, 1990) (Figura 16).

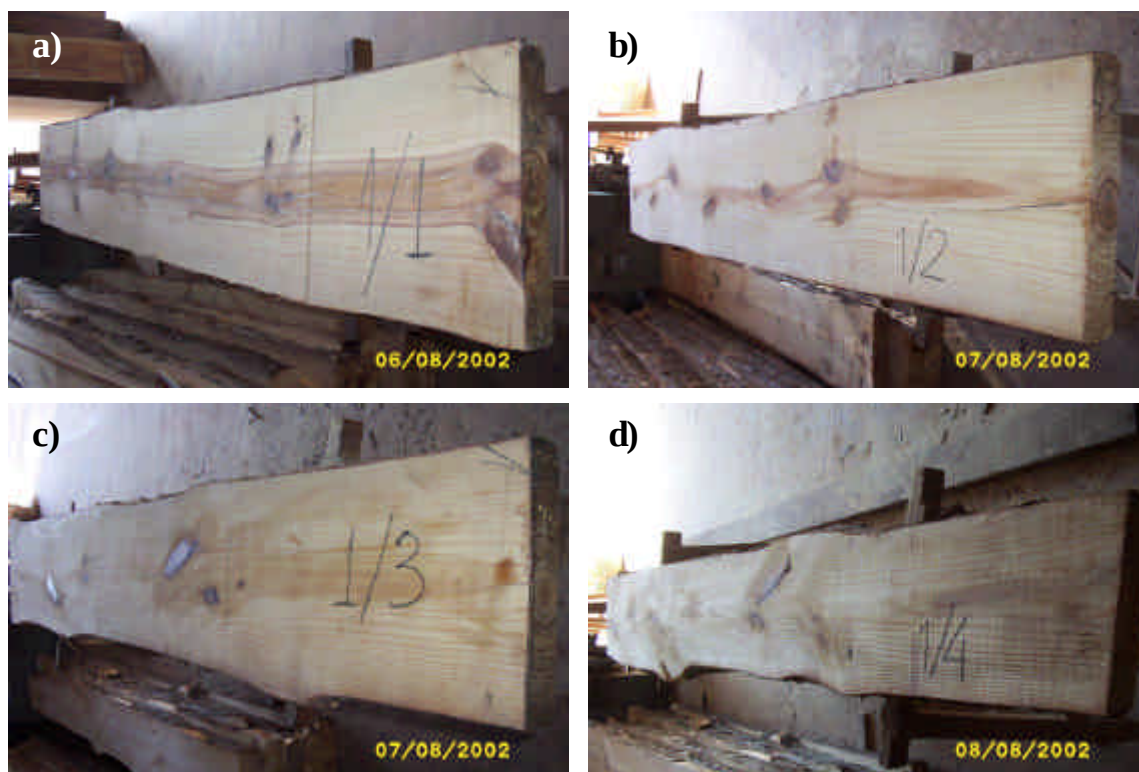


Figura 16 – Identificação, quantificação e qualificação dos defeitos das pranchas. a) prancha 1 da árvore 1; b) prancha 2 da árvore 1; c) prancha 3 da árvore 1 e d) prancha 4 da árvore 1.

5.2.4 b) Ensaios não-destrutivos nas pranchas

O equipamento utilizado neste trabalho foi da marca Steinkamp, modelo BP-5 (Figura 17), de fabricação alemã, e transdutores piezoelétricos de faces planas e frequência 45 kHz. A precisão do equipamento, segundo o fabricante, é de 0,001%. Isto significa que para as faixas de velocidades utilizadas neste trabalho (4.000 m/s a 6.000 m/s), a incerteza foi de aproximadamente 4 a 6 cm/s.

Os transdutores que se acoplam ao equipamento funcionam tanto como emissor quanto como receptor das ondas ultra-sonoras.

A frequência do equipamento foi adotada em função do comprimento de onda. O cálculo do comprimento de onda foi realizado utilizando-se leituras preliminares. Essas leituras indicaram que a velocidade média obtidas nas peças era de aproximadamente 5000 m/s.



Figura 17 – Equipamento de ultra-som Steinkamp BP-5.

Após a etapa de identificação dos defeitos, cada prancha foi submetida ao ensaio não-destrutivo utilizando o ultra-som em 5 regiões distintas, a saber: 2 regiões de madeira adulta, 2 de madeira juvenil e na medula, como indica a Figura 18.

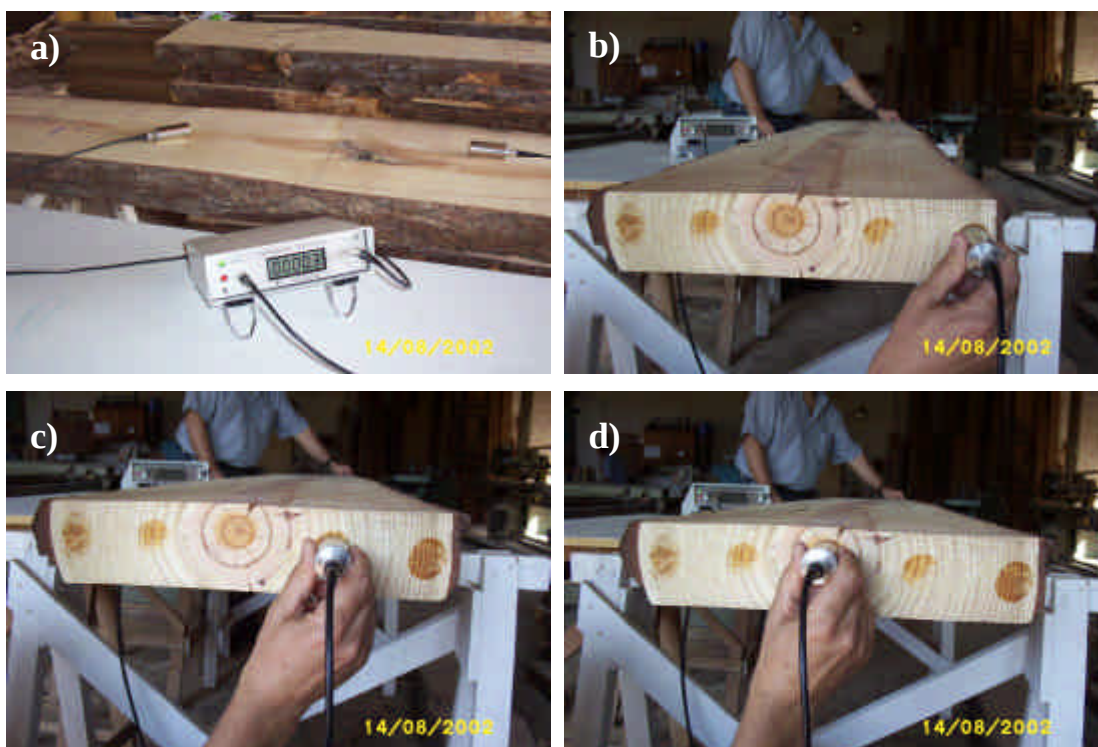


Figura 18 – Ensaio de ultra-som nas pranchas de *Pinus taeda*. a) vista geral do equipamento; b) região de madeira adulta; c) região de madeira juvenil e d) região medular.

O equipamento de ultra-som era calibrado, no início de cada série de ensaios, utilizando-se o corpo-de-prova acrílico, conforme os procedimentos especificados no manual de operação do equipamento.

Após a calibração, os ensaios foram realizados seguindo-se os seguintes procedimentos:

Imediatamente antes da realização do ensaio, aplicou-se uma fina camada de gel medicinal às faces dos transdutores, evitando-se o problema ocasionado na interface corpo-de-prova—transdutor, conforme menciona a literatura. Uma leve pressão foi exercida para o acoplamento do transdutor ao corpo-de-prova. Procedeu-se então a leitura do tempo (t) em microssegundos, necessário para que a onda ultra-sonora atravessasse a peça de madeira e fosse detectada pelo transdutor de recepção.

De posse do tempo de propagação da onda e do comprimento do trecho percorrido (L), calculou-se a velocidade de propagação da onda em cada peça utilizando-se a expressão:

$$V = \frac{L}{t} \text{ (m/s)} \quad , \text{onde:}$$

V = velocidade de propagação da onda (m/s)

L = distância percorrida pela onda — comprimento do corpo-de-prova (m)

T = tempo de propagação da onda (s)

Após a realização dos ensaios, foi calculada a constante dinâmica C_{LL} , utilizando-se a equação (10). A constante dinâmica, por sua vez, foi correlacionada com o Módulo de Elasticidade à Compressão Paralela (E_{c0}).

5.2.4 c) Ensaios não-destrutivos nos corpos-de-prova longitudinais

Para a confecção dos corpos-de-prova longitudinais, cada prancha foi seccionada em quatro partes iguais, ficando as porções 1 e 3 destinadas a esse propósito (Figura 19).



Figura 19 – a) Desdobro das pranchas em 4 partes iguais; b) vista geral após processamento; c) descarte da casca e d) configuração final da prancha.

De posse das pranchas já desdobradas, para que se garantisse que os corpos-de-prova pertencessem às regiões de interesse, ou seja, de madeira juvenil e de madeira adulta, optou-se por reduzir as dimensões nominais dos mesmos para 4 cm x 4 cm x 45 cm, procurando fugir ao máximo da região de transição. Dessa forma, mapeou-se cada segmento da prancha anotando-se, a partir da medula, em qual anel efetivamente iniciava-se o corpo-de-prova de madeira adulta, deixando para tal um intervalo de 5 cm à partir da face externa (Figura 20). Para a garantia de que o corpo-de-prova de madeira juvenil não apresentasse traços de medula, seguindo o que rege a norma europeia, descartou-se, a partir da região central da medula, 2,5 cm à direita e 2,5 cm à esquerda (Figura 21).

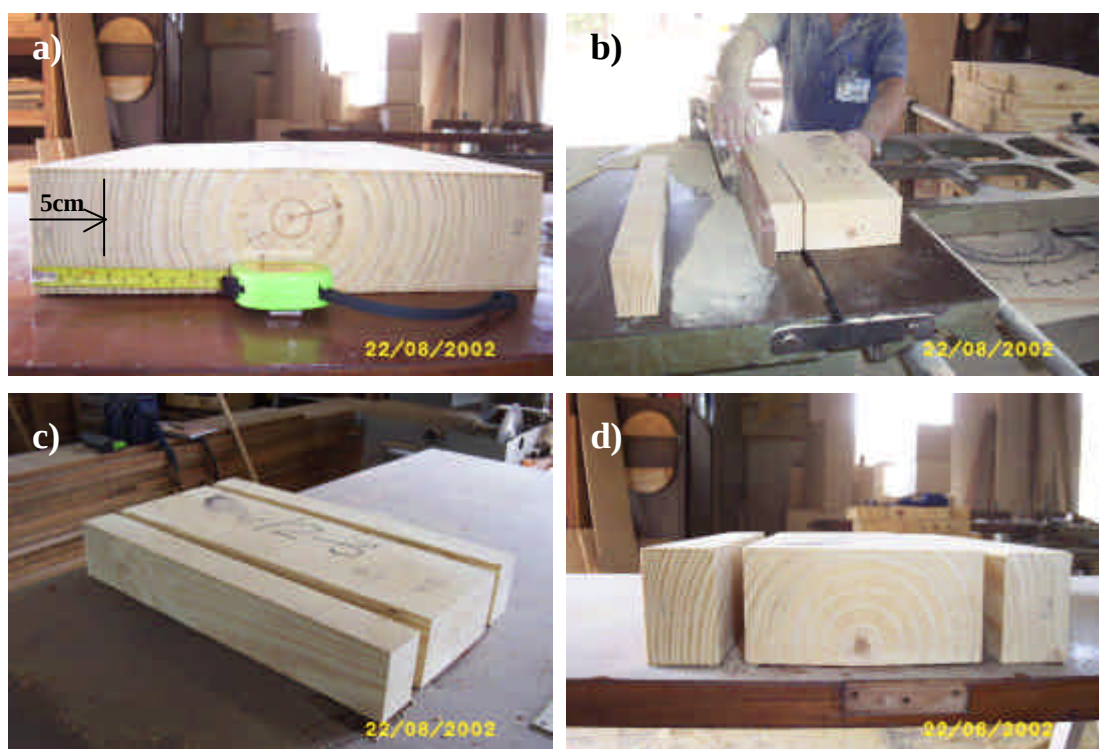


Figura 20 – Confecção dos corpos-de-prova longitudinais de madeira adulta. a) marcação da região de madeira adulta; b) processamento mecânico; c) e d) vista geral da prancha após processamento.



Figura 21 – Confecção dos corpos-de-prova longitudinais de madeira juvenil. a) marcação de 2,5cm a partir da medula; b) descarte da área medular.

A partir daí, de cada segmento selecionado, foram obtidos dois corpos-de-prova longitudinais de madeira adulta e dois corpos-de-prova de madeira juvenil, nas dimensões 4 cm x 4 cm x 45 cm, totalizando 8 corpos-de-prova longitudinais de cada prancha (Figura 22).

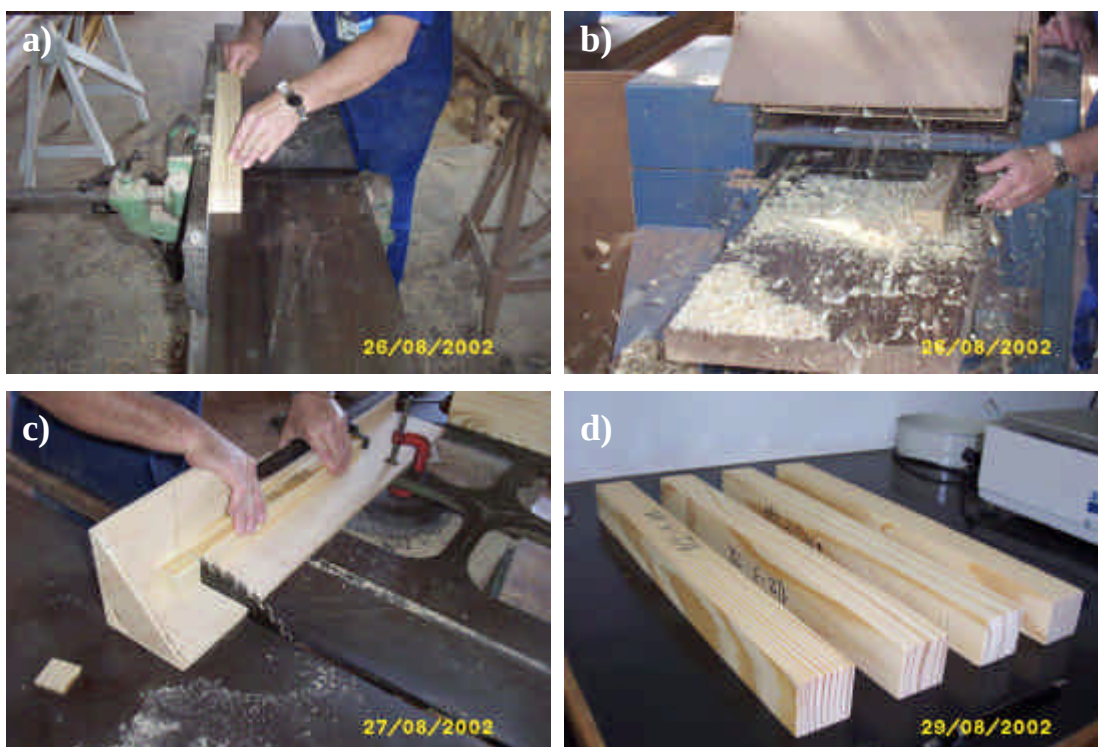


Figura 22 – Confecção dos corpos-de-prova longitudinais. a) acerto das faces na desempenadeira; b) passagem do corpo-de-prova pela desengrossadeira; c) acerto final na dimensão desejada e d) exemplares de madeira juvenil (ao centro) e madeira adulta (nas laterais).

Após a conclusão dos trabalhos de confecção dos corpos-de-prova longitudinais, estes foram levados até o Laboratório de Ensaio de Materiais, para que fossem submetidos aos ensaios não-destrutivos com a utilização do ultra-som, cujo procedimento se deu de forma análoga à efetuada com as pranchas, como indica a Figura 23.

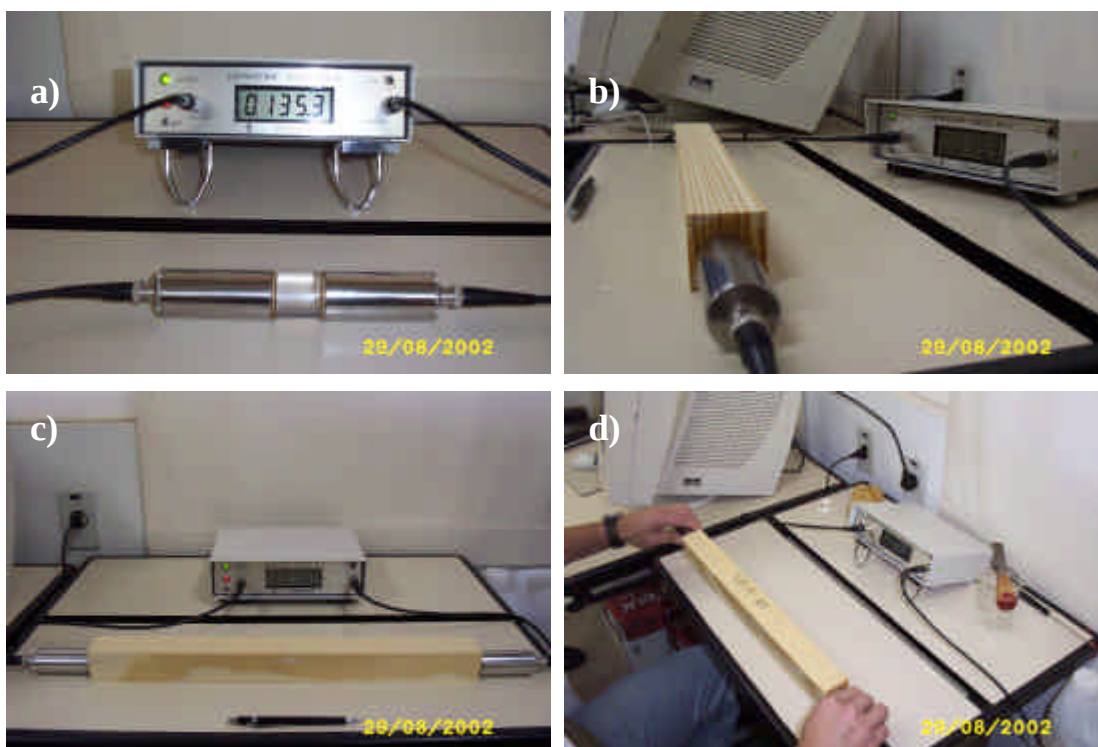


Figura 23 – Execução do ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova longitudinais. a) calibração do aparelho; b) aplicação da camada de gel medicinal; c) vista geral do equipamento e d) obtenção da leitura do tempo de propagação da onda ultra-sonora.

5.2.4 d) Ensaios destrutivos nos corpos-de-prova longitudinais

Para avaliar a exatidão (acurácia) e a sensibilidade do método do ultra-som, todos os 192 corpos-de-prova foram posteriormente ensaiados destrutivamente, em ensaios de compressão, atendendo-se, no geral, às prescrições da norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Os corpos-de-prova longitudinais, em específico, foram desdobrados, adequando-se seus comprimentos à prescrição normativa citada, para que fossem submetidos a ensaios de compressão paralela. As deformações específicas foram avaliadas com “clip-gage” com sensibilidade de 0,001mm, acoplado ao computador de controle da máquina de ensaio. Os ensaios destrutivos foram feitos com uso de máquina universal de ensaios servo-controlada EMIC DL 10.000 MF, como mostra a Figura 24.

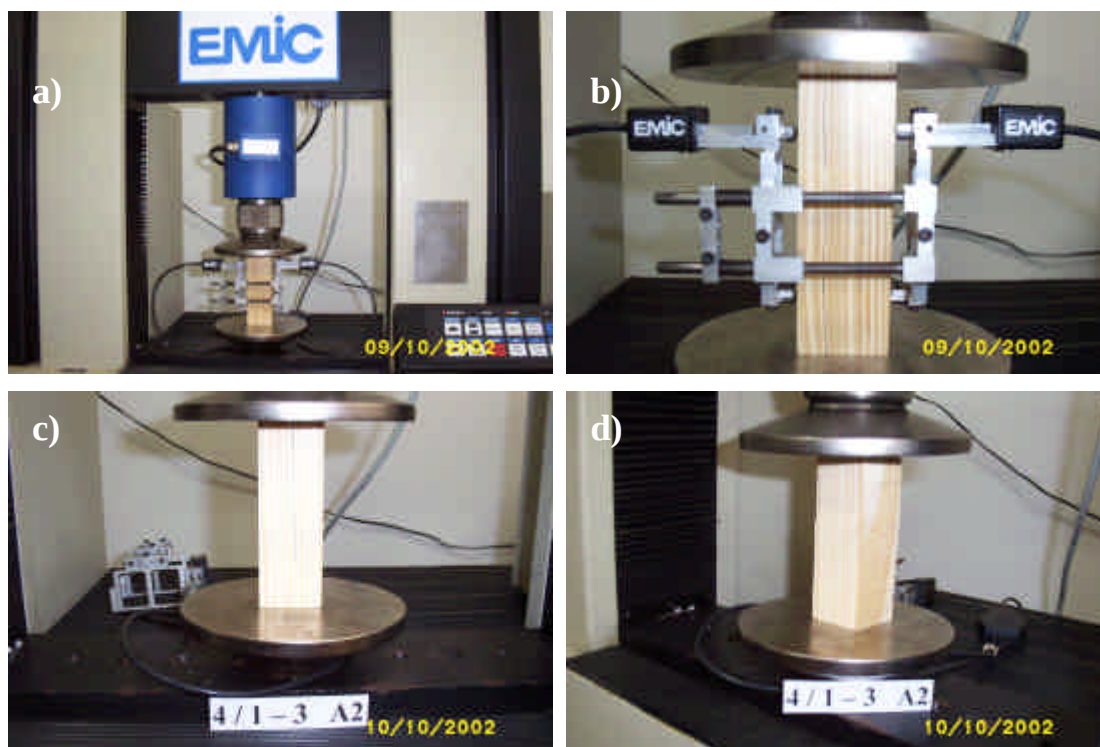


Figura 24 – Execução do ensaio de compressão paralela nos corpos-de-prova longitudinais. a) vista geral do equipamento; b) detalhe do acoplamento do clip-gage; c) retirada do clip-gage e d) ruptura do corpo-de-prova.

Após a realização dos ensaios, foi calculada a constante dinâmica C_{LL} , utilizando-se a equação (10). A constante dinâmica C_{LL} foi correlacionada com o Módulo de Elasticidade à Compressão Paralela (E_{c0}).

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP – Botucatu, com a madeira na umidade de equilíbrio ao ar.

5.2.5 Avaliação do módulo de elasticidade radial

Para a confecção dos corpos-de-prova radiais, a porção (I) de cada tora foi seccionada em 12 discos, ficando os discos marcados com números ímpares destinados a esse propósito, como mostra a Figura 25.

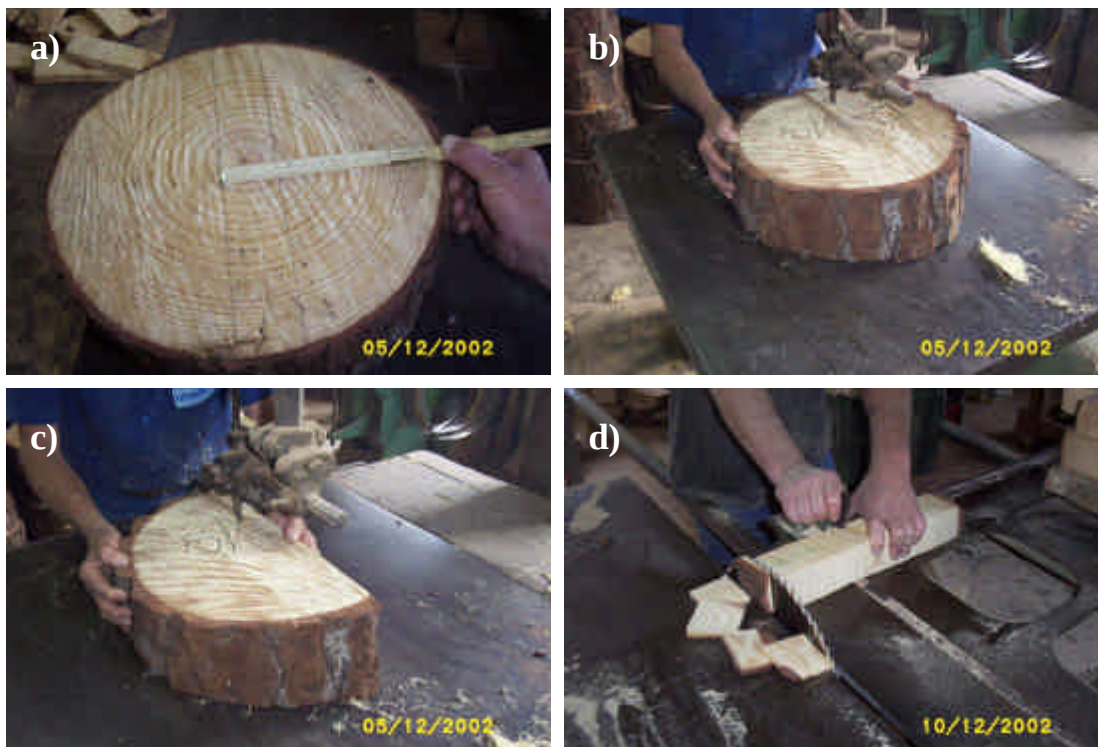


Figura 25 – Preparação dos discos para confecção dos corpos-de-prova radiais. a) marcação da região; b) e c) processamento mecânico e d) descarte da casca.

Na confecção dos corpos-de-prova radiais, além da dificuldade de processamento dos corpos-de-prova na forma de paralelepípedo retangular com os equipamentos usuais utilizados na marcenaria (serra, desempenadeira e desengrossadeira) teve-se dificuldade na obtenção de corpos-de-prova com perfeito esquadro. Assim, após diversos testes, optou-se por trabalhar a madeira em torno mecânico, o que possibilitou a regulação da velocidade e a desobrigação de obtenção de esquadro, na medida em que a forma dos corpos-de-prova passou a ser circular, como mostra a Figura 26.

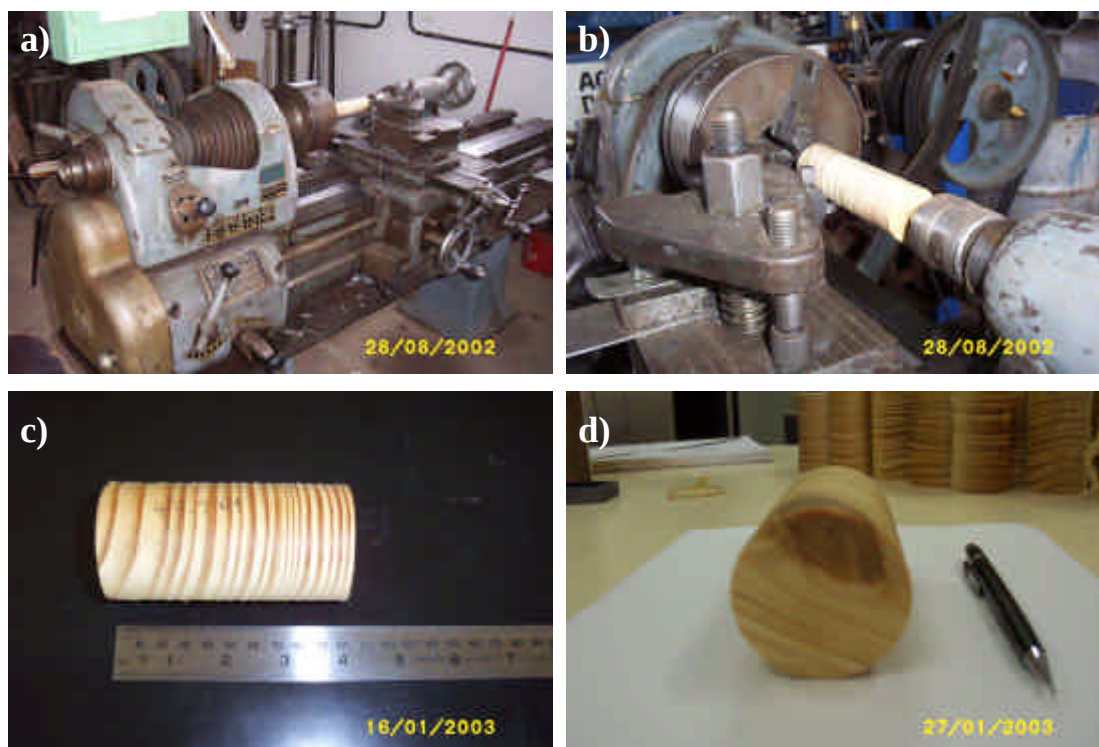


Figura 26 – Confecção dos corpos-de-prova radiais. a) vista geral do torno; b) finalização do torneamento do corpo-de-prova; c) corpo-de-prova isento de defeito e d) corpo-de-prova com defeito.

Considerando-se os característicos próprios do aparelho de ultrassom empregado, compatibilizados com as limitações dimensionais das árvores, para os ensaios não-destrutivos foram confeccionados corpos-de-prova radiais com dimensões: $\varnothing$ 5cm x 10cm de comprimento – porção (I) de cada tora.

De cada tora foram retirados 12 corpos-de-prova radiais (Figura 12 - Detalhe A). Assim, considerando-se 6 árvores, com 4 toras por árvore, com 12 corpos-de-prova por tora, totalizou-se um universo de 288 corpos-de-prova. Destes, foram selecionados para a determinação do módulo de elasticidade na direção radial através da medição de ondas ultrassônicas os 144 corpos-de-prova que apresentaram a mais precisa coincidência entre os eixos de simetria elástica e geométrica, respeitando-se a proporção de seis corpos-de-prova para determinação de cada um dos módulos, ou seja, em 6 árvores, com 4 toras por árvore, com 6 corpos-de-prova por tora, compatibiliza-se os 144 corpos-de-prova desejados.

5.2.5 a) Ensaios não-destrutivos nos corpos-de-prova radiais

Após a confecção e seleção dos corpos-de-prova melhor orientados na direção radial, adotou-se o mesmo procedimento utilizado no ensaio dos corpos-de-prova longitudinais para a execução do ensaio não-destrutivo por meio da avaliação do tempo de propagação da onda na direção longitudinal, exceto pela seção do corpo-de-prova apresentar formato cilíndrico, como mostra a Figura 27.

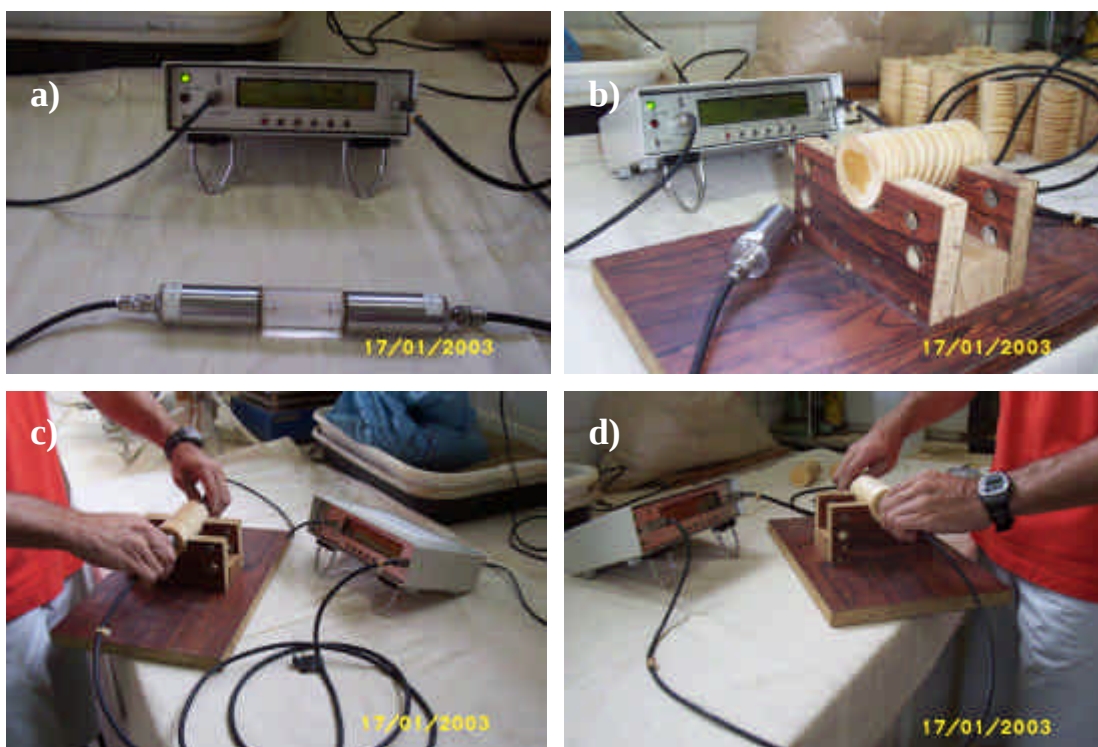


Figura 27 – Execução do ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova radiais. a) calibração do aparelho Steinkamp BP-7; b) aplicação da camada de gel medicinal; c) e d) obtenção da leitura do tempo de propagação da onda ultra-sônica.

5.2.5 b) Ensaios destrutivos nos corpos-de-prova radiais

Da mesma forma descrita para a avaliação destrutiva dos corpos-de-prova orientados longitudinalmente, todos os 144 corpos-de-prova foram posteriormente ensaiados destrutivamente, em ensaios de compressão, atendendo-se, no geral, às prescrições da norma NBR 7190 (ABNT, 1997), no que tange à velocidade de

carregamento e avaliação das deformações no centro da peça. Os corpos-de-prova radiais, foram submetidos a ensaios de compressão normal. As deformações específicas foram avaliadas com “clip-gage” com sensibilidade de 0,001mm, acoplado ao computador de controle da máquina de ensaio. Os ensaios destrutivos foram realizados com uso de máquina universal de ensaios servo-controlada EMIC DL 10.000 MF. A Figura 28 mostra detalhadamente a execução do ensaio.

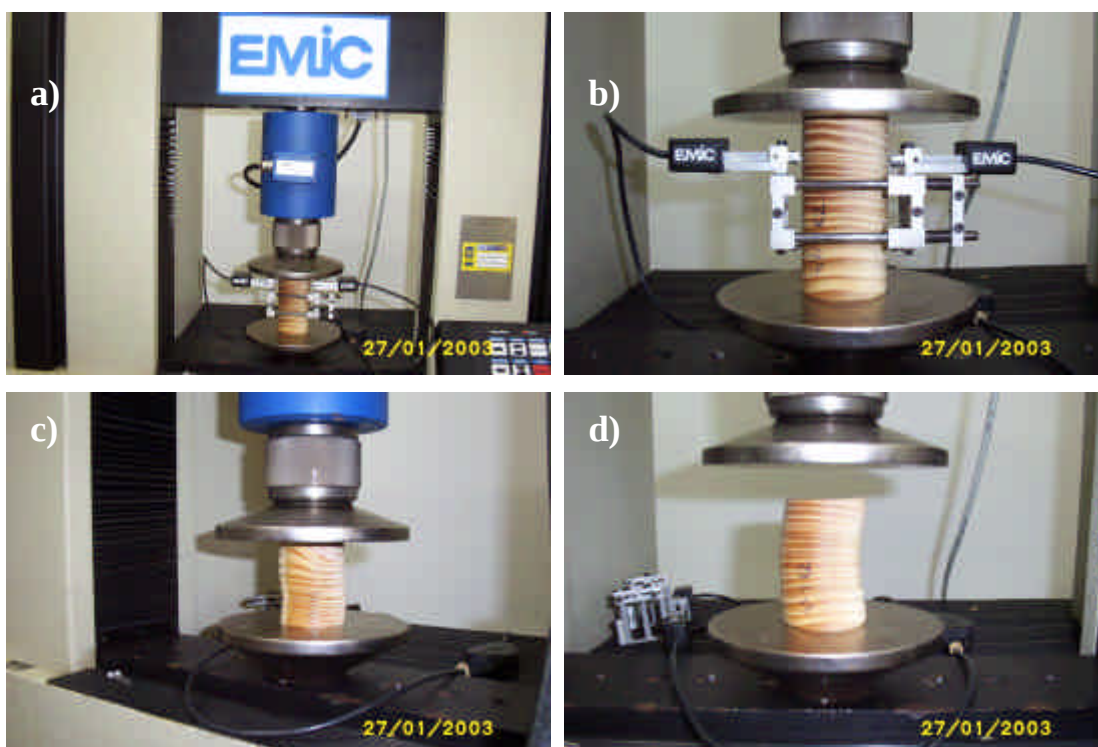


Figura 28 – Execução do ensaio de compressão normal às fibras nos corpos-de-prova radiais. a) vista geral do equipamento; b) detalhe do acoplamento do clip-gage; c) retirada do “clip-gage” e d) conformação final do corpo-de-prova, após realização do ensaio.

Após a realização dos ensaios, foi calculada a constante dinâmica C_{RR} , utilizando-se a equação (10). A constante dinâmica C_{RR} , por sua vez, foi correlacionada com o Módulo de Elasticidade à Compressão Normal (E_{c90}).

5.2.6 Avaliação do módulo de elasticidade tangencial

Para a confecção dos corpos-de-prova tangenciais, cada tora foi seccionada em 12 discos, ficando os discos marcados com números ímpares destinados aos corpos-de-prova tangenciais de madeira adulta e os discos pares para a confecção dos corpos-de-prova tangenciais de madeira juvenil, como mostra a Figura 29.



Figura 29 – Preparação dos discos para confecção dos corpos-de-prova tangenciais. a) descarte da região medular para confecção dos corpos-de-prova de madeira juvenil; b) acerto das faces do bloco de madeira juvenil e c) descarte da região da casca para a confecção dos corpos-de-prova de madeira adulta e d) acerto das faces do bloco de madeira adulta.

As mesmas limitações encontradas na confecção dos corpos-de-prova orientados na direção radial foram observadas na obtenção dos corpos-de-prova orientados tangencialmente. Assim, para os ensaios destrutivos e não-destrutivos foram confeccionados corpos-de-prova tangenciais com dimensões: $\varnothing$ 5cm x 10cm de comprimento – porção (I) de cada tora, como mostra a Figura 30.

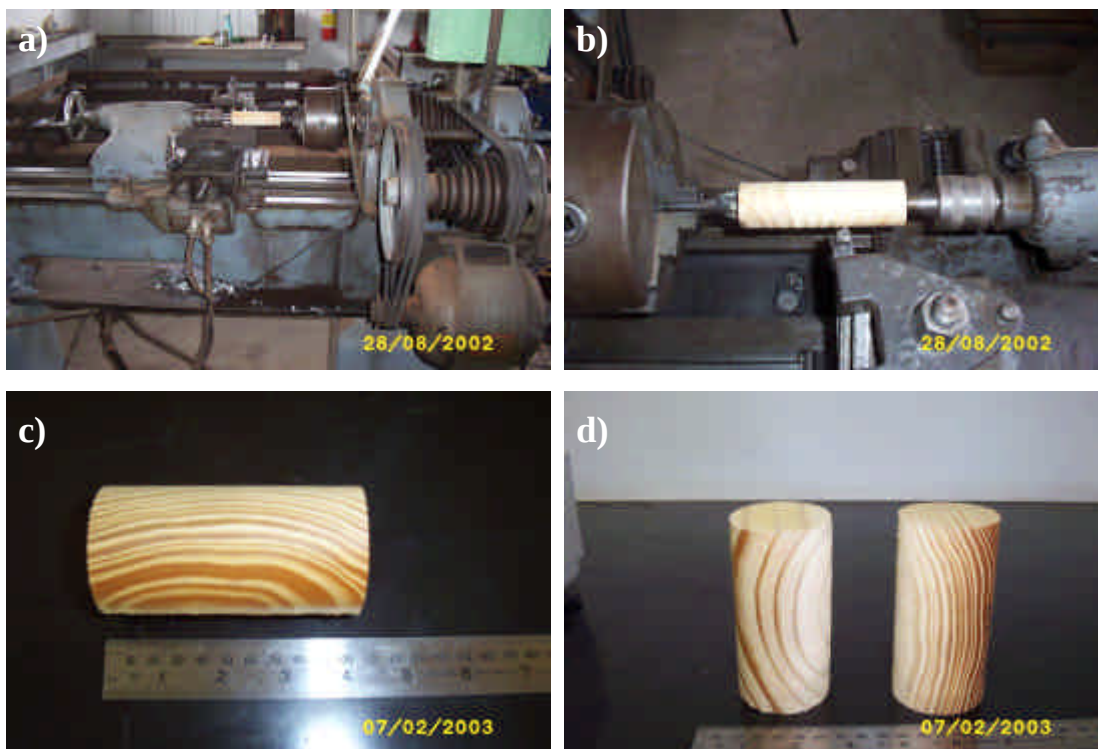


Figura 30 – Confeção dos corpos-de-prova tangenciais. a) vista geral do torno; b) detalhe do torneamento do corpo-de-prova; c) conformação final do corpo-de-prova e d) corpos-de-prova de madeira juvenil (à esquerda) e madeira adulta (à direita).

De cada tora foram retirados 24 corpos-de-prova tangenciais, sendo 12 de madeira juvenil (Figura 12 - detalhe B) e 12 de madeira adulta (Figura 12 - detalhe A). Assim, considerando-se 6 árvores, com 4 toras por árvore, com 24 corpos-de-prova por tora, totalizou-se um universo de 576 corpos-de-prova. Destes, foram selecionados para a determinação do módulo de elasticidade na direção tangencial através da medição de ondas ultrassônicas os 288 corpos-de-prova que apresentaram a mais precisa coincidência entre os eixos de simetria elástica e geométrica, respeitando-se a proporção de seis corpos-de-prova para determinação de cada um dos três módulos, ou seja, em 6 árvores, com 4 toras por árvore, com 12 corpos-de-prova por tora, compatibilizou-se os 288 corpos-de-prova desejados.

5.2.6 a) Ensaios não-destrutivos nos corpos-de-prova tangenciais

Após a confecção e seleção dos corpos-de-prova melhor orientados na direção tangencial, adotou-se o mesmo procedimento utilizado no ensaio dos corpos-de-prova radiais para a execução do ensaio não-destrutivo através da avaliação do tempo de propagação da onda na direção tangencial, ilustrado na Figura 31.



Figura 31 – Execução do ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova tangenciais. a) calibração do aparelho Steinkamp BP-7; b) aplicação da camada de gel medicinal; c) e d) obtenção da leitura do tempo de propagação da onda ultra-sonora.

5.2.6 b) Ensaios destrutivos nos corpos-de-prova tangenciais

Analogamente ao adotado para os corpos-de-prova orientados na direção radial todos os 288 corpos-de-prova foram posteriormente ensaiados destrutivamente, em ensaios de compressão, atendendo-se, no geral, às prescrições da norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Os corpos-de-prova tangenciais, foram submetidos a

ensaios de compressão normal. As deformações específicas foram avaliadas com “clip-gage” com sensibilidade de 0,001mm, acoplado ao computador de controle da máquina de ensaio. Os ensaios destrutivos serão feitos com uso de máquina universal de ensaios servo-controlada EMIC DL 10.000 MF, como mostra a Figura 32.

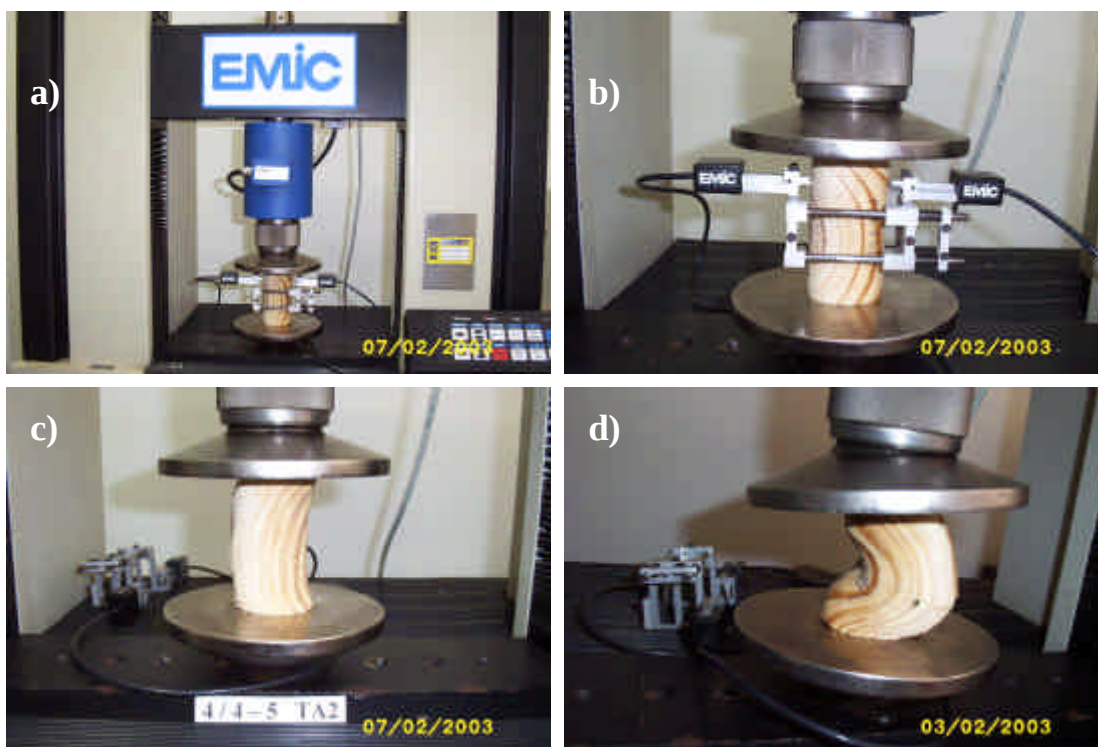


Figura 32 – Execução do ensaio de compressão normal às fibras nos corpos-de-prova tangenciais. a) vista geral do equipamento; b) detalhe do acoplamento do clip-gage; c) retirada do clip-gage e d) conformação do corpo-de-prova na fase final do ensaio.

Após a realização dos ensaios, foi calculada a constante dinâmica C_{TT} , utilizando-se a equação (10). A constante dinâmica C_{TT} foi correlacionado com o Módulo de Elasticidade à Compressão Normal (E_{c90}).

5.2.7 Análise estatística

Na avaliação da acurácia do método do ultra-som, para cada direção considerada (longitudinal, radial e tangencial) foi aplicado ajuste de regressão onde a variável independente foi a constante dinâmica obtida em ensaio de ultra-som (C_{LL}) e a variável dependente foi o módulo de elasticidade obtido em ensaio convencional (E_s).

Toda a análise estatística dos dados obtidos foi conduzida com assessoria do Prof. Dr. Adalberto José Crocci, do Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências, da Unesp de Botucatu.

Partindo da premissa de que, no geral, haviam diferenças estatisticamente significativas entre os resultados (de ensaios destrutivos e não-destrutivos) para madeira juvenil e adulta, em todas as análises foi executado o teste de comparação de médias, com o auxílio do software SAS. Os estudos eram apresentados considerando, a priori, o universo como uma única população. Se a análise revelasse que os dados provinham de duas populações distintas, complementarmente os resultados seriam processados considerando-se essas duas populações separadamente, adotando-se um nível de significância de 5%.

No estudo das regressões, a verificação da adequabilidade dos modelos foi conduzida com a análise dos resíduos. A partir desta análise foi possível verificar se as suposições de normalidade se cumpriam. A verificação da distribuição normal foi feita analisando-se a linearidade dos resíduos. Complementarmente à análise visual dessa linearidade, foi utilizado o teste estatístico de Shapiro com o auxílio do software MINITAB V.13.31.

Em todas as análises conduzidas com esse objetivo atestou-se a normalidade dos dados.

Para as variáveis físicas, elásticas e dinâmicas estudadas no programa experimental foi utilizada, quando o direção estudada permitia a diferenciação anatômica em madeira juvenil e adulta (longitudinal e tangencial), a análise de variância de um delineamento em parcelas sub-divididas (“split-plot”) (Cochran & Cox, 1957), em que as parcelas foram constituídas pelas diferentes alturas das toras ao longo do fuste das árvores e as sub-parcelas pelos diferentes tipos de lenhos (juvenil e adulto). O

delineamento considerou cada árvore como um bloco, utilizando-se 4 repetições quando analisado na direção longitudinal, e 6 repetições quando essa avaliação se deu na direção tangencial; a comparação entre médias foi feita pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Para a análise na direção radial, como não houve diferenciação entre madeira juvenil e adulta, a análise estatística utilizada foi a análise de variância de um delineamento casualizado em blocos em que os tratamentos eram constituídos pelas distintas alturas das toras ao longo do tronco. O delineamento considerou cada árvore como um bloco, utilizando-se 6 repetições; a comparação entre médias foi efetuado pelo teste de Tukey no nível de 5% de significância.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Madeira no estado verde

O Quadro 9 apresenta os dados principais das seis árvores de *Pinus taeda* L. abatidas para os ensaios.

Quadro 9 – Dimensões principais dos indivíduos arbóreos abatidos.

Árvore	DAP(1) c/casca (cm)	Altura comercial (2) (m)	Diâmetro final (3) (cm)	Altura total (m)	Inserção primeiros galhos (m)
1	48,0	19,92	15,0	24,60	12,25
2	41,0	17,61	15,0	21,65	8,15
3	40,0	17,85	15,0	22,95	7,66
4	41,0	18,87	16,0	21,85	8,22
5	44,5	18,65	15,0	23,30	8,50
6	40,5	19,00	15,0	24,00	7,45

Notas:

1 - DAP - diâmetro à altura do peito

2 - Altura correspondente a um diâmetro mínimo da árvore de 15 cm

3- Diâmetro à altura comercial

O diâmetro à altura do peito (DAP) médio das árvores foi de 42,5 cm e altura comercial, aqui considerada como a altura da árvore em que se observava um diâmetro de 15 cm do seu fuste, variou de aproximadamente 17m a 20m enquanto que a altura total média dos indivíduos foi de 23,1m. A inserção dos primeiros galhos variou de

7,5 a 12,5 m o que garantiu a retirada de pelo menos dois toretes isentos de galhos de cada árvore.

O Quadro 10 apresenta os valores de densidade e densidade básica obtidos através de corpos-de-prova das toras (discos) retirados das toras imediatamente após o desdobro. O Apêndice I apresenta todos os resultados obtidos.

Quadro 10 – Resumo dos valores de umidade, densidade e densidade básica para os corpos-de-prova (discos) da madeira de *Pinus taeda* L.

	Corpos-de-prova das toras (discos)		
	Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Dens. Básica (g/cm ³)
Mínimo	101,20	1,084	0,423
Máximo	156,38	1,146	0,568
Médio	132,51	1,114	0,482
D. Padrão	17,21	0,018	0,041
C. V. (%)	12,99	1,64	8,41

A densidade aparente, aqui tratada simplificada como densidade variou entre 1,084 g/cm³ a 1,146 g/cm³, com média de 1,114 g/cm³. Em contrapartida, a densidade básica oscilou entre 0,423 e 0,568 g/cm³, obtendo valor médio de 0,482 g/cm³, valor este muito próximo ao observado por Gabriel (2000), que obteve uma densidade básica média de 0,475 g/cm³ para *Pinus taeda* L.

6.2 Madeira na umidade de equilíbrio ao ar

Buscando simplificar a terminologia precisa dessa condição específica da madeira, aqui adotou-se convencionalmente a terminologia “madeira em equilíbrio”, para fazer referência à “madeira na condição de umidade de equilíbrio com o ar”.

6.2.1 Avaliação do módulo de elasticidade longitudinal

6.2.1 a) Ensaios não-destrutivos nas pranchas

O Quadro 11 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de ultra-som nas pranchas da madeira de *Pinus taeda* L. O Apêndice II traz a planilha com todos os resultados obtidos.

Quadro 11 – Resumo dos valores de densidade, velocidade e constante dinâmica longitudinal obtidos através de ensaios não-destrutivos com o uso de ultra-som nas pranchas de *Pinus taeda* L.

	Mad. Adulta			Mad. Juvenil			Medula
	Dens. (g/cm ³)	Veloc. ⁽¹⁾ (m/s)	C _{LL} ⁽²⁾ (MPa)	Dens. (g/cm ³)	Veloc. ⁽¹⁾ (m/s)	C _{LL} ⁽²⁾ (MPa)	Veloc. ⁽¹⁾ (m/s)
Mínimo	0,559	4.547	12.066	0,435	4.662	11.027	4.248
Máximo	0,710	5.980	23.044	0,554	6.039	17.850	5.850
Médio	0,605	5.294	17.088	0,504	5.066	12.957	4.720
D. Padrão	0,037	374	2.957	0,027	294	1.501	300
C. V. (%)	6,11	7,06	17,30	5,45	5,80	11,58	6,35

Notas:

1- velocidade obtida com uso de transdutores planos de 45 kHz

2- C_{LL} - constante dinâmica na direção longitudinal

Do Quadro 11 observa-se que a velocidade média de propagação da onda ultra-sonora na região de madeira adulta foi 4,5% superior à velocidade de propagação na região de madeira juvenil. A velocidade de propagação de ondas na região da medula foi inferior às observadas nas outras duas regiões do lenho (madeira adulta – 12% e madeira juvenil – 7%).

A literatura não reporta valores de velocidade na transmissão de ondas ultrassônicas em pranchas.

6.2.1 b) Ensaios não-destrutivos nos corpos-de-prova

O Quadro 12 apresenta os resultados dos ensaios não-destrutivos com a utilização de ultra-som nos corpos-de-prova de 45cm de comprimento da madeira de *Pinus taeda* L. Os Quadros 13, 14 e 15, apresentam a análise de variância das variáveis apresentadas no Quadro 12. Os dados referentes aos corpos-de-prova com 12 cm de comprimento são apresentados no Quadro 16. As planilhas com todos os resultados obtidos para madeira adulta e juvenil são apresentadas nos Apêndices III e IV, para os corpos-de-prova de 45cm de comprimento, e nos Apêndices V e VI para os corpos-de-prova de 12cm de comprimento, respectivamente.

Quadro 12 – Valores de densidade, velocidade de propagação das ondas de ultra-som e constante dinâmica para os corpos-de-prova longitudinais com 45cm de comprimento.

	Madeira Adulta			Madeira Juvenil			Espécie		
	Dens. (g/cm ³)	Vel. ⁽¹⁾ (m/s)	C _{LL} ⁽²⁾ (MPa)	Dens. (g/cm ³)	Vel. ⁽¹⁾ (m/s)	C _{LL} ⁽²⁾ (MPa)	Dens. (g/cm ³)	Vel. ⁽¹⁾ (m/s)	C _{LL} ⁽²⁾ (MPa)
mínimo	0,531	4.344	11.218	0,402	3.731	6.534	0,402	3.731	6.534
máximo	0,721	5.945	25.013	0,619	5.402	15.522	0,721	5.945	25.013
médio	0,605	5.421	17.914	0,504	4.827	11.816	0,555	5.124	14.865
d. padrão	0,042	349	3.059	0,036	332	1.827	0,064	452	3.957
C.V. (%)	6,90	6,43	17,07	7,14	6,89	15,46	11,47	8,82	26,62

Notas:

1- velocidade obtida com uso de transdutores planos de 45 kHz

2- C_{LL} - cosntante dinâmica na direção longitudinal

Conforme já descrito, a análise estatística foi conduzida, para cada uma das variáveis avaliadas, utilizando a análise de variância de um delineamento em parcelas sub-divididas (split-plot), em que as parcelas foram constituídas pelas toras a diferentes alturas e as sub-parcelas pelos diferentes tipos de lenho (juvenil e adulto). Os resultados foram obtidos pela média de 4 corpos-de-prova (Figura 25).

Os resultados completos da análise de variância estão apresentados na íntegra no Apêndice X, para os corpos-de-prova longitudinais de 45cm de comprimento, e no Apêndice XI, para os corpos-de-prova de 12 cm de comprimento.

Quadro 13 – Análise de variância para a densidade — corpos-de-prova longitudinais com 45cm de comprimento.

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	0,643 aA	0,598 aAB	0,599 aAB	0,580 aB	0,605
Mad. Juvenil	0,492 bA	0,494 bA	0,509 bA	0,523 bA	0,505
Média	0,567	0,546	0,554	0,551	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$)

Quadro 14 – Análise de variância para a velocidade — corpos-de-prova longitudinais com 45cm de comprimento.

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	5.656 aA	5.529 aAB	5.323 aAB	5.175 aB	5.421
Mad. Juvenil	4.611 bA	4.849 bA	4.926 aA	4.922 aA	4.827
Média	5.133	5.189	5.124	5.049	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$)

Quadro 15 – Análise de variância para a constante dinâmica (C_{LL}) — corpos-de-prova longitudinais com 45cm de comprimento.

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	20.622 aA	18.372 aAB	17.064 aB	15.600 aB	17.915
Mad. Juvenil	10.570 bA	11.641 bA	12.350 bA	12.704 aA	11.816
Média	15.596	15.007	14.707	14.152	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$)

Dos Quadros 13, 14 e 15 observa-se que existe diferenciação entre madeira juvenil e adulta nas quatro parcelas (toras) das árvores estudadas, quando a variável analisada é a densidade. Essa diferenciação é verificada nas três primeiras toras, quando o parâmetro é a constante dinâmica (C_{LL}) e nas duas primeiras toras, quando parâmetro é a velocidade de propagação das ondas de ultra-som.

Em todos os parâmetros analisados observou-se que existe a diferenciação de madeira adulta entre a primeira e a quarta tora.

Em termos de madeira juvenil, não existe diferenciação entre as toras (parcelas).

Quadro 16 – Valores de densidade, velocidade de propagação das ondas de ultra-som e constante dinâmica para os corpos-de-prova longitudinais com 12cm de comprimento.

	Madeira Adulta			Madeira Juvenil			Espécie		
	Dens. (g/cm ³)	Vel. ⁽¹⁾ (m/s)	C_{LL} ⁽²⁾ (MPa)	Dens. (g/cm ³)	Vel. ⁽¹⁾ (m/s)	C_{LL} ⁽²⁾ (MPa)	Dens. (g/cm ³)	Vel. ⁽¹⁾ (m/s)	C_{LL} ⁽²⁾ (MPa)
mínimo	0,506	4.545	12.018	0,386	3.738	6.853	0,386	3.738	6.853
máximo	0,714	6.283	27.342	0,567	5.797	17.383	0,714	6.283	27.342
médio	0,593	5.863	20.516	0,478	5.207	13.081	0,535	5.535	16.799
d. padrão	0,046	301	3.158	0,034	403	2.398	0,070	484	4.660
C.V. (%)	7,73	5,14	15,39	7,17	7,75	18,33	13,16	8,74	27,74

Notas:

1- velocidade obtida com uso de transdutores planos de 45 kHz

2- C_{LL} - constante dinâmica avaliada na direção longitudinal

Os valores médios da velocidade de propagação longitudinal das ondas aqui obtidos resultaram bastante próximos daqueles obtidos por outros pesquisadores ($5.000\text{m/s} < v_L < 6.000\text{ m/s}$). Puccini (2002), avaliando a sensibilidade do método do ultra-som na detecção de defeitos na madeira de *Pinus taeda* L., obteve uma velocidade média de 5.368 m/s para madeira isenta de defeitos. Bartholomeu (2001) obteve velocidade média de 4.919 m/s para a madeira de *Pinus eliottii* na condição seca ao ar.

Comparando-se os Quadros 12 e 16 observa-se que os valores médios de velocidade de propagação na região de madeira adulta foram 12,3% superiores aos de madeira juvenil quando a análise é conduzida em corpos-de-prova de 45cm de

comprimento e 12,6% superiores quando comparadas as mesmas regiões em corpos-de-prova com 12cm de comprimento.

As velocidades de propagação da onda nos corpos-de-prova de madeira adulta foram sempre superiores às obtidas na região de madeira adulta das pranchas. Esse resultado era esperado, considerando-se a maior ocorrência de defeitos nas pranchas. De acordo com os resultados médios obtidos nesse trabalho, as velocidades para madeira adulta foram, em relação às pranchas, 2,4% maiores nos corpos-de-prova de 45cm e 10,7% maiores nos corpos-de-prova de 12cm. A madeira juvenil não seguiu esse padrão de comportamento. Para os corpos-de-prova de 45 cm foi observada uma redução de 5% na velocidade de propagação quando esses valores eram comparados com os valores médios das pranchas e um acréscimo de 3% quando comparados os resultados dos corpos-de-prova de 12cm de comprimento com as pranchas.

A análise de variância revelou que não existe diferença significativa entre os valores obtidos nas pranchas e nos corpos-de-prova de 45cm de comprimento em termos de propriedades físicas (densidade) e propriedades dinâmicas (v e C_{LL}), tanto para madeira adulta quanto para madeira juvenil.

Análise semelhante, conduzida avaliando as pranchas e os corpos-de-prova de 12cm de comprimento, mostrou que para madeira adulta não houve diferença estatisticamente significativa em termos de propriedades físicas. Em termos de propriedades dinâmicas, houve diferenciação entre pranchas e corpos-de-prova nas 3 primeiras toras no que tange à velocidade de propagação. Em termos constante dinâmica, essa diferenciação não foi observada. Para a madeira juvenil, em termos de propriedades dinâmicas, não observou-se diferença significativa.

A influência da variação do comprimento do corpo-de-prova na velocidade longitudinal (quando mantida constante sua seção transversal) foi feita com análise de variância, comparando-se as velocidades obtidas nos corpos-de-prova com 45cm e 12cm de comprimento. A análise mostrou diferenças significativas ao nível de 5%, tanto no caso de utilização de madeira adulta quanto no caso de madeira juvenil.

Os resultados de velocidade média das ondas de ultra-som foram superiores em 7,4% para os corpos-de-prova de madeira adulta com 12cm ($v \approx 5.863$ m/s) quando comparados com os resultados dos corpos-de-prova de 45cm ($v \approx 5.421$ m/s) e

superiores em 7,3% para os corpos-de-prova de madeira juvenil de 12cm em relação aos corpos-de-prova de madeira juvenil de 45cm de comprimento. Este fato parece ser justificável do ponto de vista físico, uma vez que quanto maior o comprimento do corpo-de-prova, maiores são as chances de ocorrência de defeitos, atenuadores naturais de ondas de ultra-som.

Contudo, os valores aqui obtidos estão em desacordo com aqueles apresentados por Bucur (1984), quando do estudo de situação semelhante com madeira de Beech (*Fagus sylvatica*) a 12% de umidade. Nele, a autora concluiu que a velocidade de propagação longitudinal permanece aproximadamente constante quando a relação comprimento do corpo-de-prova/largura (L/a) varia de 20 a 40. Concluiu, também, que abaixo deste limite os valores da velocidade de propagação diminuem. A autora verificou, em situação análoga a este programa experimental, que para um corpo-de-prova com seção 4cm x 4cm e relação L/a igual a 3 a velocidade de propagação era de 4.310 m/s, enquanto que para o corpo-de-prova de mesma seção e relação L/a igual a 11 a velocidade aumentava para 4.500 m/s, ou seja, um acréscimo de 4,2%.

6.2.1 c) Ensaios destrutivos dos corpos-de-prova

No Quadro 17 são apresentados os valores médios e coeficientes de variação do módulo de elasticidade estático e da resistência à compressão paralela às fibras resultantes dos ensaios convencionais destrutivos de compressão paralela às fibras nos corpos-de-prova longitudinais da madeira de *Pinus taeda* L. Os resultados obtidos para madeira adulta e juvenil estão apresentados na íntegra nos Apêndices III e IV, para os corpos-de-prova de 45cm, e Apêndices V e VI, para os corpos-de-prova de 12cm de comprimento, respectivamente. A análise estatística está apresentada nos Apêndices X e XI, para os corpos-de-prova de 45 cm e 12cm de comprimento, respectivamente.

Quadro 17 – Resumo dos módulos de elasticidade obtidos através de ensaios convencionais destrutivos de compressão paralela às fibras da madeira de *Pinus taeda* L.

	Madeira Adulta		Madeira Juvenil		Espécie	
	$E_{sl}^{(1)}$ (MPa)	$f_{c0}^{(2)}$ (MPa)	$E_{sl}^{(1)}$ (MPa)	$f_{c0}^{(2)}$ (MPa)	$E_{sl}^{(1)}$ (MPa)	$f_{c0}^{(2)}$ (MPa)
mínimo	5.561	19,14	3.948	27,78	3.948	19,14
máximo	21.070	59,66	12.720	50,63	21.070	59,66
médio	13.376	46,32	8.418	40,78	10.897	43,55
d. padrão	3.021	7,34	1.791	5,23	3.509	6,94
C. V. (%)	22,59	15,84	21,28	12,84	32,20	15,93

Nota:

- 1- E_{sl} - Módulo de elasticidade estático avaliado na direção longitudinal
- 2- f_{c0} - resistência à compressão paralela às fibras

O valor médio do módulo de elasticidade para a espécie apresentado pela NBR 7190 é 13.304 MPa. Nota-se, que no caso de madeira juvenil, quando tomada exclusivamente, sequer atinge esse valor, sendo 37% inferior ao valor de referência, mesmo tratando-se de uma amostragem com árvores de 34 anos. Já no caso de madeira adulta, a média aproxima-se muito do referencial teórico apresentado.

O valor médio da resistência à compressão paralela para a espécie apresentada pela NBR 7190 é 44,4 MPa. Nota-se que o valor médio para a madeira adulta é 4% superior ao valor de referência. Para a madeira juvenil o valor médio é 8% inferior ao referencial. Observa-se que tomando-se o valor médio para a espécie, o obtido aproxima-se muito do referencial teórico.

A Figura 33 apresenta um relatório típico desses ensaios. Nele são apresentadas as cargas máximas e as respectivas tensões máximas para cada corpo-de-prova. Para cada série ensaiada são apresentados ainda dados estatísticos como a média, desvio padrão e o coeficiente de variação das grandezas envolvidas, além de dados complementares como os valores máximos e mínimos de cada grandeza e o número de corpos-de-prova ensaiados. Foram ainda anotadas as deformações específicas (avaliadas com uso de clip-gage) dos corpos-de-prova, a 10% e a 50% da carga estimada de ruptura (7.000 kgf para o lote de madeira adulta e 5.000 kgf para o lote de madeira juvenil), para o cálculo do módulo de elasticidade.

Após atingida a deformação correspondente à carga de 50% da carga de ruptura, em todos os ensaios era retirado o “clip-gage”, com o intuito de evitar danos a ele quando atingida a carga de ruptura do corpo-de-prova. Isso conferiu aos diagramas um aspecto não convencional, não sendo possível caracterizar completamente a fase de comportamento plástico do material.

Extendendo-se a análise de variância aos valores dos ensaios estáticos (Apêndice X), nota-se que, em termos de velocidade de propagação da onda de ultra-som, houve diferenciação entre madeira juvenil e adulta nas três primeiras toras para corpos-de-prova de 12cm de comprimento – para os corpos-de-prova de 45cm, conforme já observado, a diferenciação entre os dois lenhos foi observada somente nas duas primeiras toras. Isso se deve ao fato que quanto maior o corpo-de-prova de madeira adulta maior o número de nós, fazendo com que a velocidade seja reduzida e se aproxime daquela obtida na madeira juvenil na mesma parcela. Numa análise global da variância, considerando-se os resultados dos ensaios dinâmicos e estáticos, pode-se dizer que a diferenciação entre madeira juvenil e adulta é mais perceptível nas primeiras toras da árvore (1 a 3, normalmente), o que corresponde a aproximadamente 60% da altura comercial. Com o aumento da altura, a madeira adulta tende a apresentar resultados próximos daqueles da madeira juvenil, em termos de valores de suas propriedades físicas (densidade), elásticas (E_s) e dinâmicas (v e C_{LL}).

A diferenciação entre madeira juvenil e adulta é melhor avaliada com uso da densidade como parâmetro balizador. A diferenciação entre madeira juvenil e adulta é perceptível em termos de parâmetros mecânicos de resistência (f_{c0}) somente na primeira tora da árvore, que corresponde a aproximadamente 20% da altura comercial.

6.2.2 Avaliação do módulo de elasticidade radial

6.2.2 a) Ensaios não-destrutivos

O Quadro 18, apresenta um resumo dos resultados dos ensaios não-destrutivos utilizando ultra-som nos corpos-de-prova orientados radialmente. Os resultados detalhados são apresentados no Apêndice VII.

Quadro 18 – Resumo dos valores de densidade, velocidade de propagação das ondas de ultra-som e módulo de elasticidade dinâmico para os corpos-de-prova radiais da madeira de *Pinus taeda* L.

	Densidade (g/cm ³)	Velocidade ⁽¹⁾ (m/s)	C _{RR} ⁽²⁾ (MPa)
mínimo	0,474	1.923	1.964
máximo	0,791	2.481	4.591
médio	0,574	2.198	2.793
desvio padrão	0,053	101	474
C.V. (%)	9,19	4,62	16,99

Notas:

1 - velocidade obtida com uso de transdutores planos de 45 kHz

2 - C_{RR} - constante dinâmica avaliada na direção radial

Os valores de velocidade de propagação das ondas de ultra-som em coníferas na direção radial, reportados da revisão bibliográfica, ficam em torno de 2.000 a 2.400 m/s. Os valores aqui obtidos ficaram bastante próximos daqueles obtidos por outros pesquisadores. Bucur (1995), para a madeira de *Pinus* spp. obteve uma velocidade média de 2.100m/s.

6.2.2 b) Ensaios destrutivos

No Quadro 19 são apresentados os valores médios e coeficientes de variação do módulo de elasticidade estático resultantes dos ensaios convencionais destrutivos de compressão normal às fibras nos corpos-de-prova radiais da madeira de *Pinus taeda* L. Os resultados obtidos estão apresentados na íntegra no Apêndice VII.

A Figura 34 apresenta um relatório típico desses ensaios. Nele são apresentada as cargas máximas e as respectivas tensões máximas para cada corpo-de-prova. Para cada série ensaiada são apresentados ainda dados estatísticos como a média, desvio padrão e o coeficiente de variação das grandezas envolvidas, além de dados complementares como os valores máximos e mínimos de cada grandeza e o número de corpos-de-prova ensaiados. Foram ainda anotadas inicialmente as deformações específicas (avaliadas com uso de clip-gage) dos corpos-de-prova, a 10% e a 50% da carga estimada de

ruptura (1.750 Kgf), porém, observou-se que, para os ensaios radiais, a manutenção da carga de 50% da de ruptura por um período de 30s levava o corpo-de-prova a experimentar deformações crescentes ao longo desse tempo e residuais.

Assim, na tentativa de evitar essa ocorrência indesejável, para esse ensaio adotou-se como pré-carga máxima o valor de 800 kgf, correspondente a cerca de 25% da carga estimada de ruptura, para o cálculo do módulo de elasticidade.

Quadro 19 – Resumo dos módulos de elasticidade estáticos obtidos através de ensaios de compressão normal às fibras nos corpos-de-prova radiais da madeira de *Pinus taeda* L.

	$E_{sr}^{(1)}$ (MPa)
Mínimo	216
Máximo	1.572
Médio	855
Desvio Padrão	221
C. V. (%)	25,88
Nota:	
1- E_{sr} - Módulo de elasticidade estático avaliado na direção radial	

Os valores preconizados pela NBR 7190 para essa espécie é 665 MPa, considerando-se a relação $E_{c90} = 1/20 E_{c0}$. Nota-se que o valor médio obtido é superior a esse referencial teórico em 28,6%.

O Quadro 20 apresenta a média das variáveis avaliadas segundo os tratamentos e os resultados estatísticos, considerando um delineamento casualizado em blocos (não é possível diferenciar madeira juvenil e adulta nessa direção).

Quadro 20 – Média das variáveis avaliadas segundo tratamento e resultado estatístico.

Tratamento	Variáveis			
	Densidade	Velocidade	C _{RR}	E _{sr}
1	0,632 a	2.276 a	3.287 a	1.104 a
2	0,547 b	2.145 b	2.515 b	758 b
3	0,553 b	2.162 b	2.597 b	768 b
4	0,563 b	2.276 ab	2.745 b	786 b
C.V. (%)	4,12	2,11	7,98	12,32
Notas:				
i) para cada variável, médias de tratamentos seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ($p>0,05$).				

Da análise estatística observa-se que, no geral, a primeira tora diferencia-se das demais em todas as variáveis envolvidas. Ressalta-se ainda, o baixo coeficiente de variação obtidos nas determinações de módulos de elasticidade.

6.2.3 Avaliação do módulo de elasticidade tangencial

6.2.3 a) Ensaios não-destrutivos

O Quadro 21 apresenta os resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos com a utilização do ultra-som nos corpos-de-prova tangenciais. As planilhas com todos os resultados obtidos para madeira adulta e juvenil são apresentadas nos Apêndices VIII e IX, respectivamente. A análise estatística de modo análogo ao conduzido na avaliação dos módulos de elasticidade longitudinal, está apresentada na íntegra no Apêndice XII.

Quadro 21 – Resumo dos valores de densidade, velocidade de propagação das ondas de ultra-som e constante dinâmica para os corpos-de-prova tangenciais da madeira adulta e juvenil de *Pinus taeda* L.

	Madeira Adulta			Madeira Juvenil			Espécie		
	Dens. (g/cm ³)	Vel. ⁽¹⁾ (m/s)	C _{TT} ⁽²⁾ (MPa)	Dens. (g/cm ³)	Vel. ⁽¹⁾ (m/s)	C _{TT} ⁽²⁾ (MPa)	Dens. (g/cm ³)	Vel. ⁽¹⁾ (m/s)	C _{TT} ⁽²⁾ (MPa)
mínimo	0,513	1.024	789	0,408	1.300	1.004	0,408	1.024	789
máximo	0,950	2.538	4.096	0,739	2.119	3.247	0,950	2.538	4.096
médio	0,615	1.733	1.853	0,511	1.752	1.580	0,563	1.743	1.717
d. padrão	0,070	127	336	0,047	100	298	0,079	111	340
C.V. (%)	11,42	7,34	18,13	9,12	5,70	18,85	14,08	6,35	19,79

Notas:

1- velocidade obtida com uso de transdutores planos de 45 kHz

2- C_{TT} - módulo de elasticidade dinâmico avaliado na direção tangencial

6.2.3 b) Ensaios destrutivos

No Quadro 22 são apresentados os valores médios do módulo de elasticidade estático obtidos através de ensaios convencionais destrutivos de compressão normal às fibras nos corpos-de-prova tangenciais da madeira de adulta e juvenil de *Pinus taeda* L. A planilha com todos os resultados individualizados estão apresentados no Apêndice VIII.

A Figura 35 ilustra o relatório desses ensaios. Nele são apresentadas as cargas máximas e as respectivas tensões máximas para cada corpo-de-prova. Foram registradas as deformações específicas (avaliadas com uso de clip-gage) dos corpos-de-prova, a 10% e a 50% da carga estimada de ruptura (800 Kgf), de forma análoga ao apresentado nos ensaios de compressão normal efetuados nos corpos-de-prova radiais.

Quadro 22 – Resumo dos módulos de elasticidade estáticos obtidos através de ensaios de compressão normal às fibras em corpos-de-prova tangenciais da madeira de *Pinus taeda* L.

	Madeira Juvenil	Madeira Adulta	Espécie
	$E_{st}^{(1)}$ (MPa)	$E_{st}^{(1)}$ (MPa)	$E_{st}^{(1)}$ (MPa)
mínimo	182	274	182
máximo	1.260	1.441	1.441
médio	349	662	507
d. padrão	134	215	238
C. V. (%)	38,25	32,49	46,94

Nota:

1- E_{st} - Módulo de elasticidade estático avaliado na direção tangencial

O valor médio apresentado pela NBR 7190 para essa espécie na direção transversal é 665 MPa, considerando-se a relação $E_{c90} = 1/20 E_{c0}$. Nota-se, que no caso de madeira juvenil, o valor médio obtido está muito aquém, chegando a quase 50% do referencial teórico. Já no caso de madeira adulta, quando tomada exclusivamente, a média aproxima-se muito do referencial citado.

A análise estatística, reportada do Apêndice XI, indica que a diferenciação entre madeira juvenil e adulta ocorre somente quando analisada em termos de propriedades físicas (densidade) e elásticas (E_{st}), não tendo sido observada diferenças estatisticamente significativas em termos de propriedades dinâmicas (v e E_d).

6.3 Relações entre variáveis

6.3.1 Dos ensaios estáticos

Os valores médios dos módulos de elasticidade estáticos nas três direções consideradas (longitudinal, radial e tangencial) obtidos por meio de ensaios convencionais destrutivos foram 10.897 MPa, 855 MPa e 507 MPa, respectivamente. As relações entre as constantes elásticas obtidas no programa experimental foi: $E_{sl} : E_{sr} : E_{st} \approx 21,5 : 1,7 : 1$.

Bodig & Jayne (1993) sugerem as seguintes relações entre constantes elásticas da madeira: $E_{sl} : E_{sr} : E_{st} \approx 20 : 1,6 : 1$. Nota-se, que os valores aqui obtidos resultaram bastante próximos daqueles obtidos por esses pesquisadores.

A NBR 7190 sugere que a relação entre módulos de elasticidade longitudinal e transversal seja adotada como 20, na falta de determinação experimental. Entretanto, o código normativo faz referência geral ao módulo transversal, sem especificar a direção radial ou tangencial. Conforme indicado por vários autores, o módulo de elasticidade radial deve ser superior ao módulo de elasticidade tangencial. Segundo Bodig & Jayne (1993), no caso de consideração específica do módulo de elasticidade radial, a relação longitudinal/radial normalmente diminui, ficando com valores teóricos da ordem de 12,5.

Ballarin (1999) obteve uma relação E_{sl}/E_{sr} em torno de 9,3. A relação observada entre os módulos de elasticidade obtidos na direção longitudinal e radial ficou em torno de 12,7, o que se aproxima em muito do referencial teórico de Bodig & Jayne (1993).

6.3.2 Dos ensaios dinâmicos

A relação entre os valores médios das velocidades de propagação da onda de ultra-som obtidos nas três direções consideradas (longitudinal, radial e tangencial) foi de 4,4 : 1,9 : 1,5 para os corpos-de-prova longitudinais de 45 cm de comprimento e 4,8 : 1,9 : 1,5 para os corpos-de-prova longitudinais com 12 cm de comprimento.

De uma compilação das referências bibliográficas, a razão entre as velocidades no sentido longitudinal, radial e tangencial é 5 : 2 : 1,5 , respectivamente.

Os valores médios da velocidade de propagação para a espécie estudada, apresentaram uma correlação muito próxima ao encontrado por outros pesquisadores, principalmente quando tomados em corpos-de-prova longitudinais com 12cm de comprimento.

6.3.3 Dos ensaios estáticos e dinâmicos

6.3.3 a) Direção longitudinal

A Figura 36 ilustra a correlação linear obtida entre a constante dinâmica (C_{LL}) e o módulo de elasticidade estático (E_{sl}) avaliados em corpos-de-prova de 45cm e 12cm de comprimento da madeira de *Pinus taeda* L., com a consideração de um único universo de dados (sem separação entre resultados de madeira juvenil e adulta).

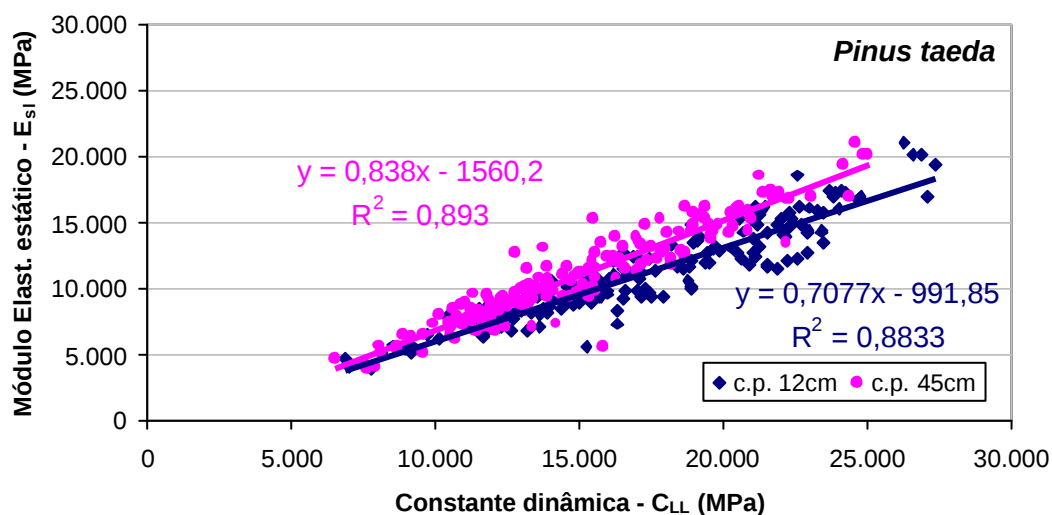


Figura 36 - Correlação entre a constante dinâmica e o módulo de elasticidade estático avaliados em corpos-de-prova longitudinais da madeira de *Pinus taeda* L. – valores individualizados dos corpos-de-prova.

As Figuras 37, 38 e 39 ilustram a correlação linear obtida entre a constante dinâmica (C_{LL}) avaliado com o ultra-som em corpos-de-prova de 45cm e 12cm de comprimento e o módulo de elasticidade estático (E_{si}), avaliado através de ensaios convencionais destrutivos de compressão paralela às fibras, para a espécie, madeira adulta e madeira juvenil de *Pinus taeda* L., respectivamente. Nas situações apresentadas nas três figuras, cada ponto nos diagramas representam dados médios de 4 corpos-de-prova de uma mesma parcela (tora).

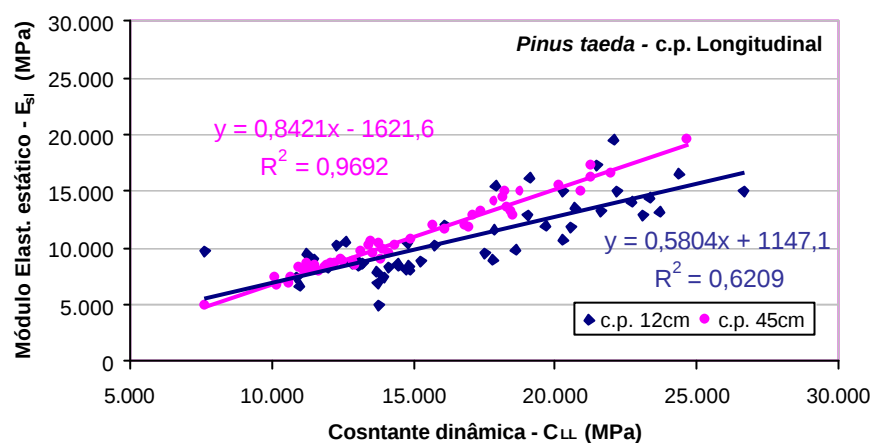


Figura 37 - Correlação entre a constante dinâmica e o módulo de elasticidade estático avaliados em corpos-de-prova longitudinais da madeira de *Pinus taeda* L. – valores médios das parcelas.

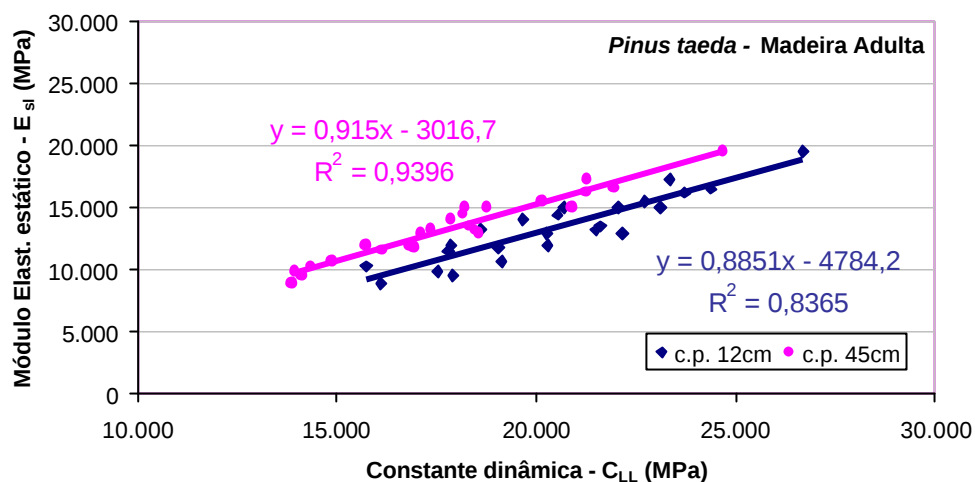


Figura 38 - Correlação entre a constante dinâmica e o módulo de elasticidade estático avaliados em corpos-de-prova longitudinais da madeira adulta de *Pinus taeda* L. – valores médios das parcelas.

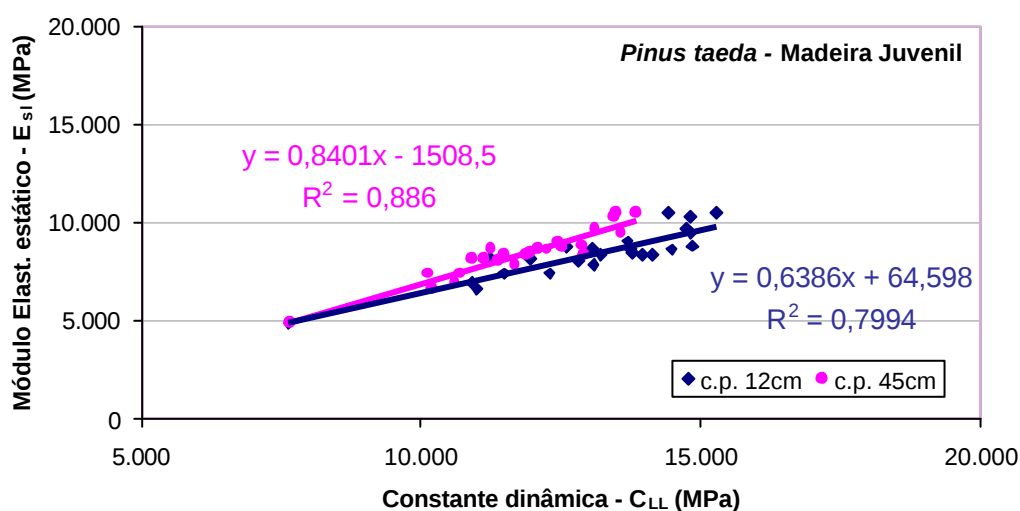


Figura 39 - Correlação entre a constante dinâmica e o módulo de elasticidade estático avaliados em corpos-de-prova longitudinais da madeira juvenil de *Pinus taeda* L. – valores médios das parcelas.

De uma análise dos resultados nota-se que todas as regressões foram significativas ao nível de 5% em termos dos parâmetros da regressão α_1 e α_2 (da reta) e dos coeficientes de determinação (R^2).

Considerando-se que, de maneira geral, assumem-se como satisfatórias regressões com $R^2 \geq 0,70$, pode-se dizer que todas as regressões aqui encaminhadas atingiram esse valor convencional.

Para o caso específico da regressão com todos os valores do programa experimental (Figura 36), os coeficientes de determinação estiveram bastante próximos de 0,90, valor considerado muito bom.

Nogueira & Ballarin (2002), em estudo semelhante com três espécies de eucalipto, obtiveram coeficientes de determinação que variaram entre 0,76 e 0,89.

Bartholomeu (2001), correlacionando os módulos de elasticidade obtidos por meio de ensaio não-destrutivo utilizando ultra-som e ensaios destrutivos de compressão paralela em corpos-de-prova obteve para a madeira de *Pinus elliottii* um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,81 e para *Eucalyptus citriodora*, um R^2 igual a 0,40.

As razões aqui obtidas entre a constante dinâmica e o módulo de elasticidade estático (C_{LL}/E_{sl}) variaram de 1,34 a 1,55. O Quadro 23, retomando dados da revisão bibliográfica, apresenta os valores da relação C_{LL}/E_{sl} obtidos por diversos pesquisadores.

Quadro 23 – Sumário de estudos da relação entre o módulo de elasticidade obtido em função da velocidade de propagação em ensaios não-destrutivos e em ensaios estáticos convencionais, para algumas espécies de madeira.

Referência	Espécie	Relação C_{LL}/E_{sl}	Ensaio não-destrutivo	Frequência (kHz)
Nogueira e Ballarin (2002)	<i>E. citriodora</i>	1,29	Ultra-som	45
	<i>E. saligna</i>	1,29		
	<i>E. grandis</i>	1,27		
Puccini (2002)	<i>P. taeda.</i>	1,28	Ultra-som	45
Bartholomeu (2001)	<i>P. elliotii</i>	1,38	Ultra-som	45
	<i>E. citriodora</i>	1,06		
	<i>Goupia glabra</i>	1,31		
Ballarin et al. (2002)	<i>Pinus taeda.</i>	1,12	Vibração transversal	0,466
	<i>E. citriodora</i>	1,13		0,476
	<i>E. saligna</i>	1,28		0,457
	<i>E. grandis</i>	1,11		0,505

Evidencia-se que para as técnicas de ultra-som (convencionalmente com frequências acima de 20 kHz) a relação C_{LL}/E_{sl} é normalmente superior àquela obtida em outros ensaios não-destrutivos com menor frequência de excitação, como é o caso da técnica da vibração transversal.

De fato, de acordo com Ouis (2002), e considerando-se a natureza visco-elástica da madeira, quanto maior a frequência de excitação da fonte, maior é o valor inferido para o módulo de elasticidade dinâmico.

6.3.3 b) Direção radial

A Figura 40 ilustra a correlação linear obtida entre a constante dinâmica (C_{RR}) avaliados com uso de ultra-som e o módulo de elasticidade estático (E_{sr}) avaliado através de ensaios convencionais destrutivos de compressão normal às fibras em corpos-de-prova radiais da madeira de *Pinus taeda* L.

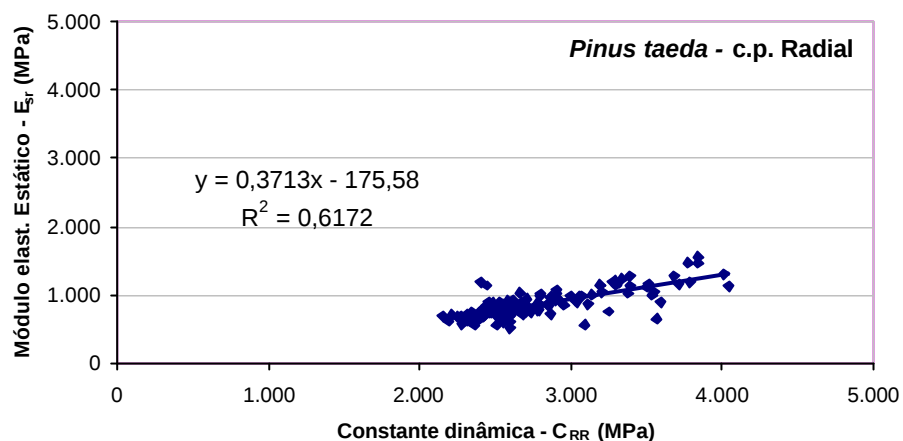


Figura 40 - Correlação entre a constante dinâmica e o módulo de elasticidade e estático avaliados em corpos-de-prova radiais da madeira de *Pinus taeda* L. – valores individualizados dos corpos-de-prova.

A análise dos dados revelou que a regressão foi significativa ao nível de 5% em termos dos parâmetros da regressão α_1 e α_2 (da reta) e do coeficiente de determinação (R^2).

Embora o coeficiente de determinação da regressão seja inferior ao aqui obtido para a direção longitudinal, nota-se que ele é superior àquele obtido por diversos pesquisadores para essa última direção. A análise da correlação em termos de valores médios por tratamento (tora) conduz a um coeficiente de determinação de 0,81, como ilustra a Figura 41.

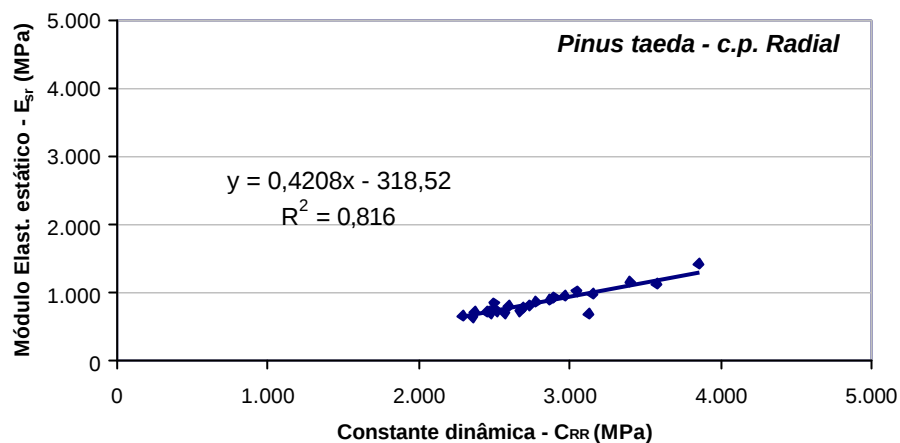


Figura 41 - Correlação entre a constante dinâmica e o módulo de elasticidade estático avaliados em corpos-de-prova radiais da madeira de *Pinus taeda* L. – valores médios dos tratamentos.

6.3.3 c) Direção tangencial

A Figura 42 ilustra a correlação linear obtida entre a constante dinâmica (C_{TT}) e o módulo de elasticidade estático (E_{st}) avaliados em corpos-de-prova radiais da madeira de *Pinus taeda* L. sem fazer distinção entre madeira juvenil e adulta, ou seja, considerando o lote como um único universo de dados.

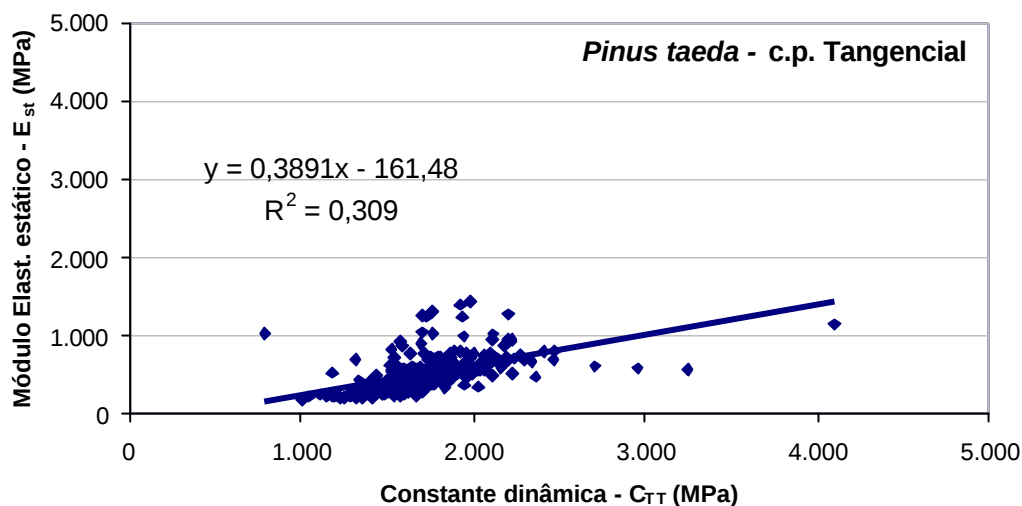


Figura 42 – Correlação entre a constante dinâmica e o módulo de elasticidade estático avaliados em corpos-de-prova tangenciais da madeira de *Pinus taeda* L. – valores individualizados dos corpos-de-prova.

As Figuras 43, 44 e 45 ilustram a correlação linear obtida entre a constante dinâmica (C_{TT}) avaliados com o ultra-som e o módulo de elasticidade estático (E_{st}), avaliado através de ensaios convencionais destrutivos de compressão normal às fibras em corpos-de-prova tangenciais para as madeiras adulta e juvenil de *Pinus taeda* L., respectivamente.

Os resultados representam médias das 24 parcelas (toras) de 6 corpos-de-prova por parcela para cada tipo de lenho (adulto e juvenil).

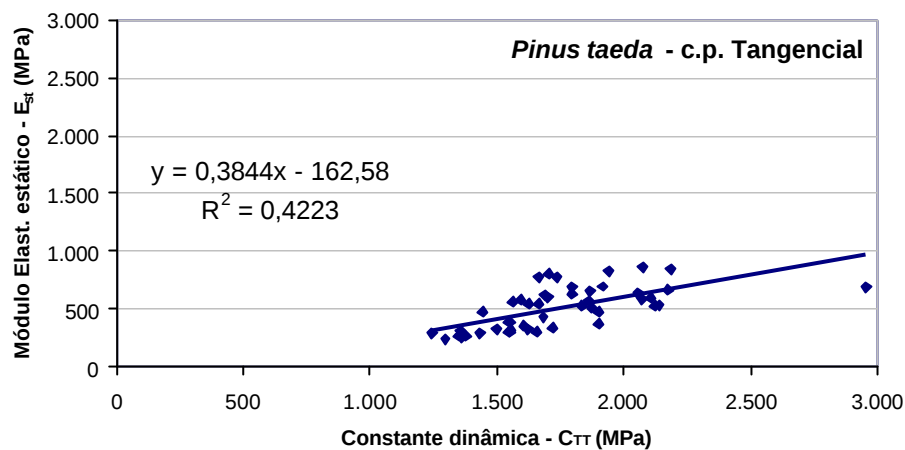


Figura 43 – Correlação entre a constante dinâmica e o módulo de elasticidade estático avaliados em corpos-de-prova tangenciais da madeira de *Pinus taeda* L. – valores médios das parcelas.

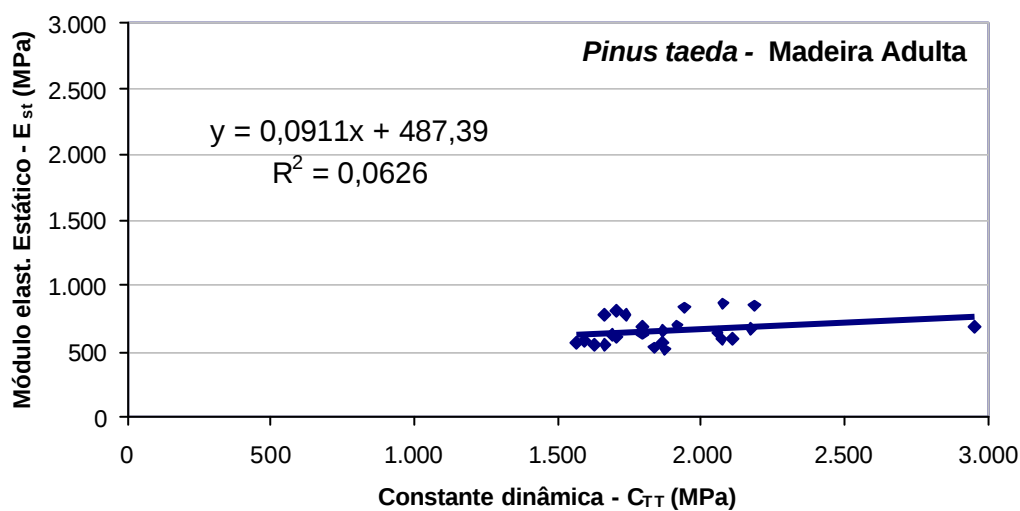


Figura 44 – Correlação entre a constante dinâmica e o módulo de elasticidade estático avaliados em corpos-de-prova tangenciais da madeira adulta de *Pinus taeda* L. – valores médios das parcelas.

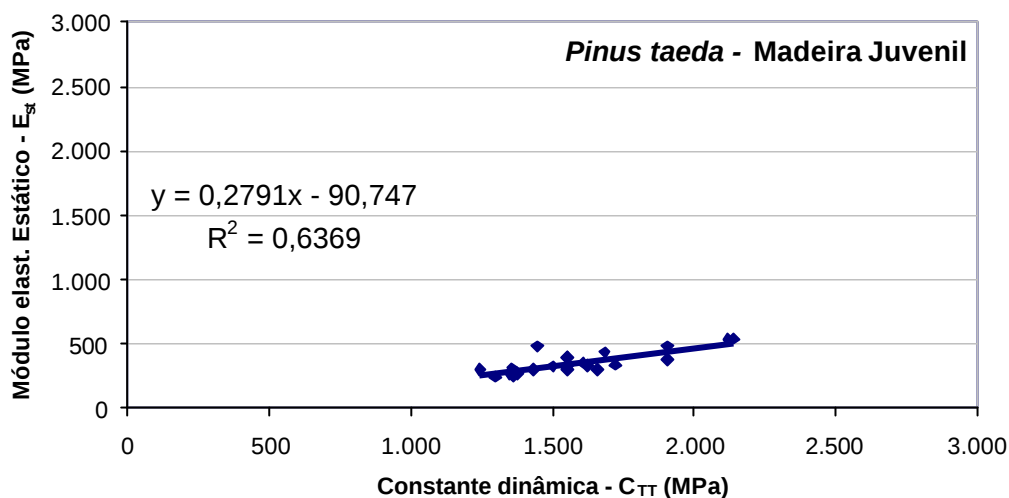


Figura 45 – Correlação entre a constante dinâmica e o módulo de elasticidade estático avaliados em corpos-de-prova tangenciais da madeira juvenil de *Pinus taeda* L. – valores médios das parcelas.

A análise dos dados revelou que todas as regressões foram significativas ao nível de 5% em termos dos parâmetros da regressão α_1 e α_2 (da reta) e dos coeficientes de determinação (R^2).

Analizando os ensaios dinâmicos e estáticos do ponto de vista físico, com ênfase no comportamento observado para o material, pode-se justificar a melhor correlação obtida nos ensaios na direção longitudinal, em detrimento dos resultados obtidos nas correlações para os módulos radiais e tangenciais.

Nos ensaios nos corpos-de-prova longitudinais, a região do lenho tardio é que dita o comportamento do material, tanto nos ensaios estáticos quanto nos dinâmicos.

A Figura 46 faz uma analogia do ensaio de compressão paralela às fibras a uma associação de molas em paralelo, onde a constante de mola k_1 , ($k_1 \gg k_2$), representaria o lenho tardio, enquanto k_2 representaria o lenho inicial.

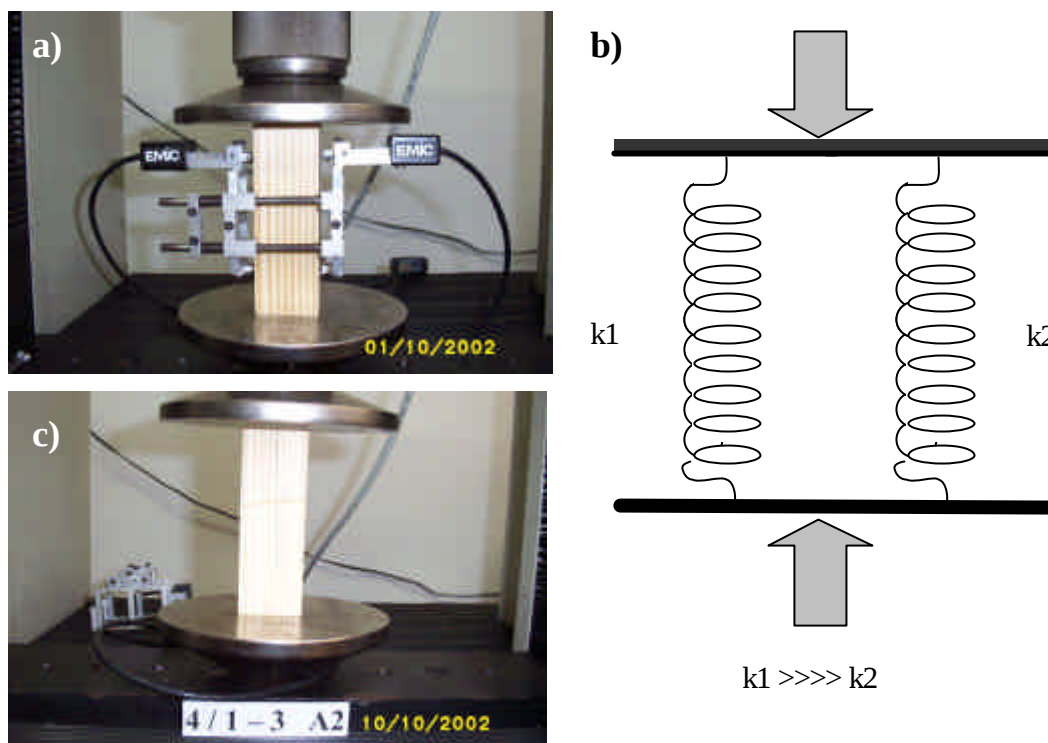


Figura 46 – Ensaio de compressão paralela às fibras. a) avaliação de deformações com o clip-gage; b) associação de molas em paralelo; c) ruptura do corpo-de-prova .

Fica fácil visualizar que a deformação experimentada pelo corpo-de-prova é ditada pela mola com maior constante (no caso o lenho tardio).

Esse tipo de lenho, de maior densidade, é, comprovadamente, a região onde as ondas de ultra-som se propagam com maior velocidade (Bucur, 1983). Portanto, essa é a velocidade de propagação contabilizada pelo aparelho para a onda de ultra-som nesse ensaio. Analisando-se a rigidez, expressa pelo módulo de elasticidade no ensaio de compressão, verifica-se também que ela é “ditada” pelo lenho tardio, mais rígido.

Como nesse caso o mecanismo que condiciona os ensaios estático e dinâmico é regido pelo mesmo tipo de lenho, espera-se, a priori, uma boa correlação entre seus resultados.

O raciocínio apresentado não pode ser estendido aos ensaios nas direções radial e tangencial. Para eles, no ensaio dinâmico (ultra-som), a velocidade de propagação da onda é uma composição dos valores que seriam obtidos para cada um dos lenhos, uma vez que a onda inevitavelmente tem que vencer ora uma região ora outra. Em

contrapartida, no ensaio estático, a região que dita o comportamento elástico do material frente a solicitação é o lenho inicial. Nessa nova situação, o modelo de associação de molas adequado para o ensaio estático contempla associação de molas em série, com distintas constantes de mola (a mola de menor k é quem estaria sendo deformada, permanecendo a outra quase que indeformada). A Figura 47 ilustra essa analogia. Evidencia-se, no detalhe da Figura 47 (c), a grande deformação relativa sofrida pelo lenho inicial (região mais clara do lenho).

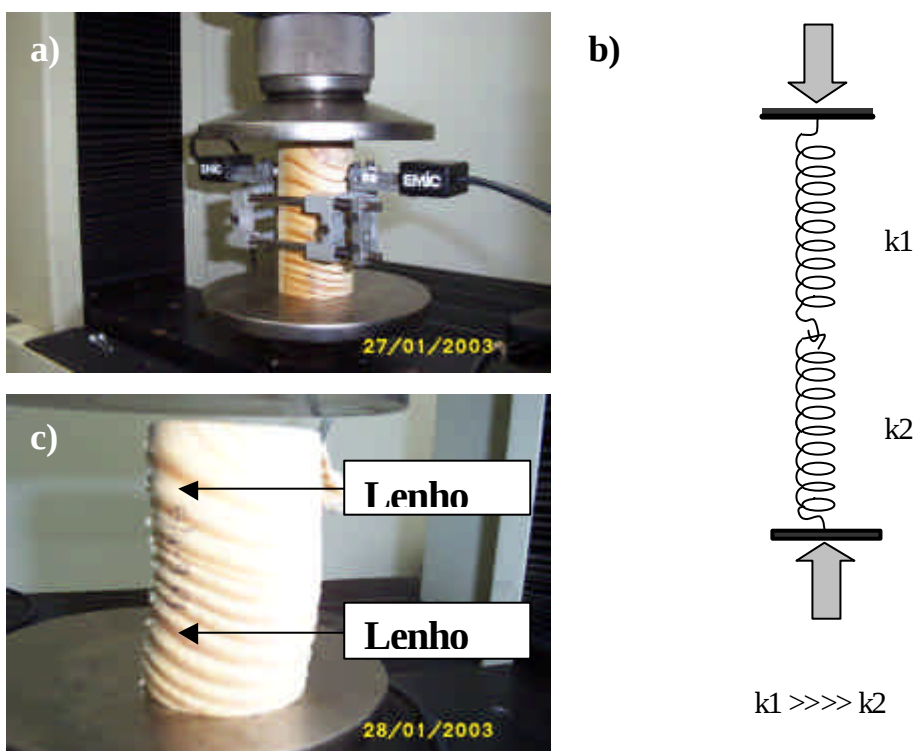


Figura 47 – Ensaio de compressão normal às fibras. a) avaliação de deformações com o clip-gage; b) associação de molas em série; c) ruptura do corpo-de-prova.

Assim, para os ensaios radiais, vê-se que o módulo de elasticidade dinâmico é obtido por meio de uma composição das velocidades nos dois lenhos (inicial e tardio) enquanto que seu correspondente módulo de elasticidade estático é ditado quase que exclusivamente pelo lenho inicial. Seria esperada, portanto, uma regressão entre esses dois parâmetros com menor coeficiente de determinação do que o obtido nos ensaios longitudinais.

Por fim, pode-se dizer que análise semelhante, conduzida para a direção tangencial (buscando os lenhos condicionantes dos desempenhos dinâmico — velocidade da onda de ultra-som — e estático — rigidez) é mais complexa do que as anteriores, considerando-se que ela envolveria uma associação dos dois mecanismos identificados.

6.3.4 De resistência e elasticidade

A Figura 48 ilustra a correlação linear obtida entre a constante dinâmica (C_{LL}), avaliados na direção longitudinal e a resistência à compressão paralela (f_{c0}) considerando um único universo de dados (sem separação entre resultados de madeira juvenil e adulta).

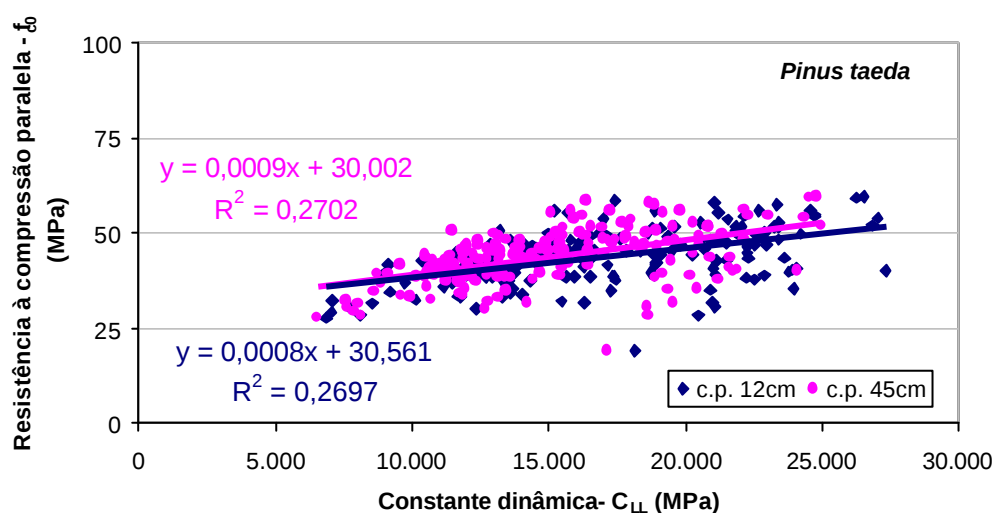


Figura 48 – Correlação entre a constante dinâmica e a resistência à compressão paralela da madeira de *Pinus taeda* L. – valores individualizados dos corpos-de-prova.

A análise das correlações em termos de coeficientes de determinação revelou pouca sensibilidade do método do ultra-som na avaliação da resistência à compressão paralela da madeira de *Pinus taeda* L.

7 CONCLUSÕES

Com os condicionantes assumidos neste estudo, as seguintes conclusões podem ser formalizadas:

a) Direção longitudinal da madeira:

a.1) a velocidade de propagação de ondas em pranchas e em corpos-de-prova de madeira é influenciada pelo tipo de lenho (madeira juvenil, madeira adulta e medula). Essa diferenciação é significativa até 60% da altura comercial da árvore sendo as velocidades superiores na madeira adulta e inferiores na medula.

a.2) o comprimento do corpo-de-prova influenciou a velocidade de propagação das ondas de ultra-som. As velocidades médias de transmissão para os corpos-de-prova de 12 cm (5.500 m/s) foram superiores às observadas nos corpos-de-prova de 45cm (5.130 m/s), tanto para madeira juvenil quanto para madeira adulta.

a.3) o valor da constante dinâmica foi sempre superior ao do módulo de elasticidade estático.

a.4) o valor do módulo de elasticidade estático avaliado na madeira adulta foi sempre superior ao do módulo de elasticidade estático avaliado na madeira juvenil.

a.5) a diferenciação entre madeira juvenil e adulta em termos de propriedades de resistência só foi verificada até 20% da altura comercial da árvore.

a.6) os coeficientes de determinação obtidos para todas as regressões estudadas entre C_{LL} e E_{sl} foram sempre superiores a 80% (valor máximo de 94%), revelando a sensibilidade do método do ultra-som na avaliação do módulo de elasticidade estático da madeira de *Pinus taeda* L.

b) Direção radial da madeira:

b.1) a velocidade média de propagação de ondas na direção radial foi de 2.200 m/s.

b.2) para a direção radial, a correlação entre C_{RR} e E_{sr} ficou em 62%, revelando pouca sensibilidade do método do ultra-som na avaliação do módulo de elasticidade estático da madeira de *Pinus taeda* L. nessa direção.

c) Direção tangencial da madeira:

c.1) a velocidade média de propagação de ondas na direção tangencial foi de 1.750 m/s.

c.2) para a direção tangencial, a correlação entre C_{TT} e E_{st} ficou em 31%, indicando que o método do ultra-som não foi sensível para a avaliação do módulo de elasticidade estático da madeira de *Pinus taeda* L. nessa direção.

d) Relações entre variáveis dos ensaios estáticos e dinâmicos:

d.1) para os ensaios estáticos, a relação $E_L : E_R : E_T$ foi aproximadamente de 21,5 : 1,7 : 1.

d.2) para os ensaios dinâmicos, a relação $v_L : v_R : v_T$ foi aproximadamente de 4,6 : 1,9 : 1,5.

e) Aspectos normativos (propostas de adequação da NBR 7190/97):

e.1) no ensaio de compressão normal às fibras preconizado pela NBR 7190, deve-se reduzir a pré-carga de 50% (item B.10.4 do código normativo) para 25% da carga estimada de ruptura, para que não se observem deformações específicas residuais.

e.2) os módulos de elasticidade longitudinais e transversais médios reportados pela NBR 7190 para a espécie são característicos da madeira adulta.

e.3) a madeira juvenil, presente em toda a extensão do fuste da árvore, apresentou valores de módulos de elasticidade cerca de 40 a 50% menores do que os valores avaliados na madeira adulta.

f) Propostas para trabalhos futuros

f.1) Estudar a influência dos diferentes tipos de lenhos (inicial e tardio) na velocidade de propagação das ondas de ultra-som.

f.2) Encaminhar os ensaios destrutivos e não-destrutivos em peças de dimensões estruturais, quantificando e qualificando visualmente defeitos e, complementarmente submetidos a classificação mecânica para enquadramento nas classes

de resistência, permitindo assim, a utilização segura e racional dos recursos florestais disponíveis, fornecendo subsídios para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira através de ensaios não-destrutivos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, A.R.; ELCOCK, G. Pole testing in the European context. In: NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD SYMPOSIUM, 6, 1987, Pullman, WA. *Proceedings ...* Pullman: Washington State University, 1987. p. 277-302

ABDEL-GADIR, A.Y.; KRAHMER, R.L. Estimating the age of demarcation of juvenile and mature wood in Douglas-fir. *Wood and Fiber Science*, v.25, n.3, 1993. p.242-249.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de estruturas de madeira* (NBR 7190). Rio de Janeiro: ABNT, 1997, 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE MADEIRAS. *Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral — Medição e quantificação de defeitos* (NB 1381). Curitiba: ABPM, 1990, 34 p.

ALIPPI, A, MAYER, W.G. (Eds). *Ultrasonic Methods in the Evaluation of Inhomogeneous Materials* NATO ASI Ser. E: Applied Science nº 126. Martinus Nijhoff, Dordrecht. 1987.

AULD, B.A. *Acoustic Fields and Waves in Solids*. Vol. 1. Wilwy Interscience, New York. 1973.

BALLARIN, A.W. Desempenho mecânico de dormentes prismáticos de eucalipto citriodora (E. citriodora). Botucatu: FCA/UNESP, 1999. 204p. Tese (Livre-docência em Propriedades mecânicas e estruturas de madeira). Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1999.

BARTHOLOMEU, A. Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som. 105p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Tecnologia da Madeira). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas. 2001.

BARTHOLOMEU, A., GONÇALVES, R., HERNÁNDEZ, R.E. Montagem de equipamento para ensaios não-destrutivos em madeira utilizando ultra-som. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 6, 1998, Florianópolis, SC. *Anais...Florianópolis*: IBRAMEM, 1998, v.4, p.345-354.

BELL, E.R.; PECK, E.C., KRUEGER, N.T. *Youngs modulus of elasticity of wood determined by dynamic methods*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1950 (Report 1775).

BENDTSEN, B. Properties of wood from improved and intensively managed trees. *Forest Prod. Journal*, v.28, n.10, 1978. p.61-72.

BENDTSEN, B.; SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and Loblolly Pine. *Wood and Fiber Science*, v.18, n.1, 1986. p.21-38.

BERTHOLF, L.D. *Use of elementary stress wave theory for prediction of dynamic strain in wood*. Pullman, WA: Washington State University, 1965 (Bulletin 291)

BODIG, J; JAYNE, B.A. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold, New York. 1982.

BORTOLETTO JR, G. Indicações para a utilização da madeira de seis espécies e variedades de Pinus na construção civil. São Carlos, USP, 1993, 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1993.

BOZO, G.A.M., KARSULOVIC, J.T. Efecto de nudos e inclinación de fibras en la velocidad de propagación e impedancia acústica de ondas ultrasonicas en madera de pino radiata. *Maderas Ciencia y Tecnologia*. 2000.V.2 (2). P. 150-160.

BRASHAW, B.K., ROSS, R.J., PELLERIN, R.F. Stress wave nondestructive evaluation of green veneer. In: International Symposium on nondestructive testing of wood, 10, 1996, Lausanne. *Proceedings...* Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1996, p. 135-145.

BROWN, M.J; McWILLIAMS, W.H. Pine Stands Across the South - Trends and Projections. In: SOUTHERN PLANTATION WOOD QUALITY WORKSHOP, 1989, Athens. *Proceedings...* Asheville: Southeastern Forest Experiment Station, United States Department of Agriculture. p.1-15, 1990.

BUCUR, V. An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. *Ultrasonics*, p. 116-126. 1983.

BUCUR, V. X-ray microdensitometric analysis and ultrasonic velocities on resonance spruce. Unpublished data. 1983 a.

BUCUR, V; PERRIN, J.R; Ultrasonic waves-wood structure interaction. In Proc. Inst. Acoust. Acoustics'88, Vol. 10, Part 2, University of Cambridge, UK., April 5 to 8. p.199-206. 1988.

BUCUR, V; FEENEY, F. Attenuation of ultrasound on solid wood. *Ultrasonics*. 30(2), p. 76-81. 1992.

BUCUR, V. Acoustics of Wood. CRC Press, Inc. 1995. 284p.

BUEUR, V. ; HERBE, C. ; NOSEI, G. Annual ring characteristics of *Pinus taeda* measured by ultrasonic and x-ray techniques. Iawa Journal. Disponível em <http://webofscience.fapesp.br/CIW.cgi?2886_A6343255&Func=Abstract&doc=0/1>. Acesso em 21 de agosto de 2002.

BURMESTER, A. Relationship between sound velocity and the morphological, physical, mechanical properties of wood. Holz Roh Werkst. 23 (6), 227-236. 1965.

CENTRE DE COOPÉRATION INTERNATIONALE EN RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT - CIRAD-Foret - Programme Bois - Documentos técnicos de divulgação do BING, France, 1998.

CLARK, A.III.; SAUCIER, J.R. Influence of initial planting density, geographic location, and species on juvenile wood formation in southern pine. *Forest Prod. J.*, v.39, n.7/8, p.42-48. 1989.

CLARK, A.III.; McALISTER, R.H.; SAUCIER, J.R.; REITTER, K. Effect of rotation age on lumber grade, yield, and strength of unthinned loblolly pine. *Forest Prod. J.*, v.46, n.1, p.63-68. 1996.

COCHRAN, W.G.; COX, G.M.. Experimental Designs. 2nd ed.. John Wiley & Sons. Singapore, 611p. 1957.

COWN, D.J. Corewood (Juvenile wood) in *Pinus radiata* –shoul we be concerned?. *New Zealand Journal of Forestry Science*, v.22, n.1, p.87-95. 1992.

DIEULESAINT, E; ROYER, D. Ondes élastiques dans les solides. Masson et Cie, Paris. 1974.

EVANS II, J.W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. *Forest Prod. J*, v.50, n.7/8, p.75-87. 2000.

FREDERICK, J. Ultrasonic Engineering. New York, USA: John Willey & Sons, Inc., 1965.

FUENTEALBA, C.; BARADIT, E. Determinación de las constantes elásticas de la madera por ultrasonido: parte 1 – módulos de elasticidad y módulos de rigidez. In: Congreso Iberoamericano de Investigación y Desarrollo en Productos Forestales, 1, 2000, Concepción, Chile, *Anais ...* Concepción, Chile, 2000, 7 p. (editado em CD-ROM).

GABRIEL, M.S.C. O uso do método das ondas de tensão na qualificação mecânica da madeira serrada de *Pinus taeda* L. Botucatu, UNESP, 2000, 94p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 2000.

GALIGINAITIS, S.V., BELL, E.R., FINE, A.M. (e outros) *Nondestructive testing of wood laminates*. Louisville, KY: Office of Naval Research, Institute of Industrial Research, 1954. (Final report).

GEIMER, R.L.; HERIAN, V.L.; XU, D. Influence of juvenile wood on dimensional stability and tensile properties of flakeboard. *Wood and Fiber Science*, v.29, n.2, p.103-120. 1997.

GERHARDS, C.D. Effect of earlywood and latewood on stress wave measurements parallel to grain. *Wood Sci.* 11(2), p. 69-72. 1978.

GOGGANS, J.F. The interplay of enviromente and heredity as factors controlling wood properties in conifers with special emphasis on their effects on specific gravity. Sch. Forestry, Raleigh, N. C. State Univ., (Technical Report, 11), 1961.

GONZÁLEZ, A.M.B.; KARSULOVIC, J.T.C. Efecto de nudos e inclinación de fibras en la velocidad de propagación e impedancia acústica de ondas ultrasónicas en madera de Pino radiata. In: Congreso Iberoamericano de Investigación y Desarrollo en Productos Forestales, 1, 2000, Concepción, Chile, *Anais ...* Concepción, Chile, 2000, 11p. (editado em CD-ROM)

GREEN, A.E; ZERNA, W. Theoretical Elasticity. Oxford University Press, Oxford. 1968.

HAINES, D; BUCUR, V; LEBAN, J.M; and HERBE, C. Ressonance Vibration Methods for Young's Modulus Measurements of Wood,. Station Qualité des Bois, Centre de Recherches Forestières, Nancy, France. 1993.

HARRIS, C.M; CREDE, C.E. Shock and Vibration Hand Book. Vol.1. basic Theory and Measurements. McGraw-Hill, New York. 1961.

HEARMON, R.F.S. An Introduction to Applied Anisotropic Elasticity. Oxford University Press, Oxford. 1961.

HEARMON, R.F.S. The Assessment of Wood properties by Vibrations and High Frequency Acoustic Waves. Paper presented at 2nd Symp. Nondestructive Testing of Wood. Washington State University, Olympia, p.49-66. 1965.

HEARMON, R.F.S. Theory of the vibration testing of wood. *Forest Prod. J.*, Madison, v. 16, n.8, p. 29-40, 1966.

HERZIG, L. Evaluation du module d'Young de bois d'épinette par méthode ultrasonore sur carottes de sondage. 290p., M.Sc. Thesis (Génie Forestière), Faculté de Foresterie et de Geomatique, Departement des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, Canada, 1992.

HOFFMEYER, P. The Pilodyn instrument as a nondestructive tester of the shock resistance of wood. In: NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD SYMPOSIUM, 4, 1978, Vancouver, WA. *Proceedings ...* Pullman, WA: Washington State University, 1978. p. 47-66.

HÖRIG, H. Anwendung der Elastizitätstheorie anisotroper Körper auf Messungen na Holz. *Ingen. Arch* (VI), p. 8-14. 1935.

HOYLE, R.J. A nondestructive test for stiffness of structural lumber. *Forest Prod. J.*, Madison, v. 11, n.6, p. 251-254, 1961.

JAMES, W.L. *A method for rapid measurement of the rate of decay of free vibrations.* Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1959 (Bulletin 2154).

JAYNE, B.A. A nondestructive test of glue bond quality. *Forest Prod. J.*, Madison, v. 5, n.5, p. 294-301, 1955.

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

KAISERLIK, J.H., PELLERIN, R.F. Stress wave attenuation as an indicator of lumber strength. *Forest Prod. J.*, Madison, v. 27, n.6, p. 39-43, 1977.

KELLISON, R.C. Characteristics affecting quality of timber from plantations, their determination and scope for modification. In: IUFRO Div.5-17 WORLD CONGRESS, Japan, 77-88. 1981

KLOCK, U. Qualidade da Madeira Juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore Curitiba 2.000. 291p. Dissertação. (Doutorado em Ciências Florestais) Curso de Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná.

KRAHMER, R. Fundamental Anatomy of Juvenile and Mature Wood. In: A TECHNICAL WORKSHOP: JUVENILE WOOD-WHAT DOES IT MEAN TO FOREST MANAGEMENT AND FOREST PRODUCTS, 1985, Washington. *Proceedings*..Madison: Forest Products Research Society. p.12-16. 1986.

KRETSCHMANN, D.E. Effect of juvenile wood on shear parallel and compression perpendicular-to-grain strength for loblolly pine. In: CTIA/IUFRO INTERNATIONAL WOOD QUALITY WORKSHOP, 1997, Quebec. *Proceedings*..Quebec: Forintek Canada. p.23-30. 1997.

KRETSCHMANN, D.E.; BENDTSEN, B.A. Ultimate tensile stress and modulus of elasticity of fast-grown plantation loblolly pine lumber. *Wood and Fiber Sci*, v.24, n. 2, p.189-203. 1992.

LARA PALMA, H.A., BALLARIN, A.W. Demarcação e densidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L.. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 8, 2002, Uberlândia, MG. *Anais*..Florianópolis: IBRAMEM, 2002, 12p. (editado em CD-Rom)

LAUNAY, J. et al. Comparison between Six Methods to Estimate Elastic Constants of Sitka spruce Wood. Actes du Coll. Comportement Mécanique du Bois, Bordeaux, June 8 to 9, p. 13-24. 1988.

LOGSDON, N.B., *Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira*. São Carlos: USP, 1998. 174p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, 1998.

LOO, J.A.; TAUER, C.C.; McNEW, R.N. Genetic variation in the time of transition from juvenile to mature wood in loblolly pine (*Pinus taeda*). *Silvae Genet*, n.34, p.14-19. 1985.

LOVE, A.EH. A treatise on the mathematical theory of elasticity. Dover Publ. Inc. New York. 1944.

McALISTER, R.; CLARK, A. Effect of geographic location and seed source on the bending properties of juvenile and mature loblolly pine. *Forest Prod. J.*, Madison, v. 41, n.9, p.39-41. 1991.

McALISTER, R.; CLARK, A. Shrinkage of juvenile and mature wood of loblolly pine from three locations. *Forest Prod. J.*, Madison, v. 42, n. 7/8, p.25-28. 1992.

McALISTER, R.; CLARK, A.; SAUCIER, J. Effect of initial spacing on mechanical properties of lumber sawn from unthinned slash pine at age 40. *Forest Prod. J.*, Madison, v. 47, n. 7/8, p.107-109. 1997.

McKEAN, H.B., HOYLE, R.J. Stress grading method for dimension lumber. Philadelphia, PA: American Society for Testing Materials, 1962 (Special Tech. Pub. 353)

MENDONÇA, M. A. Características da Madeira de *Pinus elliottii* com diferentes idades e propriedades do papel. Curitiba, 1982. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Setor de Ciências Agrárias, UFPR.

MONRO, J.J., McNULTY, R.E., LING. R. (e outros) Mobile computed tomography systems for industrial applications. *Materials Evaluation*, v. 48, n.5, p. 568-572, 1990.

MOTHERSHEAD, J.S., STACEY, S.S. Applicability of radiography to inspection of wood products. In: NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD SYMPOSIUM, 2, 1965, Pullman, WA. *Proceedings ...* Pullman, WA: Washington State University, 1978. p. 307-331.

MUSGRAVE, M.P.J. Calculation Relating Propagation of Elastic Waves in Anisotropic Media. Basic Phys. Div. Rep. nº 7. Natl. Physical Laboratory, London. 1961.

MUSGRAVE, M.P.J. Crystal Acoustics. Holden-Day, San Francisco. 1970.

OUIS, D. Dispersion of Wood as a Consequence of its Viscoelasticity. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 13, 2002, Berkeley, CA. *Proceedings ...* Berkeley, CA: University of California, p.8.

PERSTORPER, M. Dynamic modal tests of timber evaluation according to the Euler and Timoshenko theories. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 9, 1993, Pullman, WA. *Proceedings ...* Pullman, WA: Washington State University, p.45-54.

PLUVINAGE, G. Etude Critique de la Détermination Experimentale des Constantes Élastiques dans le Bois. Rep. Contr. DGRST 81G10585, Université de Metz, Metz, France. 1985.

PUCCINI, C.T. Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultra-som. 72p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Construções Rurais e Ambiente). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas. 2002.

RAMSAY, W.; BRIGGS, D. Juvenile Wood: Has It Come of Age?. In: A TECHNICAL WORKSHOP: JUVENILE WOOD-WHAT DOES IT MEAN TO FOREST MANAGEMENT AND FOREST PRODUCTS, 1985, Washington. *Proceedings...* Madison: Forest Products Research Society, p.5-11. 1986.

ROSS, R.J. Stress wave propagation in wood products. In: NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD SYMPOSIUM, 5, 1985, Pullman, WA. *Proceedings ...* Pullman, WA: Washington State University, 1985. p. 291-318.

ROSS, K.D.; SHOTTAFFER, J.E.; SHEPARD, R.K. The relationship between selected mechanical properties and age in quaking aspen. *Forest Prod. J.*, v.40, n.7/8, p.54-56. 1990.

ROSS, R.J., PELLERIN, R.F. *Nondestructive testing for assessing wood members in structures*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994. (General Technical Report FPL-GTR 70).

ROSS, R.J.; McDONALD, K.A.; GREEN, D.W.; SCHAD, K.C. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. *Forest Prod. J.*, Madison, v. 47, n.2, p. 89-92, feb. 1997.

ROWELL, R.M.; HAN, J.S.; ROWELL, J.S. Characterization and factors effecting fiber properties. In: FROLLINI, E.; LEÃO, A.L.; MATTOSO, L.H.C. (Ed.). *Natural polymers and agrofibers composites*: São Carlos: IQSC, USP. p.115-133. 2000.

SENFT, J.F.; BENDTSEN, B A.; GALLIGAN, W. L. Weak wood. *Journal of Forestry*. n. 83, p. 476-485. 1985.

SINCLAIR, A.N; FARSHAD, M.A. A comparison of three methods for determining elastic constants of wood. *J. Test. Eval.* 15(2), p. 77-86. 1987.

SNOWDON, J.C. *Vibration na shock in Damped Mechanical Systems*. John Wiley & Sons, New York. 1968.

TASSISSA, G.; BURKHART, H.E. Juvenile -mature wood demarcations in loblolly pine trees. *Wood and Fiber Science*, v.30, n.2, p.119-127. 1998.

TIEMANN, H.D. Effect of moisture upon the strenght and stiffness of wood. *Forest Serv Bull.* 70. Washington, DC: Government Printing Office, 1906. 144p.

TOMASELLI, I. Planted forests in Brazil. In: *PLANTED FORESTS IN SARAWAK: an international conference*, 1998, Kuching. Papers...Kuching: Forest Department Sarawak, 1998. p. 2-35.

TSOUMIS, G. *Wood as raw material*. 1968. Pergamon Press Inc. Great Britain. 276p.

TUSET, R; DURAN, F. Manual de las maderas comerciales, equipos y procesos de utilizacion. 1986. Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur S.R.L. Montevideo. Uruguay. 688p.

YANG, K.C.; BENSON, C.A.; WONG, J.K. Distribution of juvenile wood in two stems of *Larix laricina*. *Can. J. For. Res.*, v.16, p.1041-1049. 1986.

YANG, K.C.; HAZENBERG, G. Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana*. *Can. J. Res.*, v. 24, p.996-1007. 1994.

YIANNOS, P.N; TAYLOR, D.L. Dynamic modulus of thin wood sections. *Tappi J.* 50(1), p. 40-47. 1967.

ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. VAN. *Wood variation: its causes and control*. Springer-Verlag, Berlin. 361p. 1989.

ZOBEL, B.J. Genetic manipulation of wood of the southern pines including chemical characteristics. *Wood Sci Technol*, n. 54, p. 255-271. 1971.

ZOBEL, B.J. The southeast timber supply, how will it be affected by changing forestry in South America, Canada and the Northeast?. *South. For.*, n. 3, p.37-42. 1979.

ZOBEL, B.J. Inherent differences affecting wood quality in fast-grown plantations. In: IUFRO CONFERENCE, Oxford. *Proceedings...*Oxford: IUFRO Div 50, 1980. p.169-188. 1980.

ZOBEL, B.J. Wood quality from fast-grown plantations. *Tappi*, v. 64, n. 1, p.71-74. 1981.

ZOBEL, B.J. The changing quality of the world wood supply. *Wood Sci Technol*, n. 18, p. 1-17. 1984.

ZOBEL, B.J.; KELLISON, R.C. Wood – Where will it come from, where will it go? (A comparison of the Southern United States with South America). Utiliz. Changing Wood Res South U.S. Raleigh, North Carolina, 12 p. 1984.

9. APÊNDICES

APÊNDICE I Umidade, densidade e densidade básica obtidas à partir de corpos-de-prova das toras.

Amostras	Corpos-de-prova das toras (Discos)						
	Mu (g)	Ms (g)	Mimersa (g)	Vu (cm ³)	Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Dens. Básica (g/cm ³)
1/1	5.400	2.360	575,5	4.825	128,8	1,12	0,49
1/2	4.370	1.820	413,0	3.957	140,1	1,10	0,46
1/3	5.855	2.910	736,0	5.119	101,2	1,14	0,57
1/4	3.620	1.450	374,0	3.246	149,7	1,12	0,45
2/1	4.670	1.970	576,0	4.094	137,1	1,14	0,48
2/2	4.345	1.730	452,0	3.893	151,2	1,12	0,44
2/3	3.815	1.555	430,0	3.385	145,3	1,13	0,46
2/4	3.540	1.530	360,0	3.180	131,4	1,11	0,48
3/1	4.665	2.220	386,0	4.279	110,1	1,09	0,52
3/2	3.685	1.755	350,5	3.335	110,0	1,11	0,53
3/3	2.760	1.240	237,0	2.523	122,6	1,09	0,49
3/4	3.120	1.465	299,5	2.821	113,0	1,11	0,52
4/1	4.540	2.125	561,5	3.979	113,6	1,14	0,53
4/2	3.185	1.350	361,5	2.824	135,9	1,13	0,48
4/3	3.620	1.770	461,0	3.159	104,5	1,15	0,56
4/4	2.275	930	255,0	2.020	144,6	1,13	0,46
5/1	4.215	1.870	459,0	3.756	125,4	1,12	0,50
5/2	4.005	1.845	398,5	3.607	117,1	1,11	0,51
5/3	2.920	1.190	283,0	2.637	145,4	1,11	0,45
5/4	1.890	760	191,5	1.699	148,7	1,11	0,45
6/1	3.920	1.575	391,5	3.529	148,9	1,11	0,45
6/2	3.115	1.215	242,5	2.873	156,4	1,08	0,42
6/3	2.310	930	179,5	2.131	148,4	1,08	0,44
6/4	2045	815	165,5	1.880	150,9	1,09	0,43
Mínimo					101,20	1,08	0,42
Máximo					156,38	1,15	0,57
Médio					132,51	1,11	0,48
D. Padrão					17,21	0,02	0,04
C. V. (%)					12,99	1,64	8,41

APÊNDICE II - Resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos utilizando o ultra-som em pranchas de *Pinus taeda* L.

Prancha	Comp (cm)	Região	d (g/cm ³)	Tempo (ms)	Veloc. (m/s)	C _{II} (MPa)
1/1	230,5	A1	0,647	400,1	5.761	21.470
		J1	0,549	444,9	5.181	14.727
		M	-	525,8	4.384	-
		J2	0,554	453,1	5.087	14.342
		A2	0,650	403,3	5.715	21.242
1/2	230,5	A1	0,616	405,9	5.679	19.874
		J1	0,482	446,2	5.166	12.858
		M	-	496,5	4.642	-
		J2	0,488	456,6	5.048	12.447
		A2	0,612	406,8	5.666	19.633
1/3	233,9	A1	0,598	438,7	5.332	16.988
		J1	0,519	477,9	4.894	12.425
		M	-	506,0	4.623	-
		J2	0,503	481,1	4.862	11.879
		A2	0,616	440,9	5.305	17.327
1/4	228,0	A1	0,600	436,7	5.221	16.364
		J1	0,557	457,7	4.981	13.816
		M	-	494,0	4.615	-
		J2	0,551	473,9	4.811	12.748
		A2	0,585	447,7	5.093	15.160
2/1	231,7	A1	0,636	433,7	5.342	18.164
		J1	0,464	451,5	5.132	12.226
		M	-	517,1	4.481	-
		J2	0,465	477,5	4.852	10.948
		A2	0,598	454,1	5.102	15.560
2/2	230,5	A1	0,590	449,6	5.127	15.510
		J1	0,504	464,6	4.961	12.404
		M	-	518,9	4.442	-
		J2	0,493	517,5	4.454	9.785
		A2	0,568	481,7	4.785	12.996
2/3	288,8	A1	0,599	486,5	5.936	21.123
		J1	0,490	481,5	5.998	17.614
		M	-	493,7	5.850	-
		J2	0,489	475,0	6.080	18.086
		A2	0,578	479,5	6.023	20.951
2/4	229,0	A1	0,567	509,9	4.491	11.436
		J1	0,541	496,0	4.617	11.533
		M	-	539,1	4.248	-
		J2	0,516	486,5	4.707	11.424
		A2	0,599	497,6	4.602	12.696

3/1	233,0	A1	0,709	404,1	5.766	23.559
		J1	0,486	439,6	5.300	13.667
		M	-	515,9	4.516	-
		J2	0,460	452,9	5.145	12.168
		A2	0,712	414,1	5.627	22.530
3/2	228,6	A1	0,689	402,7	5.677	22.189
		J1	0,497	427,9	5.342	14.190
		M	-	464,7	4.919	-
		J2	0,477	432,7	5.283	13.321
		A2	0,608	397,6	5.749	20.099
3/3	230,8	A1	0,623	418,1	5.520	18.978
		J1	0,494	441,9	5.223	13.480
		M	-	498,7	4.628	-
		J2	0,518	483,0	4.778	11.823
		A2	0,666	460,3	5.014	16.751
3/4	231,7	A1	0,604	461,8	5.017	15.204
		J1	0,508	446,9	5.185	13.667
		M	-	498,7	4.646	-
		J2	0,500	468,6	4.945	12.231
		A2	0,624	476,6	4.862	14.748
4/1	229,2	A1	0,634	435,2	5.267	17.577
		J1	0,503	466,8	4.910	12.126
		M	-	506,7	4.523	-
		J2	0,510	465,7	4.922	12.348
		A2	0,664	435,7	5.261	18.363
4/2	231,2	A1	0,592	454,6	5.086	15.319
		J1	0,508	474,8	4.869	12.047
		M	-	492,7	4.693	-
		J2	0,514	476,7	4.850	12.100
		A2	0,619	451,6	5.120	16.233
4/3	232,0	A1	0,592	494,1	4.695	13.053
		J1	0,537	482,0	4.813	12.438
		M	-	479,9	4.834	-
		J2	0,522	481,1	4.822	12.149
		A2	0,612	491,2	4.723	13.649
4/4	233,5	A1	0,550	489,8	4.767	12.509
		J1	0,527	481,2	4.852	12.419
		M	-	497,8	4.691	-
		J2	0,544	509,1	4.587	11.447
		A2	0,567	493,7	4.730	12.684

5/1	235,2	A1	0,642	421,2	5.584	20.016
		J1	0,513	435,9	5.396	14.942
		M	-	483,5	4.865	-
		J2	0,528	435,1	5.406	15.429
		A2	0,643	419,7	5.604	20.191
5/2	229,7	A1	0,569	409,2	5.613	17.928
		J1	0,490	427,9	5.368	14.134
		M	-	473,8	4.848	-
		J2	0,521	451,5	5.087	13.497
		A2	0,591	431,5	5.323	16.746
5/3	234,2	A1	0,570	416,5	5.623	18.034
		J1	0,508	430,8	5.436	15.026
		M	-	470,6	4.977	-
		J2	0,495	449,9	5.206	13.426
		A2	0,586	433,0	5.409	17.144
5/4	238,0	A1	0,543	481,9	4.939	13.251
		J1	0,527	454,9	5.232	14.433
		M	-	487,9	4.878	-
		J2	0,532	478,8	4.971	13.136
		A2	0,594	476,8	4.992	14.805
6/1	230,8	A1	0,566	412,3	5.598	17.722
		J1	0,450	446,5	5.169	12.037
		M	-	482,8	4.780	-
		J2	0,420	446,1	5.174	11.238
		A2	0,610	413,7	5.579	18.980
6/2	230,4	A1	0,582	408,9	5.635	18.476
		J1	0,506	439,3	5.245	13.905
		M	-	479,3	4.807	-
		J2	0,448	442,8	5.203	12.126
		A2	0,536	415,6	5.544	16.466
6/3	237,0	A1	0,568	432,8	5.476	17.029
		J1	0,497	456,8	5.188	13.388
		M	-	500,9	4.731	-
		J2	0,529	491,5	4.822	12.308
		A2	0,584	455,8	5.200	15.793
6/4	229,4	A1	0,548	458,9	4.999	13.683
		J1	0,496	481,9	4.760	11.244
		M	-	491,6	4.666	-
		J2	0,476	481,4	4.765	10.810
		A2	0,578	465,7	4.926	14.027

APÊNDICE III · Resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos utilizando o ultra-som e convencionais destrutivos de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova longitudinais de 45cm de comprimento de madeira adulta de *Pinus taeda* L.

C.P.	Madeira em equilíbrio				Transdutor: 45kHz					
	m _{12%}	dimensões (mm)			Dens.	tempo	Vel.	C _{LL}	E _s	C _{LL} /E _s
	(g)	comp.	altura	largura	(g/cm ³)	(μs)	(m/s)	(MPa)	(MPa)	
1/1-1 A1	462,76	450,00	40,13	39,78	0,644	80,2	5.611	20.281	15.757	1,29
1/1-1 A2	470,49	450,00	40,06	39,87	0,655	75,8	5.937	23.071	16.912	1,36
1/1-3 A1	466,89	450,00	40,11	39,82	0,650	76,8	5.859	22.302	16.793	1,33
1/1-3 A2	463,26	450,00	39,76	40,08	0,646	76,8	5.859	22.179	16.729	1,33
1/2-1 A1	446,06	450,00	39,95	40,00	0,620	75,7	5.945	21.920	17.278	1,27
1/2-1 A2	439,99	450,00	39,87	40,11	0,611	76,1	5.913	21.379	17.215	1,24
1/2-3 A1	442,61	450,00	40,03	40,13	0,612	77,1	5.837	20.858	14.355	1,45
1/2-3 A2	440,27	450,00	40,07	39,92	0,612	77,1	5.837	20.836	15.988	1,30
1/3-1 A1	429,18	450,00	39,86	40,10	0,597	79,8	5.639	18.974	15.724	1,21
1/3-1 A2	454,41	450,00	39,89	40,07	0,632	90,9	4.950	15.483	15.225	1,02
1/3-3 A1	429,42	450,00	39,85	40,01	0,599	80,0	5.625	18.937	14.872	1,27
1/3-3 A2	431,58	450,00	39,88	40,11	0,600	78,8	5.711	19.553	14.100	1,39
1/4-1 A1	428,92	450,00	40,03	39,99	0,595	88,0	5.114	15.570	10.853	1,43
1/4-1 A2	436,10	450,00	40,03	40,09	0,604	81,3	5.535	18.501	12.934	1,43
1/4-3 A1	433,78	450,00	39,83	39,99	0,605	82,1	5.481	18.182	11.904	1,53
1/4-3 A2	407,01	450,00	39,95	40,06	0,565	85,8	5.245	15.546	11.582	1,34
2/1-1 A1	461,73	450,00	39,87	40,04	0,643	80,3	5.604	20.185	14.265	1,42
2/1-1 A2	432,48	450,00	40,03	40,04	0,600	85,9	5.239	16.456	11.971	1,37
2/1-3 A1	451,83	450,00	39,93	39,91	0,630	80,6	5.583	19.640	14.399	1,36
2/1-3 A2	428,61	450,00	39,92	40,05	0,596	82,6	5.448	17.682	12.185	1,45
2/2-1 A1	423,19	450,00	39,95	40,08	0,587	90,8	4.956	14.426	9.394	1,54
2/2-1 A2	400,37	450,00	39,99	39,86	0,558	90,8	4.956	13.709	13.115	1,05
2/2-3 A1	428,87	450,00	40,09	40,10	0,593	83,2	5.409	17.342	12.182	1,42
2/2-3 A2	413,22	450,00	39,92	39,87	0,577	81,8	5.501	17.460	13.158	1,33
2/3-1 A1	430,00	450,00	39,87	40,06	0,598	90,8	4.956	14.694	10.584	1,39
2/3-1 A2	420,73	450,00	40,07	40,09	0,582	87,2	5.161	15.500	12.710	1,22
2/3-3 A1	432,95	450,00	39,92	40,13	0,601	88,7	5.073	15.458	10.060	1,54
2/3-3 A2	416,01	450,00	40,19	40,14	0,573	91,4	4.923	13.891	9.340	1,49
2/4-1 A1	396,38	450,00	40,10	40,01	0,549	90,9	4.950	13.455	10.006	1,34
2/4-1 A2	447,43	450,00	40,09	40,17	0,617	90,3	4.983	15.333	9.628	1,59
2/4-3 A1	419,71	450,00	39,86	40,00	0,585	89,9	5.006	14.657	9.369	1,56
2/4-3 A2	416,78	450,00	39,79	40,03	0,581	98,8	4.555	12.063	6.793	1,78

3/1-1 A1	517,18	450,00	39,97	40,09	0,717	76,2	5.906	25.013	20.112	1,24
3/1-1 A2	519,49	450,00	39,94	40,07	0,721	77,4	5.814	24.383	16.933	1,44
3/1-3 A1	504,39	450,00	39,94	40,09	0,700	76,0	5.921	24.542	21.070	1,16
3/1-3 A2	505,28	450,00	39,90	40,09	0,702	75,7	5.945	24.805	20.113	1,23
3/2-1 A1	506,46	450,00	40,09	40,17	0,699	76,6	5.875	24.119	19.313	1,25
3/2-1 A2	448,93	450,00	39,87	40,00	0,626	77,8	5.784	20.928	15.336	1,36
3/2-3 A1	485,81	450,00	39,84	39,95	0,678	78,7	5.718	22.177	13.494	1,64
3/2-3 A2	423,56	450,00	39,95	39,90	0,590	85,4	5.269	16.395	11.994	1,37
3/3-1 A1	455,63	450,00	39,95	40,28	0,629	80,7	5.576	19.565	13.773	1,42
3/3-1 A2	484,53	450,00	39,95	40,01	0,674	81,7	5.508	20.436	16.011	1,28
3/3-3 A1	443,36	450,00	40,09	39,87	0,616	81,2	5.542	18.931	14.704	1,29
3/3-3 A2	473,21	450,00	39,87	40,03	0,659	78,5	5.732	21.652	17.379	1,25
3/4-1 A1	431,13	450,00	40,09	39,85	0,600	80,7	5.576	18.647	12.725	1,47
3/4-1 A2	438,73	450,00	39,90	39,90	0,612	81,6	5.515	18.624	12.461	1,49
3/4-3 A1	438,93	450,00	39,96	40,13	0,608	87,1	5.166	16.236	13.992	1,16
3/4-3 A2	456,98	450,00	39,94	40,00	0,636	80,6	5.583	19.814	14.819	1,34
4/1-1 A1	470,58	450,00	39,97	39,95	0,655	80,8	5.569	20.313	14.745	1,38
4/1-1 A2	495,22	450,00	39,94	40,00	0,689	87,6	5.137	18.178	12.322	1,48
4/1-3 A1	442,70	450,00	40,08	40,07	0,613	85,0	5.294	17.169	11.843	1,45
4/1-3 A2	460,38	450,00	40,04	40,03	0,638	83,4	5.396	18.583	12.709	1,46
4/2-1 A1	436,24	450,00	39,88	39,94	0,609	86,4	5.208	16.510	13.177	1,25
4/2-1 A2	430,65	450,00	39,88	40,00	0,600	82,5	5.455	17.849	12.681	1,41
4/2-3 A1	412,49	450,00	39,90	39,89	0,576	87,3	5.155	15.302	11.539	1,33
4/2-3 A2	456,72	450,00	39,88	39,84	0,639	82,8	5.435	18.868	14.323	1,32
4/3-1 A1	424,25	450,00	39,95	40,03	0,590	91,7	4.907	14.197	7.374	1,93
4/3-1 A2	445,01	450,00	40,08	40,00	0,617	92,7	4.854	14.536	11.685	1,24
4/3-3 A1	427,79	450,00	39,97	40,00	0,595	103,6	4.344	11.218	7.607	1,47
4/3-3 A2	438,35	450,00	40,02	40,11	0,607	86,1	5.226	16.577	11.491	1,44
4/4-1 A1	382,31	450,00	39,93	39,82	0,534	89,9	5.006	13.388	9.214	1,45
4/4-1 A2	416,12	450,00	39,99	40,13	0,576	86,9	5.178	15.452	10.192	1,52
4/4-3 A1	408,15	450,00	39,89	40,14	0,566	93,4	4.818	13.149	8.322	1,58
4/4-3 A2	400,63	450,00	39,92	39,98	0,558	90,3	4.983	13.853	11.650	1,19

5/1-1 A1	452,99	450,00	39,90	39,98	0,631	77,6	5.799	21.221	18.563	1,14
5/1-1 A2	476,68	450,00	39,94	39,97	0,664	78,6	5.725	21.750	17.029	1,28
5/1-3 A1	469,05	450,00	39,78	40,14	0,653	78,2	5.754	21.616	17.468	1,24
5/1-3 A2	445,17	450,00	39,86	39,88	0,622	78,4	5.740	20.503	16.153	1,27
5/2-1 A1	417,35	450,00	39,93	39,96	0,581	79,9	5.632	18.437	14.309	1,29
5/2-1 A2	431,00	450,00	39,92	40,05	0,599	79,5	5.660	19.194	15.554	1,23
5/2-3 A1	400,38	450,00	39,85	40,11	0,557	86,4	5.208	15.100	10.306	1,47
5/2-3 A2	419,73	450,00	40,00	40,01	0,583	79,5	5.660	18.673	16.193	1,15
5/3-1 A1	404,38	450,00	39,98	39,95	0,563	80,0	5.625	17.802	15.305	1,16
5/3-1 A2	441,12	450,00	39,95	40,05	0,613	77,7	5.792	20.550	16.163	1,27
5/3-3 A1	416,13	450,00	39,94	40,05	0,578	80,6	5.583	18.020	14.172	1,27
5/3-3 A2	401,66	450,00	39,89	40,00	0,559	83,2	5.409	16.364	12.277	1,33
5/4-1 A1	393,70	450,00	40,04	40,01	0,546	82,0	5.488	16.447	12.094	1,36
5/4-1 A2	451,56	450,00	40,08	40,12	0,624	89,6	5.022	15.741	13.439	1,17
5/4-3 A1	387,83	450,00	39,81	40,06	0,540	84,5	5.325	15.326	9.355	1,64
5/4-3 A2	404,62	450,00	39,92	39,91	0,564	82,0	5.488	16.997	11.311	1,50
6/1-1 A1	417,11	450,00	40,17	40,20	0,574	77,9	5.777	19.154	15.409	1,24
6/1-1 A2	435,17	450,00	40,17	40,05	0,601	79,0	5.696	19.504	14.851	1,31
6/1-3 A1	399,99	450,00	39,93	39,96	0,557	81,4	5.528	17.025	13.573	1,25
6/1-3 A2	445,99	450,00	39,98	40,08	0,619	80,4	5.597	19.376	16.249	1,19
6/2-1 A1	417,06	450,00	39,96	39,86	0,582	78,0	5.769	19.367	15.280	1,27
6/2-1 A2	381,22	450,00	39,98	39,94	0,531	81,5	5.521	16.174	12.387	1,31
6/2-3 A1	417,28	450,00	39,92	39,91	0,582	81,0	5.556	17.964	13.031	1,38
6/2-3 A2	390,97	450,00	39,98	40,17	0,541	82,9	5.428	15.941	12.358	1,29
6/3-1 A1	405,59	450,00	39,92	40,11	0,563	81,5	5.521	17.161	13.370	1,28
6/3-1 A2	403,36	450,00	40,06	40,00	0,559	81,7	5.508	16.970	13.936	1,22
6/3-3 A1	412,28	450,00	40,00	39,98	0,573	82,0	5.488	17.253	14.825	1,16
6/3-3 A2	437,87	450,00	39,90	40,05	0,609	88,3	5.096	15.815	5.561	2,84
6/4-1 A1	384,19	450,00	39,99	40,09	0,533	86,5	5.202	14.412	11.051	1,30
6/4-1 A2	258,44	279,00	39,90	40,06	0,580	61,8	4.515	11.811	9.458	1,25
6/4-3 A1	403,96	450,00	40,01	39,88	0,563	87,4	5.149	14.914	9.801	1,52
6/4-3 A2	412,58	450,00	39,78	39,97	0,577	84,7	5.313	16.276	10.767	1,51
Mínimo					0,531		4.344	11.218	5.561	2,02
Máximo					0,721		5.945	25.013	21.070	1,19
Médio					0,605		5.421	17.914	13.376	1,34
D. Padrão					0,042		349	3.059	3.021	1,01
C. V. (%)					6,901		6,43	17,07	22,59	0,76

APÊNDICE IV - Resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos utilizando o ultra-som e convencionais destrutivos de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova longitudinais de 45cm de comprimento de madeira juvenil de *Pinus taeda* L.

C.P.	Madeira em equilíbrio				Transdutor: 45kHz					
	m _{12%}	dimensões (mm)			Dens.	tempo	Vel.	C _{LL}	E _s	C _{LL} /E _s
	(g)	comp.	altura	largura	(g/cm ³)	(μs)	(m/s)	(MPa)	(MPa)	
1/1-1 J1	345,86	450,00	40,00	40,14	0,479	112,8	3.989	7.618	3.948	1,93
1/1-1 J2	390,74	450,00	40,02	39,92	0,544	120,6	3.731	7.567	4.213	1,80
1/1-3 J1	443,28	450,00	39,99	39,82	0,619	109,0	4.128	10.544	7.203	1,46
1/1-3 J2	405,36	450,00	39,97	39,90	0,565	87,1	5.166	15.077	11.174	1,35
1/2-1 J1	348,04	450,00	40,01	39,75	0,486	93,5	4.813	11.265	8.477	1,33
1/2-1 J2	334,82	450,00	39,89	40,02	0,466	96,4	4.668	10.156	8.062	1,26
1/2-3 J1	340,07	450,00	39,82	39,76	0,477	95,9	4.692	10.510	7.139	1,47
1/2-3 J2	367,49	450,00	40,00	39,97	0,511	85,8	5.245	14.050	9.862	1,42
1/3-1 J1	364,76	450,00	39,81	39,88	0,511	95,6	4.707	11.312	9.600	1,18
1/3-1 J2	361,26	450,00	39,91	39,86	0,505	95,0	4.737	11.323	7.798	1,45
1/3-3 J1	375,79	450,00	39,86	39,77	0,527	98,4	4.573	11.017	8.908	1,24
1/3-3 J2	358,88	450,00	39,93	39,91	0,500	94,4	4.767	11.372	8.269	1,38
1/4-1 J1	396,90	450,00	39,90	39,99	0,553	93,7	4.803	12.749	9.440	1,35
1/4-1 J2	375,82	450,00	39,97	39,98	0,523	100,4	4.482	10.499	6.983	1,50
1/4-3 J1	403,86	450,00	39,90	40,11	0,561	94,4	4.767	12.743	8.924	1,43
1/4-3 J2	416,14	450,00	40,03	39,91	0,579	86,9	5.178	15.522	9.915	1,57
2/1-1 J1	332,88	450,00	39,66	39,84	0,468	97,7	4.606	9.932	7.342	1,35
2/1-1 J2	334,43	450,00	40,14	40,04	0,462	98,8	4.555	9.593	6.568	1,46
2/1-3 J1	330,79	450,00	39,88	40,04	0,460	88,7	5.073	11.849	9.164	1,29
2/1-3 J2	333,86	450,00	39,84	39,83	0,468	101,8	4.420	9.136	6.432	1,42
2/2-1 J1	367,25	450,00	39,97	39,91	0,512	90,0	5.000	12.790	9.727	1,31
2/2-1 J2	354,78	450,00	39,83	39,93	0,496	102,5	4.390	9.555	5.132	1,86
2/2-3 J1	355,86	450,00	40,05	39,79	0,496	87,3	5.155	13.185	10.024	1,32
2/2-3 J2	351,91	450,00	40,02	39,82	0,491	89,8	5.011	12.323	8.947	1,38
2/3-1 J1	359,23	450,00	40,07	39,95	0,499	91,0	4.945	12.195	8.401	1,45
2/3-1 J2	340,67	450,00	39,78	39,88	0,477	93,4	4.818	11.077	7.797	1,42
2/3-3 J1	345,47	450,00	39,93	40,01	0,481	90,8	4.956	11.803	8.084	1,46
2/3-3 J2	360,03	450,00	40,00	39,90	0,501	93,3	4.823	11.662	7.174	1,63
2/4-1 J1	392,08	450,00	39,92	40,00	0,546	91,6	4.913	13.169	9.724	1,35
2/4-1 J2	359,68	450,00	40,03	39,78	0,502	91,7	4.907	12.088	8.438	1,43
2/4-3 J1	374,57	450,00	39,91	38,88	0,536	101,7	4.425	10.503	6.509	1,61
2/4-3 J2	377,07	450,00	39,75	39,83	0,529	90,0	5.000	13.231	9.753	1,36

3/1-1 J1	334,73	450,00	39,87	39,90	0,468	94,1	4.782	10.693	6.188	1,73
3/1-1 J2	343,13	450,00	39,99	39,94	0,477	105,8	4.253	8.637	5.683	1,52
3/1-3 J1	363,33	450,00	40,02	39,92	0,505	93,8	4.797	11.632	7.511	1,55
3/1-3 J2	315,99	450,00	39,88	39,83	0,442	88,3	5.096	11.482	8.317	1,38
3/2-1 J1	340,52	450,00	39,90	39,87	0,476	90,5	4.972	11.761	9.515	1,24
3/2-1 J2	317,01	450,00	40,00	39,90	0,441	92,4	4.870	10.469	7.389	1,42
3/2-3 J1	371,48	450,00	39,95	39,84	0,519	109,9	4.095	8.696	5.404	1,61
3/2-3 J2	366,21	450,00	39,86	39,79	0,513	93,5	4.813	11.885	7.204	1,65
3/3-1 J1	356,67	450,00	39,86	39,94	0,498	92,0	4.891	11.911	7.743	1,54
3/3-1 J2	373,18	450,00	40,01	40,03	0,518	97,8	4.601	10.962	7.320	1,50
3/3-3 J1	351,62	450,00	39,83	40,00	0,490	92,6	4.860	11.582	8.236	1,41
3/3-3 J2	370,10	450,00	39,97	39,74	0,518	89,5	5.028	13.090	10.090	1,30
3/4-1 J1	378,00	450,00	39,89	39,76	0,530	84,6	5.319	14.985	11.184	1,34
3/4-1 J2	356,20	450,00	40,04	39,87	0,496	89,9	5.006	12.424	9.042	1,37
3/4-3 J1	349,41	450,00	39,88	39,96	0,487	90,5	4.972	12.047	8.756	1,38
3/4-3 J2	364,56	450,00	40,04	40,09	0,505	88,7	5.073	12.990	9.930	1,31
4/1-1 J1	373,50	450,00	39,93	40,03	0,519	96,7	4.654	11.245	7.546	1,49
4/1-1 J2	367,99	450,00	39,96	39,95	0,512	97,9	4.597	10.823	7.343	1,47
4/1-3 J1	351,01	450,00	40,00	40,07	0,487	93,7	4.803	11.225	8.059	1,39
4/1-3 J2	365,26	450,00	40,12	39,88	0,507	91,6	4.913	12.244	9.237	1,33
4/2-1 J1	371,92	450,00	39,92	39,99	0,518	91,8	4.902	12.440	9.146	1,36
4/2-1 J2	362,26	450,00	40,00	39,95	0,504	92,6	4.860	11.897	8.611	1,38
4/2-3 J1	358,57	450,00	39,90	40,07	0,498	91,8	4.902	11.976	8.212	1,46
4/2-3 J2	376,51	450,00	40,09	39,75	0,525	88,9	5.062	13.453	10.118	1,33
4/3-1 J1	410,82	450,00	39,98	40,20	0,568	92,8	4.849	13.357	7.102	1,88
4/3-1 J2	380,61	450,00	39,92	39,96	0,530	87,9	5.119	13.896	10.823	1,28
4/3-3 J1	363,12	450,00	39,86	40,03	0,506	88,9	5.062	12.958	8.756	1,48
4/3-3 J2	368,64	450,00	39,91	39,88	0,515	95,3	4.722	11.476	6.776	1,69
4/4-1 J1	361,22	450,00	39,96	39,94	0,503	85,5	5.263	13.932	10.249	1,36
4/4-1 J2	375,52	450,00	40,01	39,91	0,523	87,1	5.166	13.950	10.464	1,33
4/4-3 J1	395,08	450,00	39,84	39,93	0,552	89,4	5.034	13.983	9.924	1,41
4/4-3 J2	405,55	450,00	39,86	39,97	0,566	96,1	4.683	12.403	7.164	1,73

5/1-1 J1	353,64	450,00	39,94	39,98	0,492	91,4	4,923	11.930	8,550	1,40
5/1-1 J2	378,15	450,00	39,96	39,85	0,528	89,8	5,011	13.252	9,012	1,47
5/1-3 J1	381,33	450,00	39,92	39,73	0,534	83,7	5,376	15.444	12.139	1,27
5/1-3 J2	377,52	450,00	39,90	39,80	0,528	90,1	4,994	13.178	11.552	1,14
5/2-1 J1	330,40	450,00	40,02	39,88	0,460	86,9	5,178	12.336	9,426	1,31
5/2-1 J2	338,38	450,00	40,00	39,92	0,471	83,7	5,376	13.612	10.824	1,26
5/2-3 J1	374,59	450,00	40,12	39,83	0,521	97,6	4,611	11.074	7,719	1,43
5/2-3 J2	410,83	450,00	39,93	39,97	0,572	100,8	4,464	11.400	6,722	1,70
5/3-1 J1	344,77	450,00	38,89	39,93	0,493	83,3	5,402	14.398	11.082	1,30
5/3-1 J2	339,84	450,00	39,94	39,93	0,474	85,1	5,288	13.241	10.344	1,28
5/3-3 J1	374,55	450,00	39,76	39,99	0,523	87,4	5,149	13.877	10.396	1,33
5/3-3 J2	370,66	450,00	39,92	39,88	0,517	87,1	5,166	13.810	10.086	1,37
5/4-1 J1	377,64	450,00	39,82	40,00	0,527	95,7	4,702	11.649	7,653	1,52
5/4-1 J2	391,76	450,00	39,94	39,86	0,547	93,2	4,828	12,748	12,720	1,00
5/4-3 J1	377,25	450,00	39,91	39,81	0,528	85,2	5,282	14,719	10,595	1,39
5/4-3 J2	369,80	450,00	39,92	39,86	0,516	83,9	5,364	14,857	10,969	1,35
6/1-1 J1	287,89	450,00	39,85	39,95	0,402	111,6	4,032	6,534	4,694	1,39
6/1-1 J2	309,61	450,00	39,93	39,87	0,432	103,7	4,339	8,138	5,124	1,59
6/1-3 J1	360,36	450,00	40,06	40,05	0,499	113,2	3,975	7,888	4,149	1,90
6/1-3 J2	293,17	450,00	40,09	39,88	0,407	101,4	4,438	8,025	5,718	1,40
6/2-1 J1	351,48	450,00	39,92	39,81	0,491	87,0	5,172	13,149	10,128	1,30
6/2-1 J2	294,60	450,00	39,96	39,87	0,411	96,8	4,649	8,880	6,590	1,35
6/2-3 J1	372,47	450,00	40,00	39,83	0,520	94,6	4,757	11,756	8,095	1,45
6/2-3 J2	345,63	450,00	39,79	39,81	0,485	95,5	4,712	10,766	7,868	1,37
6/3-1 J1	355,06	450,00	39,99	39,82	0,495	89,0	5,056	12,667	8,882	1,43
6/3-1 J2	382,13	450,00	40,00	39,80	0,533	91,0	4,945	13,044	10,051	1,30
6/3-3 J1	357,29	450,00	39,96	39,80	0,499	90,0	5,000	12,481	8,646	1,44
6/3-3 J2	376,98	450,00	39,90	39,97	0,525	94,6	4,757	11,886	7,410	1,60
6/4-1 J1	368,83	450,00	39,94	39,81	0,515	99,5	4,523	10,544	7,429	1,42
6/4-1 J2	337,93	450,00	39,94	39,79	0,473	90,6	4,967	11,657	8,169	1,43
6/4-3 J1	341,33	450,00	39,90	39,86	0,477	95,4	4,717	10,612	8,445	1,26
6/4-3 J2	342,79	450,00	39,89	39,82	0,480	94,4	4,767	10,898	8,768	1,24
Mínimo					0,402		3,731	6,534	3,948	1,66
Máximo					0,619		5,402	15,522	12,720	1,22
Médio					0,504		4,827	11,816	8,418	1,40
D. Padrão					0,036		332	1,827	1,791	1,02
C. V. (%)					7,139		6,89	15,46	21,28	0,73

APÊNDICE V - Resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos utilizando o ultra-som e convencionais destrutivos de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova longitudinais de 12cm de comprimento de madeira adulta de *Pinus taeda* L.

C.P.	Madeira em equilíbrio				Transdutor: 45kHz					
	m _{12%}	dimensões (mm)			Dens.	tempo	Vel.	C _{LL}	E _s	C _{LL} /E _s
	(g)	comp.	altura	largura	(g/cm ³)	(μs)	(m/s)	(MPa)	(MPa)	
1/1-1 A1	123,49	120,00	40,13	39,78	0,645	19,9	6.030	23.441	15.757	1,49
1/1-1 A2	125,18	120,00	40,06	39,87	0,653	19,5	6.154	24.734	16.912	1,46
1/1-3 A1	123,82	120,00	40,11	39,82	0,646	19,4	6.186	24.718	16.793	1,47
1/1-3 A2	121,73	120,00	39,76	40,08	0,637	19,3	6.218	24.609	16.729	1,47
1/2-1 A1	117,25	120,00	39,95	40,00	0,611	19,2	6.250	23.884	17.278	1,38
1/2-1 A2	117,83	120,00	39,87	40,11	0,614	19,1	6.283	24.237	17.215	1,41
1/2-3 A1	117,97	120,00	40,03	40,13	0,612	19,4	6.186	23.415	14.355	1,63
1/2-3 A2	115,39	120,00	40,07	39,92	0,601	19,3	6.218	23.239	15.988	1,45
1/3-1 A1	111,71	120,00	39,86	40,10	0,582	19,4	6.186	22.284	15.724	1,42
1/3-1 A2	113,67	120,00	39,89	40,07	0,593	19,7	6.091	21.989	15.225	1,44
1/3-3 A1	111,50	120,00	39,85	40,01	0,583	19,6	6.122	21.845	14.872	1,47
1/3-3 A2	113,09	120,00	39,88	40,11	0,589	19,6	6.122	22.084	14.100	1,57
1/4-1 A1	99,65	120,00	40,03	39,99	0,519	21,6	5.556	16.011	10.853	1,48
1/4-1 A2	113,76	120,00	40,03	40,09	0,591	20,7	5.797	19.852	12.934	1,53
1/4-3 A1	115,30	120,00	39,83	39,99	0,603	20,1	5.970	21.501	11.904	1,81
1/4-3 A2	107,41	120,00	39,95	40,06	0,559	20,7	5.797	18.796	11.582	1,62
2/1-1 A1	120,71	120,00	39,87	40,04	0,630	19,9	6.030	22.913	14.265	1,61
2/1-1 A2	111,67	120,00	40,03	40,04	0,581	20,7	5.797	19.512	11.971	1,63
2/1-3 A1	119,34	120,00	39,93	39,91	0,624	19,8	6.061	22.922	14.399	1,59
2/1-3 A2	111,94	120,00	39,92	40,05	0,583	20,2	5.941	20.591	12.185	1,69
2/2-1 A1	107,68	120,00	39,95	40,08	0,560	21,5	5.581	17.458	9.394	1,86
2/2-1 A2	108,76	120,00	39,99	39,86	0,569	20,1	5.970	20.266	13.115	1,55
2/2-3 A1	115,59	120,00	40,09	40,10	0,599	19,7	6.091	22.233	12.182	1,83
2/2-3 A2	112,44	120,00	39,92	39,87	0,589	20,0	6.000	21.194	13.158	1,61
2/3-1 A1	116,47	120,00	39,87	40,06	0,608	21,6	5.556	18.756	10.584	1,77
2/3-1 A2	112,52	120,00	40,07	40,09	0,584	20,0	6.000	21.013	12.710	1,65
2/3-3 A1	114,31	120,00	39,92	40,13	0,595	21,3	5.634	18.873	10.060	1,88
2/3-3 A2	105,98	120,00	40,19	40,14	0,547	21,0	5.714	17.876	9.340	1,91
2/4-1 A1	104,90	120,00	40,10	40,01	0,545	21,3	5.634	17.294	10.006	1,73
2/4-1 A2	121,09	120,00	40,09	40,17	0,627	22,8	5.263	17.357	9.628	1,80
2/4-3 A1	108,39	120,00	39,86	40,00	0,567	21,8	5.505	17.166	9.369	1,83
2/4-3 A2	102,29	120,00	39,79	40,03	0,535	24,7	4.858	12.632	6.793	1,86

3/1-1 A1	135,00	120,00	39,97	40,09	0,702	19,4	6.186	26.862	20.112	1,34
3/1-1 A2	137,12	120,00	39,94	40,07	0,714	19,5	6.154	27.039	16.933	1,60
3/1-3 A1	131,93	120,00	39,94	40,09	0,687	19,4	6.186	26.271	21.070	1,25
3/1-3 A2	131,81	120,00	39,90	40,09	0,687	19,3	6.218	26.546	20.113	1,32
3/2-1 A1	136,68	120,00	40,09	40,17	0,707	19,3	6.218	27.342	19.313	1,42
3/2-1 A2	117,49	120,00	39,87	40,00	0,614	19,9	6.030	22.324	15.336	1,46
3/2-3 A1	125,55	120,00	39,84	39,95	0,657	20,1	5.970	23.430	13.494	1,74
3/2-3 A2	106,95	120,00	39,95	39,90	0,559	20,4	5.882	19.347	11.994	1,61
3/3-1 A1	113,75	120,00	39,95	40,28	0,589	20,1	5.970	20.996	13.773	1,52
3/3-1 A2	125,18	120,00	39,95	40,01	0,653	19,8	6.061	23.972	16.011	1,50
3/3-3 A1	117,38	120,00	40,09	39,87	0,612	19,9	6.030	22.253	14.704	1,51
3/3-3 A2	124,51	120,00	39,87	40,03	0,650	19,9	6.030	23.640	17.379	1,36
3/4-1 A1	114,58	120,00	40,09	39,85	0,598	20,5	5.854	20.479	12.725	1,61
3/4-1 A2	115,33	120,00	39,90	39,90	0,604	20,3	5.911	21.095	12.461	1,69
3/4-3 A1	120,80	120,00	39,96	40,13	0,628	20,2	5.941	22.154	13.992	1,58
3/4-3 A2	120,92	120,00	39,94	40,00	0,631	20,0	6.000	22.707	14.819	1,53
4/1-1 A1	123,40	120,00	39,97	39,95	0,644	20,4	5.882	22.284	14.745	1,51
4/1-1 A2	129,99	120,00	39,94	40,00	0,678	20,8	5.769	22.568	12.322	1,83
4/1-3 A1	117,45	120,00	40,08	40,07	0,609	20,5	5.854	20.882	11.843	1,76
4/1-3 A2	122,28	120,00	40,04	40,03	0,636	20,0	6.000	22.887	12.709	1,80
4/2-1 A1	117,43	120,00	39,88	39,94	0,614	21,2	5.660	19.685	13.177	1,49
4/2-1 A2	112,59	120,00	39,88	40,00	0,588	20,9	5.742	19.390	12.681	1,53
4/2-3 A1	109,92	120,00	39,90	39,89	0,576	21,1	5.687	18.615	11.539	1,61
4/2-3 A2	122,54	120,00	39,88	39,84	0,643	19,9	6.030	23.371	14.323	1,63
4/3-1 A1	107,05	120,00	39,95	40,03	0,558	22,2	5.405	16.299	7.374	2,21
4/3-1 A2	119,52	120,00	40,08	40,00	0,621	20,4	5.882	21.497	11.685	1,84
4/3-3 A1	111,60	120,00	39,97	40,00	0,582	26,4	4.545	12.018	7.607	1,58
4/3-3 A2	118,03	120,00	40,02	40,11	0,613	20,1	5.970	21.840	11.491	1,90
4/4-1 A1	100,32	120,00	39,93	39,82	0,526	21,4	5.607	16.533	9.214	1,79
4/4-1 A2	112,48	120,00	39,99	40,13	0,584	21,1	5.687	18.892	10.192	1,85
4/4-3 A1	107,09	120,00	39,89	40,14	0,557	22,2	5.405	16.285	8.322	1,96
4/4-3 A2	106,85	120,00	39,92	39,98	0,558	20,9	5.742	18.392	11.650	1,58

5/1-1 A1	117,47	120,00	39,90	39,98	0,614	19,8	6.061	22.540	18.563	1,21
5/1-1 A2	125,48	120,00	39,94	39,97	0,655	19,9	6.030	23.818	17.029	1,40
5/1-3 A1	124,25	120,00	39,78	40,14	0,648	19,7	6.091	24.060	17.468	1,38
5/1-3 A2	116,98	120,00	39,86	39,88	0,613	19,6	6.122	22.987	16.153	1,42
5/2-1 A1	108,89	120,00	39,93	39,96	0,569	19,9	6.030	20.679	14.309	1,45
5/2-1 A2	111,94	120,00	39,92	40,05	0,583	19,9	6.030	21.216	15.554	1,36
5/2-3 A1	105,13	120,00	39,85	40,11	0,548	22,4	5.357	15.730	10.306	1,53
5/2-3 A2	107,93	120,00	40,00	40,01	0,562	19,6	6.122	21.066	16.193	1,30
5/3-1 A1	108,36	120,00	39,98	39,95	0,565	19,9	6.030	20.558	15.305	1,34
5/3-1 A2	117,02	120,00	39,95	40,05	0,609	19,7	6.091	22.615	16.163	1,40
5/3-3 A1	111,41	120,00	39,94	40,05	0,580	19,7	6.091	21.536	14.172	1,52
5/3-3 A2	102,21	120,00	39,89	40,00	0,534	21,0	5.714	17.431	12.277	1,42
5/4-1 A1	103,90	120,00	40,04	40,01	0,540	20,3	5.911	18.886	12.094	1,56
5/4-1 A2	104,61	120,00	40,08	40,12	0,542	20,3	5.911	18.944	13.439	1,41
5/4-3 A1	98,38	120,00	39,81	40,06	0,514	21,7	5.530	15.720	9.355	1,68
5/4-3 A2	104,20	120,00	39,92	39,91	0,545	21,1	5.687	17.628	11.311	1,56
6/1-1 A1	111,27	120,00	40,17	40,20	0,574	19,8	6.061	21.091	15.409	1,37
6/1-1 A2	113,40	120,00	40,17	40,05	0,587	20,0	6.000	21.146	14.851	1,42
6/1-3 A1	106,69	120,00	39,93	39,96	0,557	20,5	5.854	19.093	13.573	1,41
6/1-3 A2	115,52	120,00	39,98	40,08	0,601	20,1	5.970	21.413	16.249	1,32
6/2-1 A1	109,03	120,00	39,96	39,86	0,570	19,8	6.061	20.952	15.280	1,37
6/2-1 A2	99,13	120,00	39,98	39,94	0,517	21,0	5.714	16.893	12.387	1,36
6/2-3 A1	109,39	120,00	39,92	39,91	0,572	20,5	5.854	19.606	13.031	1,50
6/2-3 A2	97,57	120,00	39,98	40,17	0,506	20,7	5.797	17.014	12.358	1,38
6/3-1 A1	106,97	120,00	39,92	40,11	0,557	21,0	5.714	18.179	13.370	1,36
6/3-1 A2	105,20	120,00	40,06	40,00	0,547	20,3	5.911	19.118	13.936	1,37
6/3-3 A1	108,98	120,00	40,00	39,98	0,568	20,8	5.769	18.902	14.825	1,28
6/3-3 A2	103,53	120,00	39,90	40,05	0,540	22,6	5.310	15.221	5.561	2,74
6/4-1 A1	101,85	120,00	39,99	40,09	0,529	21,4	5.607	16.647	11.051	1,51
6/4-1 A2	100,48	120,00	39,90	40,06	0,524	22,3	5.381	15.169	9.458	1,60
6/4-3 A1	97,89	120,00	40,01	39,88	0,511	22,9	5.240	14.039	9.801	1,43
6/4-3 A2	109,64	120,00	39,78	39,97	0,575	22,0	5.455	17.096	10.767	1,59
Mínimo					0,506		4.545	12.018	5.561	2,16
Máximo					0,714		6.283	27.342	21.070	1,30
Médio					0,593		5.863	20.516	13.376	1,53
D. Padrão					0,046		301	3.158	3.021	1,05
C. V. (%)					7,732		5,14	15,39	22,59	0,68

APÊNDICE VI · Resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos utilizando o ultra-som e convencionais destrutivos de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova longitudinais de 12cm de comprimento de madeira juvenil de *Pinus taeda* L.

C.P.	Madeira em equilíbrio				Transdutor: 45kHz					
	$m_{12\%}$	dimensões (mm)			Dens.	tempo	Vel.	C_{LL}	E_s	C_{LL}/E_s
	(g)	comp.	altura	largura	(g/cm ³)	(μ s)	(m/s)	(MPa)	(MPa)	
1/1-1 J1	91,41	120,00	40,00	40,14	0,474	29,7	4.040	7.745	3.948	1,96
1/1-1 J2	97,25	120,00	40,02	39,92	0,507	32,1	3.738	7.089	4.213	1,68
1/1-3 J1	97,08	120,00	39,99	39,82	0,508	24,7	4.858	11.991	7.203	1,66
1/1-3 J2	108,42	120,00	39,97	39,90	0,567	21,8	5.505	17.166	11.174	1,54
1/2-1 J1	95,36	120,00	40,01	39,75	0,500	22,4	5.357	14.340	8.477	1,69
1/2-1 J2	85,47	120,00	39,89	40,02	0,446	22,5	5.333	12.691	8.062	1,57
1/2-3 J1	87,94	120,00	39,82	39,76	0,463	23,4	5.128	12.173	7.139	1,71
1/2-3 J2	94,84	120,00	40,00	39,97	0,494	20,7	5.797	16.613	9.862	1,68
1/3-1 J1	98,41	120,00	39,81	39,88	0,517	21,6	5.556	15.943	9.600	1,66
1/3-1 J2	94,54	120,00	39,91	39,86	0,495	24,2	4.959	12.177	7.798	1,56
1/3-3 J1	94,82	120,00	39,86	39,77	0,498	22,2	5.405	14.564	8.908	1,63
1/3-3 J2	95,51	120,00	39,93	39,91	0,499	24,2	4.959	12.281	8.269	1,49
1/4-1 J1	98,08	120,00	39,90	39,99	0,512	21,7	5.530	15.665	9.440	1,66
1/4-1 J2	100,72	120,00	39,97	39,98	0,525	25,8	4.651	11.363	6.983	1,63
1/4-3 J1	97,72	120,00	39,90	40,11	0,509	21,8	5.505	15.418	8.924	1,73
1/4-3 J2	105,48	120,00	40,03	39,91	0,550	21,6	5.556	16.982	9.915	1,71
2/1-1 J1	83,59	120,00	39,66	39,84	0,441	23,2	5.172	11.795	7.342	1,61
2/1-1 J2	85,64	120,00	40,14	40,04	0,444	23,4	5.128	11.678	6.568	1,78
2/1-3 J1	87,83	120,00	39,88	40,04	0,458	21,7	5.530	14.017	9.164	1,53
2/1-3 J2	80,26	120,00	39,84	39,83	0,421	22,8	5.263	11.676	6.432	1,82
2/2-1 J1	94,17	120,00	39,97	39,91	0,492	21,4	5.607	15.469	9.727	1,59
2/2-1 J2	86,88	120,00	39,83	39,93	0,455	26,8	4.478	9.127	5.132	1,78
2/2-3 J1	91,79	120,00	40,05	39,79	0,480	21,1	5.687	15.525	10.024	1,55
2/2-3 J2	92,06	120,00	40,02	39,82	0,481	21,5	5.581	14.997	8.947	1,68
2/3-1 J1	92,89	120,00	40,07	39,95	0,484	23,2	5.172	12.937	8.401	1,54
2/3-1 J2	89,46	120,00	39,78	39,88	0,470	23,3	5.150	12.465	7.797	1,60
2/3-3 J1	90,15	120,00	39,93	40,01	0,470	22,3	5.381	13.617	8.084	1,68
2/3-3 J2	93,53	120,00	40,00	39,90	0,488	23,0	5.217	13.294	7.174	1,85
2/4-1 J1	103,96	120,00	39,92	40,00	0,543	21,2	5.660	17.383	9.724	1,79
2/4-1 J2	93,41	120,00	40,03	39,78	0,489	23,3	5.150	12.966	8.438	1,54
2/4-3 J1	92,10	120,00	39,91	38,88	0,495	24,8	4.839	11.581	6.509	1,78
2/4-3 J2	97,34	120,00	39,75	39,83	0,512	21,5	5.581	15.961	9.753	1,64

3/1-1 J1	85,18	120,00	39,87	39,90	0,446	25,2	4.762	10.118	6.188	1,64
3/1-1 J2	85,84	120,00	39,99	39,94	0,448	26,5	4.528	9.184	5.683	1,62
3/1-3 J1	86,22	120,00	40,02	39,92	0,450	23,3	5.150	11.929	7.511	1,59
3/1-3 J2	84,32	120,00	39,88	39,83	0,442	22,7	5.286	12.362	8.317	1,49
3/2-1 J1	89,59	120,00	39,90	39,87	0,469	22,3	5.381	13.590	9.515	1,43
3/2-1 J2	82,03	120,00	40,00	39,90	0,428	22,9	5.240	11.761	7.389	1,59
3/2-3 J1	83,59	120,00	39,95	39,84	0,438	26,5	4.528	8.974	5.404	1,66
3/2-3 J2	88,32	120,00	39,86	39,79	0,464	24,0	5.000	11.601	7.204	1,61
3/3-1 J1	91,43	120,00	39,86	39,94	0,479	23,3	5.150	12.694	7.743	1,64
3/3-1 J2	89,70	120,00	40,01	40,03	0,467	24,2	4.959	11.476	7.320	1,57
3/3-3 J1	88,31	120,00	39,83	40,00	0,462	21,9	5.479	13.869	8.236	1,68
3/3-3 J2	94,91	120,00	39,97	39,74	0,498	22,0	5.455	14.814	10.090	1,47
3/4-1 J1	100,23	120,00	39,89	39,76	0,527	21,3	5.634	16.715	11.184	1,49
3/4-1 J2	96,96	120,00	40,04	39,87	0,506	22,5	5.333	14.397	9.042	1,59
3/4-3 J1	88,82	120,00	39,88	39,96	0,464	22,8	5.263	12.866	8.756	1,47
3/4-3 J2	95,21	120,00	40,04	40,09	0,494	21,8	5.505	14.977	9.930	1,51
4/1-1 J1	99,35	120,00	39,93	40,03	0,518	25,1	4.781	11.839	7.546	1,57
4/1-1 J2	95,29	120,00	39,96	39,95	0,497	24,3	4.938	12.130	7.343	1,65
4/1-3 J1	91,09	120,00	40,00	40,07	0,474	23,2	5.172	12.671	8.059	1,57
4/1-3 J2	93,22	120,00	40,12	39,88	0,486	21,9	5.479	14.578	9.237	1,58
4/2-1 J1	97,18	120,00	39,92	39,99	0,507	23,7	5.063	13.005	9.146	1,42
4/2-1 J2	94,77	120,00	40,00	39,95	0,494	22,6	5.310	13.933	8.611	1,62
4/2-3 J1	93,39	120,00	39,90	40,07	0,487	24,2	4.959	11.969	8.212	1,46
4/2-3 J2	98,94	120,00	40,09	39,75	0,517	21,7	5.530	15.822	10.118	1,56
4/3-1 J1	98,91	120,00	39,98	40,20	0,513	24,5	4.898	12.303	7.102	1,73
4/3-1 J2	102,03	120,00	39,92	39,96	0,533	21,7	5.530	16.299	10.823	1,51
4/3-3 J1	94,99	120,00	39,86	40,03	0,496	22,0	5.455	14.760	8.756	1,69
4/3-3 J2	94,97	120,00	39,91	39,88	0,497	23,3	5.150	13.189	6.776	1,95
4/4-1 J1	95,37	120,00	39,96	39,94	0,498	21,6	5.556	15.369	10.249	1,50
4/4-1 J2	98,04	120,00	40,01	39,91	0,512	22,0	5.455	15.223	10.464	1,45
4/4-3 J1	98,57	120,00	39,84	39,93	0,516	22,2	5.405	15.087	9.924	1,52
4/4-3 J2	104,24	120,00	39,86	39,97	0,545	24,0	5.000	13.631	7.164	1,90

5/1-1 J1	90,65	120,00	39,94	39,98	0,473	22,3	5.381	13.699	8.550	1,60
5/1-1 J2	88,44	120,00	39,96	39,85	0,463	22,8	5.263	12.821	9.012	1,42
5/1-3 J1	95,20	120,00	39,92	39,73	0,500	21,1	5.687	16.179	12.139	1,33
5/1-3 J2	94,66	120,00	39,90	39,80	0,497	20,8	5.769	16.534	11.552	1,43
5/2-1 J1	88,03	120,00	40,02	39,88	0,460	22,1	5.430	13.552	9.426	1,44
5/2-1 J2	89,00	120,00	40,00	39,92	0,464	20,7	5.797	15.609	10.824	1,44
5/2-3 J1	83,44	120,00	40,12	39,83	0,435	23,5	5.106	11.346	7.719	1,47
5/2-3 J2	86,87	120,00	39,93	39,97	0,454	23,6	5.085	11.727	6.722	1,74
5/3-1 J1	92,44	120,00	38,89	39,93	0,496	21,0	5.714	16.198	11.082	1,46
5/3-1 J2	90,14	120,00	39,94	39,93	0,471	21,2	5.660	15.091	10.344	1,46
5/3-3 J1	89,05	120,00	39,76	39,99	0,467	21	5.714	15.240	10.396	1,47
5/3-3 J2	88,44	120,00	39,92	39,88	0,463	21,4	5.607	14.556	10.086	1,44
5/4-1 J1	89,52	120,00	39,82	40,00	0,468	23,7	5.063	12.007	7.653	1,57
5/4-1 J2	95,68	120,00	39,94	39,86	0,501	20,9	5.742	16.511	12.720	1,30
5/4-3 J1	91,62	120,00	39,91	39,81	0,481	22,2	5.405	14.041	10.595	1,33
5/4-3 J2	93,68	120,00	39,92	39,86	0,491	21,6	5.556	15.142	10.969	1,38
6/1-1 J1	74,89	120,00	39,85	39,95	0,392	28,7	4.181	6.853	4.694	1,46
6/1-1 J2	78,89	120,00	39,93	39,87	0,413	27,1	4.428	8.097	5.124	1,58
6/1-3 J1	81,23	120,00	40,06	40,05	0,422	29,4	4.082	7.029	4.149	1,69
6/1-3 J2	74,09	120,00	40,09	39,88	0,386	25,5	4.706	8.552	5.718	1,50
6/2-1 J1	87,65	120,00	39,92	39,81	0,460	22,3	5.381	13.309	10.128	1,31
6/2-1 J2	77,04	120,00	39,96	39,87	0,403	24,4	4.918	9.746	6.590	1,48
6/2-3 J1	87,09	120,00	40,00	39,83	0,456	23,9	5.021	11.484	8.095	1,42
6/2-3 J2	80,13	120,00	39,79	39,81	0,422	24,2	4.959	10.365	7.868	1,32
6/3-1 J1	91,43	120,00	39,99	39,82	0,478	23,6	5.085	12.371	8.882	1,39
6/3-1 J2	91,66	120,00	40,00	39,80	0,480	22,4	5.357	13.770	10.051	1,37
6/3-3 J1	86,76	120,00	39,96	39,80	0,455	22,5	5.333	12.931	8.646	1,50
6/3-3 J2	91,38	120,00	39,90	39,97	0,477	24,6	4.878	11.362	7.410	1,53
6/4-1 J1	85,89	120,00	39,94	39,81	0,450	24,1	4.979	11.161	7.429	1,50
6/4-1 J2	86,96	120,00	39,94	39,79	0,456	22,2	5.405	13.323	8.169	1,63
6/4-3 J1	81,42	120,00	39,90	39,86	0,427	23,1	5.195	11.513	8.445	1,36
6/4-3 J2	82,87	120,00	39,89	39,82	0,435	23,0	5.217	11.835	8.768	1,35
Mínimo					0,386		3.738	6.853	3.948	1,74
Máximo					0,567		5.797	17.383	12.720	1,37
Médio					0,478		5.207	13.081	8.418	1,55
D. Padrão					0,034		403	2.398	1.791	1,34
C. V. (%)					7,169		7,75	18,33	21,28	0,86

APÊNDICE VII · Resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos utilizando o ultra-som e convencionais destrutivos de compressão normal às fibras em corpos-de-prova radiais de 10cm de comprimento da madeira de *Pinus taeda* L.

C.P.	Madeira em equilíbrio				Transdutor: 45kHz					
	m _{12%}	dimensões (mm)		área	Dens.	tempo	Vel.	C _{RR}	E _s	C _{RR} /E _s
	(g)	comp.	diâmetro	(cm ²)	(g/cm ³)	(μs)	(m/s)	(MPa)	(MPa)	
1/1-3 R1	127,52	100,00	49,93	19,58	0,651	43,9	2.278	3.379	1.018	3,32
1/1-3 R2	131,91	100,00	49,42	19,18	0,688	44,2	2.262	3.520	1.157	3,04
1/1-5 R1	125,65	100,00	49,25	19,05	0,660	43,2	2.315	3.534	1.001	3,53
1/1-5 R2	120,97	100,00	49,64	19,35	0,625	41,0	2.439	3.718	1.154	3,22
1/1-7 R1	130,27	100,00	49,47	19,22	0,678	41,1	2.433	4.012	1.298	3,09
1/1-9 R2	126,92	100,00	49,99	19,63	0,647	44,3	2.257	3.295	1.194	2,76
1/2-3 R1	107,30	100,00	49,61	19,33	0,555	46,6	2.146	2.556	599	4,27
1/2-3 R2	105,36	100,00	49,51	19,25	0,547	46,5	2.151	2.531	636	3,98
1/2-5 R1	98,77	100,00	49,10	18,93	0,522	46,7	2.141	2.392	648	3,69
1/2-5 R2	107,04	100,00	49,21	19,02	0,563	45,0	2.222	2.779	781	3,56
1/2-7 R1	110,26	100,00	49,99	19,63	0,562	47,3	2.114	2.511	808	3,11
1/2-7 R2	101,69	100,00	49,28	19,07	0,533	44,9	2.227	2.645	785	3,37
1/3-3 R1	105,05	100,00	49,68	19,38	0,542	45,6	2.193	2.606	847	3,08
1/3-3 R2	104,77	100,00	49,64	19,35	0,541	45,2	2.212	2.650	823	3,22
1/3-5 R1	108,05	100,00	49,10	18,93	0,571	44,1	2.268	2.934	891	3,29
1/3-5 R2	114,21	100,00	49,14	18,97	0,602	45,5	2.198	2.909	1.072	2,71
1/3-7 R1	104,55	100,00	49,58	19,31	0,542	45,7	2.188	2.593	504	5,15
1/4-1 R1	107,02	100,00	49,44	19,20	0,557	44,1	2.268	2.866	969	2,96
1/4-1 R2	107,67	100,00	49,72	19,42	0,555	44,6	2.242	2.788	785	3,55
1/4-5 R1	112,10	100,00	49,73	19,42	0,577	40,3	2.481	3.554	1.039	3,42
1/4-5 R2	106,15	100,00	49,70	19,40	0,547	45,3	2.208	2.666	1.026	2,60
1/4-7 R2	104,95	100,00	49,86	19,53	0,538	45,5	2.198	2.596	873	2,97
1/4-9 R1	114,82	100,00	49,58	19,31	0,595	45,3	2.208	2.898	947	3,06
2/1-1 R1	122,44	100,00	49,27	19,07	0,642	44,0	2.273	3.317	1.187	2,79
2/1-3 R2	116,55	100,00	49,47	19,22	0,606	41,6	2.404	3.504	1.117	3,14
2/1-5 R2	118,47	100,00	49,48	19,23	0,616	46,9	2.132	2.801	1.017	2,75
2/1-9 R1	114,41	100,00	49,86	19,53	0,586	46,5	2.151	2.710	932	2,91
2/1-9 R2	117,60	100,00	49,63	19,35	0,608	45,7	2.188	2.911	941	3,09
2/2-1 R2	106,04	100,00	50,07	19,69	0,539	46,8	2.137	2.459	760	3,23
2/2-3 R2	106,70	100,00	49,74	19,43	0,549	47,3	2.114	2.454	885	2,77
2/2-5 R1	102,25	100,00	49,03	18,88	0,542	46,7	2.141	2.483	878	2,83
2/2-5 R2	104,04	100,00	49,70	19,40	0,536	46,8	2.137	2.449	840	2,92
2/2-7 R2	107,12	100,00	49,52	19,26	0,556	46,1	2.169	2.617	922	2,84
2/2-9 R1	104,19	100,00	49,43	19,19	0,543	46,5	2.151	2.511	811	3,10
2/3-1 R1	115,69	100,00	49,50	19,24	0,601	43,0	2.326	3.251	750	4,33
2/3-3 R1	98,82	100,00	48,68	18,61	0,531	52,0	1.923	1.964	216	9,11
2/3-5 R1	107,55	100,00	49,50	19,24	0,559	46,7	2.141	2.563	761	3,37
2/3-5 R2	103,14	100,00	49,38	19,15	0,539	46,1	2.169	2.534	791	3,20
2/3-7 R2	103,08	100,00	49,47	19,22	0,536	45,2	2.212	2.625	902	2,91
2/3-9 R1	115,66	100,00	49,52	19,26	0,601	44,2	2.262	3.074	982	3,13
2/4-1 R1	113,65	100,00	49,74	19,43	0,585	43,5	2.299	3.091	554	5,58
2/4-3 R2	108,69	100,00	49,46	19,21	0,566	43,0	2.326	3.060	982	3,12
2/4-5 R1	105,71	100,00	49,91	19,56	0,540	45,0	2.222	2.668	727	3,67
2/4-7 R1	106,33	100,00	49,55	19,28	0,551	46,9	2.132	2.507	555	4,52
2/4-9 R1	121,98	100,00	49,58	19,31	0,632	40,5	2.469	3.852	671	5,74
2/4-9 R2	120,93	100,00	49,93	19,58	0,618	41,6	2.404	3.569	645	5,53

3/1-1 R1	133,07	100,00	49,86	19,53	0,682	42,5	2.353	3.773	1.461	2,58
3/1-1 R2	137,09	100,00	50,02	19,65	0,698	42,6	2.347	3.844	1.550	2,48
3/1-3 R1	150,14	100,00	49,17	18,99	0,791	41,5	2.410	4.591	1.572	2,92
3/1-3 R2	128,25	100,00	49,64	19,35	0,663	42,4	2.358	3.686	1.277	2,89
3/1-7 R2	133,54	100,00	49,79	19,47	0,686	45,0	2.222	3.387	1.280	2,65
3/2-1 R1	115,80	100,00	49,60	19,32	0,599	44,4	2.252	3.040	885	3,44
3/2-3 R1	111,64	100,00	49,93	19,58	0,570	46,0	2.174	2.695	900	3,00
3/2-3 R2	109,07	100,00	50,28	19,86	0,549	46,2	2.165	2.574	728	3,53
3/2-5 R2	112,23	100,00	49,56	19,29	0,582	47,3	2.114	2.600	738	3,52
3/2-7 R1	108,74	100,00	49,87	19,53	0,557	46,0	2.174	2.631	854	3,08
3/2-9 R1	116,03	100,00	49,87	19,53	0,594	47,8	2.092	2.600	596	4,36
3/3-3 R1	104,66	100,00	49,57	19,30	0,542	45,5	2.198	2.620	740	3,54
3/3-3 R2	115,67	100,00	49,88	19,54	0,592	46,8	2.137	2.703	796	3,40
3/3-7 R1	104,35	100,00	49,48	19,23	0,543	47,5	2.105	2.405	1.176	2,04
3/3-7 R2	116,77	100,00	49,76	19,45	0,600	47,2	2.119	2.695	731	3,69
3/3-9 R1	116,44	100,00	49,98	19,62	0,593	46,6	2.146	2.733	747	3,66
3/3-9 R2	107,00	100,00	49,81	19,49	0,549	47,8	2.092	2.403	644	3,73
3/4-1 R1	116,98	100,00	49,74	19,43	0,602	46,9	2.132	2.737	765	3,58
3/4-3 R2	132,74	100,00	50,02	19,65	0,675	42,2	2.370	3.793	1.186	3,20
3/4-5 R1	134,13	100,00	49,96	19,60	0,684	44,9	2.227	3.394	1.123	3,02
3/4-5 R2	128,26	100,00	49,80	19,48	0,658	44,4	2.252	3.340	1.236	2,70
3/4-7 R1	115,54	100,00	49,56	19,29	0,599	45,7	2.188	2.868	717	4,00
3/4-7 R2	119,91	100,00	49,92	19,57	0,613	46,8	2.137	2.797	849	3,29
4/1-1 R2	120,68	100,00	50,16	19,76	0,611	41,2	2.427	3.598	902	3,99
4/1-3 R1	123,29	100,00	48,26	18,29	0,674	41,9	2.387	3.839	1.465	2,62
4/1-7 R1	112,89	100,00	48,44	18,43	0,613	43,8	2.283	3.193	1.136	2,81
4/1-7 R2	123,15	100,00	49,79	19,47	0,632	43,8	2.283	3.297	1.136	2,90
4/1-9 R1	116,05	100,00	49,46	19,21	0,604	43,5	2.299	3.192	1.139	2,80
4/1-9 R2	124,07	100,00	49,68	19,38	0,640	44,2	2.262	3.276	1.182	2,77
4/2-3 R1	106,30	100,00	49,33	19,11	0,556	45,6	2.193	2.675	868	3,08
4/2-3 R2	100,71	100,00	49,36	19,14	0,526	47,2	2.119	2.362	551	4,28
4/2-5 R1	111,72	100,00	49,75	19,44	0,575	47,6	2.101	2.537	789	3,22
4/2-7 R1	108,80	100,00	49,65	19,36	0,562	46,9	2.132	2.555	856	2,99
4/2-7 R2	101,82	100,00	49,53	19,27	0,528	47,5	2.105	2.342	743	3,15
4/3-3 R1	109,92	100,00	49,11	18,94	0,580	47,4	2.110	2.583	906	2,85
4/3-3 R2	99,66	100,00	49,43	19,19	0,519	46,8	2.137	2.371	611	3,88
4/3-5 R1	97,99	100,00	49,53	19,27	0,509	46,7	2.141	2.332	627	3,72
4/3-5 R2	107,08	100,00	49,67	19,38	0,553	46,5	2.151	2.556	695	3,68
4/3-7 R1	109,20	100,00	49,86	19,53	0,559	47,7	2.096	2.458	738	3,33
4/3-7 R2	102,56	100,00	49,06	18,90	0,543	47,5	2.105	2.405	709	3,39
4/4-3 R2	103,03	100,00	49,72	19,42	0,531	46,7	2.141	2.433	695	3,50
4/4-5 R1	109,21	100,00	49,60	19,32	0,565	47,0	2.128	2.559	784	3,26
4/4-5 R2	100,52	100,00	49,07	18,91	0,532	46,8	2.137	2.427	690	3,52
4/4-7 R1	101,96	100,00	49,63	19,35	0,527	47,8	2.092	2.307	629	3,67
4/4-9 R2	109,51	100,00	49,57	19,30	0,567	46,0	2.174	2.682	719	3,73

5/1-3 R2	126,10	100,00	50,66	20,16	0,626	46,8	2.137	2.856	874	3,27
5/1-5 R1	131,24	100,00	50,16	19,76	0,664	45,5	2.198	3.208	1.035	3,10
5/1-7 R1	118,63	100,00	49,35	19,13	0,620	45,5	2.198	2.996	983	3,05
5/1-7 R2	127,30	100,00	50,13	19,74	0,645	45,3	2.208	3.143	990	3,18
5/1-9 R1	125,08	100,00	49,88	19,54	0,640	46,9	2.132	2.910	1.015	2,87
5/1-9 R2	117,37	100,00	49,74	19,43	0,604	47,3	2.114	2.700	852	3,17
5/2-1 R2	110,82	100,00	50,02	19,65	0,564	47,5	2.105	2.500	760	3,29
5/2-3 R1	106,68	100,00	49,43	19,19	0,556	48,6	2.058	2.354	635	3,70
5/2-3 R2	104,04	100,00	49,51	19,25	0,540	47,3	2.114	2.415	779	3,10
5/2-5 R1	106,29	100,00	50,24	19,82	0,536	48,3	2.070	2.298	689	3,34
5/2-5 R2	105,75	100,00	50,11	19,72	0,536	48,8	2.049	2.252	672	3,35
5/2-9 R2	104,58	100,00	49,57	19,30	0,542	47,3	2.114	2.422	746	3,25
5/3-3 R1	105,32	100,00	49,83	19,50	0,540	48,3	2.070	2.315	647	3,58
5/3-3 R2	101,65	100,00	50,16	19,76	0,514	48,2	2.075	2.214	709	3,12
5/3-5 R1	102,08	100,00	49,98	19,62	0,520	47,4	2.110	2.316	609	3,80
5/3-7 R1	104,69	100,00	49,71	19,41	0,539	45,6	2.193	2.594	689	3,77
5/3-9 R2	103,70	100,00	50,08	19,70	0,526	47,5	2.105	2.333	633	3,69
5/4-5 R1	107,75	100,00	50,15	19,75	0,545	47,0	2.128	2.469	735	3,36
5/4-7 R2	99,55	100,00	49,57	19,30	0,516	47,6	2.101	2.277	666	3,42
5/4-9 R1	95,90	100,00	49,69	19,39	0,495	47,9	2.088	2.155	686	3,14
5/4-9 R2	106,16	100,00	49,92	19,57	0,542	48,8	2.049	2.278	568	4,01
6/1-3 R2	108,78	100,00	50,04	19,67	0,553	42,7	2.342	3.034	925	3,28
6/1-5 R1	110,60	100,00	49,87	19,53	0,566	43,8	2.283	2.951	854	3,46
6/1-5 R2	107,67	100,00	50,09	19,71	0,546	43,4	2.304	2.901	928	3,13
6/1-7 R1	106,91	100,00	49,95	19,60	0,546	44,4	2.252	2.768	825	3,35
6/1-9 R1	107,07	100,00	50,10	19,71	0,543	44,2	2.262	2.780	883	3,15
6/1-9 R2	114,68	100,00	49,67	19,38	0,592	46,0	2.174	2.797	976	2,87
6/2-3 R1	103,51	100,00	49,67	19,38	0,534	47,0	2.128	2.418	721	3,35
6/2-3 R2	96,98	100,00	49,58	19,31	0,502	46,6	2.146	2.313	697	3,32
6/2-5 R1	100,74	100,00	49,69	19,39	0,519	47,4	2.110	2.312	682	3,39
6/2-5 R2	100,46	100,00	49,43	19,19	0,524	46,8	2.137	2.390	731	3,27
6/2-7 R1	91,81	100,00	49,67	19,38	0,474	45,7	2.188	2.269	680	3,33
6/2-9 R1	106,68	100,00	49,86	19,53	0,546	41,9	2.387	3.112	866	3,59
6/3-1 R2	92,98	100,00	49,50	19,24	0,483	46,9	2.132	2.197	617	3,56
6/3-3 R1	105,34	100,00	50,14	19,75	0,534	45,6	2.193	2.566	657	3,91
6/3-3 R2	132,60	100,00	50,06	19,68	0,674	40,8	2.451	4.047	1.128	3,59
6/3-7 R2	104,81	100,00	49,77	19,45	0,539	44,2	2.262	2.758	818	3,37
6/3-9 R1	109,69	100,00	49,68	19,38	0,566	46,1	2.169	2.663	861	3,09
6/3-9 R2	104,85	100,00	49,79	19,47	0,539	46,9	2.132	2.448	1.137	2,15
6/4-3 R1	107,64	100,00	49,90	19,56	0,550	43,9	2.278	2.856	838	3,41
6/4-3 R2	107,97	100,00	50,14	19,75	0,547	46,5	2.151	2.529	897	2,82
6/4-5 R1	102,70	100,00	49,53	19,27	0,533	46,1	2.169	2.508	691	3,63
6/4-5 R2	96,76	100,00	50,07	19,69	0,491	45,5	2.198	2.374	644	3,68
6/4-7 R2	99,71	100,00	49,83	19,50	0,511	46,8	2.137	2.334	627	3,72
Mínimo					0,474		1.923	1.964	216	2,04
Máximo					0,791		2.481	4.591	1.572	9,11
Médio					0,574		2.198	2.793	855	3,39
D. Padrão					0,053		101	474	221	0,75
C. V. (%)					9,19		4,62	16,99	25,88	22,1

APÊNDICE VIII · Resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos utilizando o ultra-som e convencionais destrutivos de compressão normal às fibras em corpos-de-prova tangenciais de 10cm de comprimento da madeira adulta de *Pinus taeda* L.

C.P.	Madeira em equilíbrio				Transdutor: 45kHz					
	m _{12%} (g)	dimensões (mm) comp.	diâmetro	área (cm ²)	Dens. (g/cm ³)	tempo (μs)	Vel. (m/s)	E _d (MPa)	E _s (MPa)	Ed/I
1/1-3 TA2	119,61	100,00	50,64	20,14	0,594	52,4	1.908	2.163	596	3,6
1/1-5 TA1	136,83	100,00	50,27	19,85	0,689	54,3	1.842	2.338	672	3,4
1/1-5 TA2	134,96	100,00	50,28	19,86	0,680	55,6	1.799	2.199	939	2,3
1/1-7 TA1	138,96	100,00	50,55	20,07	0,692	54,9	1.821	2.297	692	3,3
1/1-9 TA1	132,29	100,00	50,41	19,96	0,663	57,4	1.742	2.012	558	3,6
1/1-9 TA2	131,05	100,00	50,39	19,94	0,657	56,7	1.764	2.044	553	3,6
1/2-3 TA1	118,72	100,00	50,54	20,06	0,592	58,0	1.724	1.759	546	3,2
1/2-5 TA1	138,54	100,00	50,65	20,15	0,688	56,6	1.767	2.146	658	3,2
1/2-7 TA1	131,34	100,00	50,34	19,90	0,660	57,8	1.730	1.975	619	3,1
1/2-7 TA2	120,51	100,00	50,48	20,01	0,602	57,9	1.727	1.796	606	2,9
1/2-9 TA1	119,89	100,00	50,31	19,88	0,603	59,0	1.695	1.733	421	4,1
1/2-9 TA2	119,96	100,00	50,28	19,86	0,604	58,2	1.718	1.784	581	3,0
1/3-3 TA2	119,14	100,00	50,31	19,88	0,599	58,1	1.721	1.775	711	2,5
1/3-5 TA1	116,06	100,00	49,94	19,59	0,593	57,5	1.739	1.792	680	2,6
1/3-5 TA2	111,90	100,00	50,10	19,71	0,568	58,7	1.704	1.647	610	2,7
1/3-7 TA1	117,41	100,00	50,42	19,97	0,588	60,9	1.642	1.586	580	2,7
1/3-7 TA2	128,66	100,00	50,30	19,87	0,647	55,7	1.795	2.087	629	3,3
1/3-9 TA1	117,02	100,00	50,29	19,86	0,589	66,4	1.506	1.336	424	3,1
1/4-1 TA1	112,22	100,00	50,13	19,74	0,569	57,5	1.739	1.720	575	2,9
1/4-1 TA2	118,67	100,00	50,16	19,76	0,601	56,9	1.757	1.855	717	2,5
1/4-3 TA2	116,41	100,00	50,30	19,87	0,586	56,4	1.773	1.842	564	3,2
1/4-5 TA1	118,74	100,00	50,11	19,72	0,602	56,8	1.761	1.866	720	2,5
1/4-7 TA1	107,93	100,00	50,22	19,81	0,545	55,4	1.805	1.775	427	4,1
1/4-7 TA2	116,38	100,00	50,13	19,74	0,590	58,6	1.706	1.717	775	2,2
2/1-1 TA2	133,27	100,00	50,58	20,09	0,663	60,2	1.661	1.830	687	2,6
2/1-3 TA1	129,19	100,00	50,51	20,04	0,645	57,0	1.754	1.984	727	2,7
2/1-3 TA2	131,04	100,00	50,41	19,96	0,657	54,6	1.832	2.202	928	2,3
2/1-5 TA2	123,60	100,00	50,57	20,09	0,615	57,8	1.730	1.842	590	3,1
2/1-9 TA1	121,10	100,00	50,41	19,96	0,607	59,2	1.689	1.731	560	3,0
2/2-1 TA2	107,50	100,00	50,25	19,83	0,542	67,7	1.477	1.183	525	2,2
2/2-3 TA2	107,37	100,00	50,34	19,90	0,539	59,1	1.692	1.545	579	2,6
2/2-5 TA1	105,95	100,00	49,91	19,56	0,542	57,5	1.739	1.638	547	3,0
2/2-7 TA1	112,31	100,00	50,42	19,97	0,563	58,0	1.724	1.672	562	2,9
2/2-7 TA2	110,87	100,00	50,36	19,92	0,557	56,4	1.773	1.750	732	2,3
2/2-9 TA1	106,94	100,00	50,00	19,63	0,545	58,4	1.712	1.597	419	3,8
2/3-1 TA2	118,21	100,00	50,37	19,93	0,593	61,9	1.616	1.548	343	4,5
2/3-3 TA1	108,75	100,00	50,34	19,90	0,546	58,5	1.709	1.597	570	2,8
2/3-3 TA2	117,05	100,00	51,40	20,75	0,564	56,8	1.761	1.748	547	3,2
2/3-5 TA1	106,53	100,00	50,37	19,93	0,535	58,0	1.724	1.589	442	3,5
2/3-5 TA2	115,91	100,00	50,50	20,03	0,579	55,9	1.789	1.852	504	3,6
2/4-1 TA1	109,93	100,00	50,16	19,76	0,556	57,2	1.748	1.700	274	6,2
2/4-3 TA1	116,10	100,00	50,18	19,78	0,587	54,9	1.821	1.948	654	2,9
2/4-3 TA2	113,27	100,00	50,43	19,97	0,567	52,9	1.890	2.026	572	3,5
2/4-5 TA1	112,42	100,00	50,28	19,86	0,566	53,3	1.876	1.993	513	3,8
2/4-7 TA1	105,05	100,00	49,90	19,56	0,537	57,5	1.739	1.625	423	3,8
2/4-7 TA2	115,28	100,00	50,21	19,80	0,582	54,5	1.835	1.960	651	3,0

3/1-1 TA1	164,08	100,00	50,39	19,94	0,823	66,4	1.506	1.866	726	2,5
3/1-1 TA2	151,83	100,00	50,33	19,89	0,763	63,7	1.570	1.881	664	2,8
3/1-3 TA1	158,41	100,00	50,39	19,94	0,794	61,1	1.637	2.128	698	3,0
3/1-3 TA2	157,97	100,00	50,26	19,84	0,796	60,2	1.661	2.197	681	3,2
3/1-7 TA2	147,00	100,00	50,48	20,01	0,734	61,6	1.623	1.936	625	3,1
3/2-3 TA1	131,56	100,00	50,32	19,89	0,662	61,2	1.634	1.766	498	3,5
3/2-3 TA2	130,18	100,00	50,35	19,91	0,654	60,4	1.656	1.792	477	3,7
3/2-5 TA1	132,44	100,00	50,01	19,64	0,674	60,8	1.645	1.824	612	2,9
3/2-5 TA2	131,28	100,00	50,50	20,03	0,655	62,2	1.608	1.694	602	2,8
3/2-7 TA1	130,39	100,00	50,56	20,08	0,649	59,5	1.681	1.834	544	3,3
3/3-1 TA1	136,25	100,00	50,28	19,86	0,686	59,5	1.681	1.938	1.240	1,5
3/3-3 TA1	133,10	100,00	50,43	19,97	0,666	60,9	1.642	1.797	733	2,4
3/3-3 TA2	128,66	100,00	50,24	19,82	0,649	60,0	1.667	1.803	738	2,4
3/3-5 TA1	134,60	100,00	50,43	19,97	0,674	62,9	1.590	1.703	1.042	1,6
3/3-7 TA1	131,04	100,00	50,31	19,88	0,659	61,6	1.623	1.737	532	3,2
3/3-7 TA2	114,97	100,00	50,44	19,98	0,575	63,0	1.587	1.450	386	3,7
3/4-1 TA1	123,85	100,00	50,36	19,92	0,622	63,5	1.575	1.542	717	2,1
3/4-1 TA2	117,37	100,00	50,19	19,78	0,593	61,3	1.631	1.579	552	2,8
3/4-3 TA1	119,23	100,00	50,39	19,94	0,598	62,1	1.610	1.550	491	3,1
3/4-5 TA1	118,04	100,00	50,40	19,95	0,592	61,2	1.634	1.580	930	1,7
3/4-5 TA2	148,61	100,00	50,05	19,67	0,755	61,7	1.621	1.984	1.441	1,3
3/4-7 TA2	122,15	100,00	50,07	19,69	0,620	59,6	1.678	1.746	525	3,3
4/1-1 TA1	150,50	100,00	50,43	19,97	0,753	97,7	1.024	789	1.026	0,7
4/1-3 TA2	146,92	100,00	50,40	19,95	0,736	54,6	1.832	2.470	808	3,0
4/1-5 TA2	149,03	100,00	50,32	19,89	0,749	59,6	1.678	2.110	947	2,2
4/1-7 TA2	141,00	100,00	50,19	19,78	0,713	54,4	1.838	2.408	788	3,0
4/1-9 TA1	132,81	100,00	50,44	19,98	0,665	54,7	1.828	2.221	935	2,3
4/1-9 TA2	135,89	100,00	50,38	19,93	0,682	52,6	1.901	2.464	698	3,5
4/2-3 TA1	128,66	100,00	50,29	19,86	0,648	53,4	1.873	2.271	752	3,0
4/2-3 TA2	123,98	100,00	50,59	20,10	0,617	56,8	1.761	1.912	567	3,3
4/2-5 TA1	113,36	100,00	50,25	19,83	0,572	58,0	1.724	1.699	397	4,2
4/2-5 TA2	126,10	100,00	50,44	19,98	0,631	54,8	1.825	2.101	766	2,7
4/2-7 TA1	122,70	100,00	50,39	19,94	0,615	53,3	1.876	2.166	627	3,4
4/2-7 TA2	127,32	100,00	50,00	19,63	0,648	54,4	1.838	2.191	718	3,0
4/3-3 TA1	125,32	100,00	50,28	19,86	0,631	53,3	1.876	2.222	950	2,3
4/3-5 TA1	121,54	100,00	50,47	20,01	0,608	54,8	1.825	2.023	559	3,6
4/3-5 TA2	117,87	100,00	50,48	20,01	0,589	57,7	1.733	1.769	386	4,5
4/3-7 TA1	116,09	100,00	50,51	20,04	0,579	55,9	1.789	1.854	727	2,5
4/3-7 TA2	116,74	100,00	50,50	20,03	0,583	56,7	1.764	1.813	474	3,8
4/3-9 TA1	115,54	100,00	50,02	19,65	0,588	62,1	1.610	1.525	815	1,8
4/4-5 TA1	107,66	100,00	50,48	20,01	0,538	54,6	1.832	1.804	480	3,7
4/4-5 TA2	122,57	100,00	50,27	19,85	0,618	58,4	1.712	1.811	400	4,5
4/4-7 TA1	114,66	100,00	50,29	19,86	0,577	54,3	1.842	1.958	530	3,7
4/4-7 TA2	114,17	100,00	50,36	19,92	0,573	56,6	1.767	1.789	451	3,9
4/4-9 TA1	115,71	100,00	50,33	19,89	0,582	57,3	1.745	1.771	506	3,5
4/4-9 TA2	118,92	100,00	50,17	19,77	0,602	56,5	1.770	1.884	810	2,3

5/1-3 TA1	140,52	100,00	50,14	19,75	0,712	55,9	1.789	2.277	740	3,06
5/1-3 TA2	139,18	100,00	50,07	19,69	0,707	56,2	1.779	2.238	708	3,11
5/1-5 TA2	138,45	100,00	50,30	19,87	0,697	56,2	1.779	2.206	1.274	1,77
5/1-7 TA1	133,41	100,00	50,34	19,90	0,670	56,6	1.767	2.092	757	2,71
5/1-7 TA2	135,89	100,00	50,12	19,73	0,689	56,2	1.779	2.181	869	2,56
5/1-9 TA1	126,55	100,00	50,18	19,78	0,640	54,9	1.821	2.123	733	2,86
5/2-3 TA1	121,91	100,00	49,76	19,45	0,627	59,6	1.678	1.765	431	4,06
5/2-3 TA2	121,43	100,00	50,15	19,75	0,615	55,6	1.799	1.989	596	3,36
5/2-5 TA1	188,24	100,00	50,22	19,81	0,950	56,7	1.764	2.956	580	5,06
5/2-7 TA1	124,41	100,00	50,35	19,91	0,625	57,7	1.733	1.877	605	3,11
5/2-7 TA2	118,13	100,00	50,26	19,84	0,595	55,2	1.812	1.954	759	2,56
5/3-3 TA1	106,54	100,00	50,32	19,89	0,536	57,8	1.730	1.604	552	2,96
5/3-3 TA2	111,08	100,00	50,38	19,93	0,557	58,4	1.712	1.634	762	2,16
5/3-7 TA1	116,26	100,00	50,15	19,75	0,589	57,3	1.745	1.793	681	2,66
5/3-7 TA2	105,87	100,00	50,29	19,86	0,533	58,3	1.715	1.568	392	4,06
5/3-9 TA1	113,01	100,00	50,26	19,84	0,570	65,8	1.520	1.316	701	1,86
5/3-9 TA2	111,35	100,00	50,17	19,77	0,563	58,4	1.712	1.652	414	3,96
5/4-3 TA2	113,21	100,00	50,28	19,86	0,570	56,6	1.767	1.780	569	3,16
5/4-5 TA1	113,81	100,00	50,36	19,92	0,571	56,9	1.757	1.765	1.028	1,76
5/4-5 TA2	107,21	100,00	50,23	19,82	0,541	58,3	1.715	1.592	859	1,86
5/4-7 TA1	109,41	100,00	50,26	19,84	0,551	57,5	1.739	1.668	486	3,46
5/4-7 TA2	110,74	100,00	50,17	19,77	0,560	56,4	1.773	1.761	1.315	1,36
5/4-9 TA1	106,47	100,00	50,18	19,78	0,538	56,7	1.764	1.675	575	2,96
6/1-3 TA1	127,76	100,00	50,31	19,88	0,643	55,8	1.792	2.064	742	2,76
6/1-5 TA1	122,84	100,00	50,25	19,83	0,619	55,1	1.815	2.040	637	3,26
6/1-5 TA2	109,63	100,00	49,92	19,57	0,560	56,8	1.761	1.736	695	2,56
6/1-7 TA1	122,47	100,00	50,33	19,89	0,616	56,0	1.786	1.963	653	3,06
6/1-9 TA1	130,03	100,00	50,30	19,87	0,654	55,6	1.799	2.117	1.014	2,06
6/1-9 TA2	108,12	100,00	49,16	18,98	0,570	57,4	1.742	1.729	1.241	1,36
6/2-3 TA1	97,02	100,00	49,02	18,87	0,514	59,8	1.672	1.438	480	3,06
6/2-3 TA2	110,73	100,00	49,06	18,90	0,586	56,0	1.786	1.868	781	2,36
6/2-5 TA1	104,65	100,00	50,11	19,72	0,531	58,6	1.706	1.545	507	3,06
6/2-5 TA2	120,42	100,00	50,00	19,63	0,613	56,2	1.779	1.942	988	1,96
6/2-7 TA1	114,10	100,00	50,23	19,82	0,576	56,0	1.786	1.836	556	3,36
6/2-7 TA2	106,78	100,00	50,25	19,83	0,538	59,8	1.672	1.506	437	3,46
6/3-3 TA1	102,52	100,00	50,37	19,93	0,514	58,1	1.721	1.524	552	2,76
6/3-5 TA1	119,13	100,00	50,26	19,84	0,600	56,7	1.764	1.868	540	3,46
6/3-7 TA1	118,24	100,00	50,26	19,84	0,596	56,2	1.779	1.887	571	3,36
6/3-7 TA2	104,46	100,00	50,02	19,65	0,532	55,9	1.789	1.701	523	3,26
6/3-9 TA1	115,17	100,00	50,43	19,97	0,577	55,5	1.802	1.872	558	3,36
6/3-9 TA2	117,69	100,00	50,33	19,89	0,592	55,4	1.805	1.927	1.400	1,36
6/4-3 TA1	103,28	100,00	50,31	19,88	0,520	56,7	1.764	1.616	365	4,46
6/4-5 TA1	110,93	100,00	50,11	19,72	0,562	56,4	1.773	1.768	369	4,76
6/4-5 TA2	102,24	100,00	50,38	19,93	0,513	57,7	1.733	1.541	654	2,36
6/4-7 TA1	102,43	100,00	50,12	19,73	0,519	57,2	1.748	1.587	442	3,56
6/4-7 TA2	107,89	100,00	50,35	19,91	0,542	56,5	1.770	1.697	895	1,96
Mínimo					0,513		1.024	789	274	0,77
Máximo					0,950		1.908	2.956	1.441	6,20
Médio					0,614		1.731	1.843	658	3,01
D. Padrão					0,070		102	272	212	0,80
C. V. (%)					11,35		5,90	14,77	32,31	26,66

APÊNDICE IX - Resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos utilizando o ultra-som e convencionais destrutivos de compressão normal às fibras em corpos-de-prova tangenciais de 10cm de comprimento da madeira juvenil de *Pinus taeda* L.

C.P.	Madeira em equilíbrio				Transdutor: 45kHz					
	m _{12%}	dimensões (mm)		área	Dens.	tempo	Vel.	C _{TT}	E _s	C _{TT} /
	(g)	comp.	diâmetro	(cm ²)	(g/cm ³)	(μs)	(m/s)	(MPa)	(MPa)	
1/1-2 TJ2	118,42	100,00	49,99	19,63	0,603	47,2	2.119	2.708	611	4,4
1/1-4 TJ1	104,46	100,00	49,81	19,49	0,536	55,2	1.812	1.759	637	2,7
1/1-4 TJ2	104,02	100,00	50,17	19,77	0,526	51,8	1.931	1.961	460	4,2
1/1-6 TJ1	118,67	100,00	49,97	19,61	0,605	50,6	1.976	2.363	470	5,0
1/1-6 TJ2	109,81	100,00	50,30	19,87	0,553	49,8	2.008	2.228	506	4,4
1/1-8 TJ2	100,75	100,00	49,87	19,53	0,516	53,1	1.883	1.829	535	3,4
1/2-2 TJ1	98,64	100,00	50,47	20,01	0,493	55,8	1.792	1.584	392	4,0
1/2-4 TJ1	91,14	100,00	49,91	19,56	0,466	58,6	1.706	1.357	350	3,8
1/2-4 TJ2	103,84	100,00	50,14	19,75	0,526	53,2	1.880	1.858	397	4,6
1/2-6 TJ1	128,59	100,00	50,14	19,75	0,651	49,1	2.037	2.701	-	-
1/2-8 TJ2	118,71	100,00	50,32	19,89	0,597	54,3	1.842	2.024	341	5,9
1/3-2 TJ1	98,07	100,00	49,36	19,14	0,513	58,2	1.718	1.513	627	2,4
1/3-2 TJ2	97,12	100,00	49,77	19,45	0,499	57,4	1.742	1.515	348	4,3
1/3-4 TJ1	96,16	100,00	49,98	19,62	0,490	57,8	1.730	1.467	336	4,3
1/3-4 TJ2	96,07	100,00	50,02	19,65	0,489	54,4	1.838	1.652	387	4,2
1/3-8 TJ1	95,83	100,00	50,14	19,75	0,485	53,2	1.880	1.715	309	5,5
1/3-8 TJ2	98,37	100,00	49,75	19,44	0,506	59,1	1.692	1.449	335	4,3
1/4-2 TJ1	97,32	100,00	50,16	19,76	0,492	59,4	1.684	1.396	404	3,4
1/4-2 TJ2	100,62	100,00	49,98	19,62	0,513	57,6	1.736	1.546	352	4,3
1/4-4 TJ1	101,40	100,00	49,92	19,57	0,518	58,6	1.706	1.509	402	3,7
1/4-4 TJ2	99,50	100,00	50,11	19,72	0,505	59,7	1.675	1.416	251	5,6
1/4-6 TJ2	95,89	100,00	49,92	19,57	0,490	56,5	1.770	1.535	229	6,7
1/4-8 TJ1	100,13	100,00	50,06	19,68	0,509	56,3	1.776	1.605	317	5,0
2/1-2 TJ1	101,67	100,00	50,39	19,94	0,510	55,0	1.818	1.685	442	3,8
2/1-4 TJ2	98,02	100,00	50,19	19,78	0,495	53,3	1.876	1.744	404	4,3
2/1-6 TJ1	104,89	100,00	50,20	19,79	0,530	57,9	1.727	1.581	554	2,8
2/1-6 TJ2	95,80	100,00	50,02	19,65	0,488	55,3	1.808	1.594	325	4,9
2/1-8 TJ1	93,21	100,00	50,28	19,86	0,469	52,4	1.908	1.710	306	5,5
2/1-8 TJ2	112,79	100,00	50,12	19,73	0,572	56,5	1.770	1.791	552	3,2
2/2-2 TJ1	92,42	100,00	49,95	19,60	0,472	58,4	1.712	1.383	291	4,7
2/2-4 TJ1	91,75	100,00	50,23	19,82	0,463	59,2	1.689	1.321	262	5,0
2/2-4 TJ2	91,04	100,00	50,16	19,76	0,461	58,5	1.709	1.346	270	4,9
2/2-8 TJ1	90,07	100,00	50,19	19,78	0,455	59,1	1.692	1.303	238	5,4
2/2-10 TJ1	92,26	100,00	50,46	20,00	0,461	58,3	1.715	1.357	213	6,3
2/2-10 TJ2	93,99	100,00	50,33	19,89	0,472	56,7	1.764	1.470	255	5,7
2/3-4 TJ1	95,60	100,00	49,89	19,55	0,489	58,8	1.701	1.414	223	6,3
2/3-4 TJ2	106,66	100,00	49,95	19,60	0,544	56,7	1.764	1.693	362	4,6
2/3-6 TJ1	107,28	100,00	50,22	19,81	0,542	56,9	1.757	1.673	319	5,2
2/3-6 TJ2	95,25	100,00	49,92	19,57	0,487	58,6	1.706	1.417	245	5,7
2/3-8 TJ1	105,01	100,00	50,02	19,65	0,534	57,3	1.745	1.628	426	3,8
2/3-8 TJ2	94,59	100,00	50,26	19,84	0,477	56,6	1.767	1.488	250	5,9
2/4-2 TJ2	106,23	100,00	49,87	19,53	0,544	54,4	1.838	1.838	335	5,4
2/4-4 TJ1	110,28	100,00	49,94	19,59	0,563	56,9	1.757	1.739	394	4,4
2/4-6 TJ1	103,68	100,00	50,08	19,70	0,526	56,0	1.786	1.678	301	5,5
2/4-6 TJ2	104,12	100,00	50,24	19,82	0,525	56,8	1.761	1.628	287	5,6
2/4-8 TJ1	103,72	100,00	50,19	19,78	0,524	56,6	1.767	1.636	300	5,4
2/4-8 TJ2	109,07	100,00	50,09	19,71	0,553	55,2	1.812	1.816	400	4,5

3/1-2 TJ2	102,63	100,00	50,18	19,78	0,519	55,7	1.795	1.673	339	4,9
3/1-4 TJ1	104,20	100,00	49,92	19,57	0,532	59,7	1.675	1.494	415	3,6
3/1-4 TJ2	109,64	100,00	50,00	19,63	0,558	59,4	1.684	1.583	437	3,6
3/1-6 TJ1	113,22	100,00	50,06	19,68	0,575	61,4	1.629	1.526	534	2,8
3/1-6 TJ2	93,66	100,00	50,08	19,70	0,475	54,4	1.838	1.607	299	5,3
3/1-8 TJ1	104,02	100,00	50,09	19,71	0,528	61,2	1.634	1.409	307	4,5
3/2-2 TJ1	97,17	100,00	50,18	19,78	0,491	60,3	1.658	1.351	296	4,5
3/2-2 TJ2	91,35	100,00	49,93	19,58	0,467	61,9	1.616	1.218	216	5,6
3/2-4 TJ1	96,09	100,00	49,99	19,63	0,490	61,2	1.634	1.307	249	5,2
3/2-4 TJ2	88,22	100,00	50,04	19,67	0,449	60,4	1.656	1.230	212	5,8
3/2-6 TJ1	92,19	100,00	50,06	19,68	0,468	58,2	1.718	1.383	282	4,9
3/2-8 TJ2	90,36	100,00	50,10	19,71	0,458	59,7	1.675	1.286	214	6,0
3/3-2 TJ2	98,29	100,00	49,89	19,55	0,503	59,4	1.684	1.425	284	5,0
3/3-4 TJ1	98,23	100,00	50,05	19,67	0,499	59,8	1.672	1.396	310	4,5
3/3-4 TJ2	99,23	100,00	50,33	19,89	0,499	61,1	1.637	1.336	328	4,0
3/3-6 TJ1	93,36	100,00	50,19	19,78	0,472	57,9	1.727	1.408	198	7,1
3/3-6 TJ2	109,13	100,00	50,08	19,70	0,554	59,3	1.686	1.575	547	2,8
3/3-10 TJ1	116,57	100,00	50,00	19,63	0,594	76,9	1.300	1.004	182	5,5
3/4-4 TJ1	112,44	100,00	50,10	19,71	0,570	60,3	1.658	1.569	340	4,6
3/4-4 TJ2	99,57	100,00	50,11	19,72	0,505	56,6	1.767	1.576	240	6,5
3/4-6 TJ1	114,00	100,00	49,41	19,17	0,595	59,2	1.689	1.696	401	4,2
3/4-8 TJ1	113,42	100,00	49,97	19,61	0,578	58,4	1.712	1.696	343	4,9
3/4-8 TJ2	102,05	100,00	49,83	19,50	0,523	57,6	1.736	1.577	319	4,9
4/1-2 TJ1	109,19	100,00	50,07	19,69	0,555	52,5	1.905	2.012	571	3,5
4/1-2 TJ2	112,87	100,00	50,20	19,79	0,570	54,2	1.845	1.941	598	3,2
4/1-4 TJ2	104,58	100,00	50,08	19,70	0,531	52,2	1.916	1.948	371	5,2
4/1-6 TJ1	111,40	100,00	50,11	19,72	0,565	54,8	1.825	1.881	453	4,1
4/1-8 TJ1	103,54	100,00	50,12	19,73	0,525	54,8	1.825	1.748	368	4,7
4/1-8 TJ2	110,21	100,00	50,18	19,78	0,557	54,2	1.845	1.897	503	3,7
4/2-4 TJ1	102,92	100,00	50,24	19,82	0,519	56,9	1.757	1.604	356	4,5
4/2-4 TJ2	100,90	100,00	49,83	19,50	0,517	56,5	1.770	1.621	355	4,5
4/2-6 TJ1	101,12	100,00	50,25	19,83	0,510	57,0	1.754	1.569	358	4,3
4/2-6 TJ2	106,24	100,00	50,31	19,88	0,534	56,7	1.764	1.662	369	4,5
4/2-8 TJ1	105,74	100,00	50,43	19,97	0,529	58,9	1.698	1.526	365	4,1
4/2-8 TJ2	101,46	100,00	50,34	19,90	0,510	55,6	1.799	1.649	313	5,2
4/3-2 TJ2	104,76	100,00	50,29	19,86	0,527	62,1	1.610	1.368	322	4,2
4/3-4 TJ1	107,43	100,00	50,23	19,82	0,542	57,6	1.736	1.634	327	5,0
4/3-4 TJ2	102,63	100,00	50,42	19,97	0,514	56,7	1.764	1.599	265	6,0
4/3-6 TJ1	104,63	100,00	50,35	19,91	0,525	56,9	1.757	1.623	314	5,1
4/3-6 TJ2	101,24	100,00	50,41	19,96	0,507	58,7	1.704	1.472	261	5,6
4/3-8 TJ1	102,73	100,00	49,89	19,55	0,526	57,4	1.742	1.595	352	4,5
4/4-2 TJ1	109,29	100,00	50,43	19,97	0,547	57,4	1.742	1.661	320	5,1
4/4-2 TJ2	103,93	100,00	50,00	19,63	0,529	56,3	1.776	1.670	235	7,1
4/4-4 TJ2	110,24	100,00	50,45	19,99	0,551	57,0	1.754	1.697	351	4,8
4/4-6 TJ1	107,72	100,00	50,26	19,84	0,543	56,8	1.761	1.683	283	5,9
4/4-6 TJ2	106,60	100,00	50,25	19,83	0,538	57,6	1.736	1.620	283	5,7
4/4-8 TJ1	107,78	100,00	50,35	19,91	0,541	57,8	1.730	1.620	352	4,6

5/1-2 TJ1	115,54	100,00	50,58	20,09	0,575	52,2	1.916	2.110	480	4,3
5/1-2 TJ2	112,10	100,00	50,24	19,82	0,565	52,3	1.912	2.067	571	3,6
5/1-4 TJ1	116,10	100,00	50,36	19,92	0,583	55,0	1.818	1.927	786	2,4
5/1-4 TJ2	146,80	100,00	50,30	19,87	0,739	47,7	2.096	3.247	567	5,7
5/1-8 TJ1	101,09	100,00	50,26	19,84	0,510	55,3	1.808	1.666	350	4,7
5/1-8 TJ2	101,45	100,00	50,52	20,05	0,506	54,4	1.838	1.710	406	4,2
5/2-2 TJ1	93,61	100,00	50,33	19,89	0,471	58,6	1.706	1.370	260	5,2
5/2-4 TJ1	93,51	100,00	50,19	19,78	0,473	57,6	1.736	1.425	248	5,7
5/2-4 TJ2	93,12	100,00	50,29	19,86	0,469	59,3	1.686	1.333	310	4,3
5/2-6 TJ1	93,59	100,00	50,47	20,01	0,468	58,6	1.706	1.362	245	5,5
5/2-8 TJ1	95,78	100,00	50,21	19,80	0,484	59,5	1.681	1.366	301	4,5
5/2-8 TJ2	95,07	100,00	50,47	20,01	0,475	58,0	1.724	1.413	248	5,7
5/3-2 TJ2	92,36	100,00	50,43	19,97	0,462	64,7	1.546	1.105	249	4,4
5/3-4 TJ1	95,81	100,00	50,44	19,98	0,479	58,1	1.721	1.420	265	5,3
5/3-4 TJ2	90,88	100,00	50,02	19,65	0,462	57,8	1.730	1.384	245	5,6
5/3-6 TJ1	93,59	100,00	50,15	19,75	0,474	59,1	1.692	1.357	218	6,2
5/3-6 TJ2	95,98	100,00	50,11	19,72	0,487	58,1	1.721	1.442	366	3,9
5/3-8 TJ1	92,76	100,00	49,44	19,20	0,483	58,0	1.724	1.436	283	5,0
5/4-2 TJ2	109,15	100,00	50,33	19,89	0,549	56,9	1.757	1.695	461	3,6
5/4-4 TJ1	101,19	100,00	50,43	19,97	0,507	57,9	1.727	1.511	279	5,4
5/4-4 TJ2	104,85	100,00	50,43	19,97	0,525	57,9	1.727	1.566	297	5,2
5/4-6 TJ1	102,43	100,00	50,28	19,86	0,516	58,2	1.718	1.523	287	5,3
5/4-6 TJ2	101,49	100,00	50,44	19,98	0,508	58,4	1.712	1.489	276	5,3
5/4-8 TJ1	104,82	100,00	50,38	19,93	0,526	58,4	1.712	1.542	341	4,5
6/1-2 TJ1	92,80	100,00	50,44	19,98	0,464	52,2	1.916	1.704	1.260	1,3
6/1-4 TJ2	88,33	100,00	50,26	19,84	0,445	54,3	1.842	1.510	286	5,2
6/1-6 TJ2	96,04	100,00	50,28	19,86	0,484	57,6	1.736	1.458	349	4,1
6/1-8 TJ1	84,76	100,00	50,26	19,84	0,427	55,7	1.795	1.377	265	5,1
6/1-10 TJ1	88,04	100,00	50,35	19,91	0,442	61,2	1.634	1.181	234	5,0
6/2-2 TJ1	81,78	100,00	50,49	20,02	0,408	58,5	1.709	1.194	221	5,3
6/2-2 TJ2	82,66	100,00	50,31	19,88	0,416	63,3	1.580	1.038	220	4,7
6/2-6 TJ1	83,54	100,00	50,32	19,89	0,420	60,4	1.656	1.151	215	5,3
6/2-8 TJ1	102,03	100,00	50,65	20,15	0,506	56,3	1.776	1.598	525	3,0
6/3-2 TJ1	96,17	100,00	50,21	19,80	0,486	58,4	1.712	1.424	306	4,6
6/3-2 TJ2	85,13	100,00	50,29	19,86	0,429	57,0	1.754	1.319	208	6,3
6/3-4 TJ1	95,96	100,00	50,03	19,66	0,488	58,4	1.712	1.431	356	4,0
6/3-4 TJ2	88,70	100,00	50,15	19,75	0,449	59,2	1.689	1.281	255	5,0
6/3-6 TJ1	89,59	100,00	50,22	19,81	0,452	59,3	1.686	1.286	246	5,2
6/3-6 TJ2	92,37	100,00	50,04	19,67	0,470	58,9	1.698	1.354	250	5,4
6/4-2 TJ1	91,58	100,00	50,08	19,70	0,465	61,0	1.639	1.249	209	5,9
6/4-4 TJ1	99,05	100,00	50,17	19,77	0,501	57,6	1.736	1.510	399	3,7
6/4-4 TJ2	101,18	100,00	50,07	19,69	0,514	58,0	1.724	1.528	292	5,2
6/4-6 TJ2	99,53	100,00	50,06	19,68	0,506	59,1	1.692	1.448	316	4,5
6/4-8 TJ1	95,51	100,00	50,06	19,68	0,485	58,2	1.718	1.433	288	4,9
6/4-8 TJ2	94,01	100,00	49,91	19,56	0,481	57,8	1.730	1.438	262	5,4
Mínimo					0,408		1.300	1.004	182	1,35
Máximo					0,739		2.119	3.247	1.260	7,11
Médio					0,511		1.752	1.580	349	4,79
D. Padrão					0,047		100	298	134	0,96
C. V. (%)					9,12		5,70	18,85	38,25	20,0

APÊNDICE X - Análise de variância de um delineamento em parcelas sub-divididas (split-plot) para os corpos-de-prova de 45 cm orientados longitudinalmente.

Variável : Densidade

C.V. : 4,58%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	0,643 aA	0,598 aAB	0,599 aAB	0,580 aB	0,605
Mad. Juvenil	0,492 bA	0,494 bA	0,509 bA	0,523 bA	0,505
Média	0,567	0,546	0,554	0,551	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Variável : Velocidade

C.V. : 4,45%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	5.656 aA	5.529 aAB	5.323 aAB	5.175 aB	5.421
Mad. Juvenil	4.611 bA	4.849 bA	4.926 aA	4.922 aA	4.827
Média	5.133	5.189	5.124	5.049	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Variável : Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)

C.V. : 11,61%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	20.622 aA	18.372 aAB	17.064 aB	15.600 aB	17.915
Mad. Juvenil	10.570 bA	11.641 bA	12.350 bA	12.704 aA	11.816
Média	15.596	15.007	14.707	14.152	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Variável : Módulo de elasticidade estático (E_s)

C.V. : 14,23%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	15.757 aA	13.915 aAB	12.844 aAB	10.988 aB	13.376
Mad. Juvenil	7.369 bA	8.348 bA	8.740 bA	9.214 aA	8.418
Média	115.632	11.131	10.792	10.101	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Variável : Resistência à compressão paralela (f_{c0})

C.V. : 9,42%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	48,26 aA	48,43 aA	44,99 aA	43,63 aA	46,33
Mad. Juvenil	37,06 bA	40,55 aA	41,79 aA	43,71 aA	40,78
Média	42,66	44,49	43,39	43,67	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

APÊNDICE XI - Análise de variância de um delineamento em parcelas sub-divididas (split-plot) para os corpos-de-prova de 12 cm orientados longitudinalmente.

Variável : Densidade

C.V. : 4,41%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	0,634 aA	0,589 aAB	0,586 aB	0,563 aB	0,593
Mad. Juvenil	0,464 bA	0,465 bA	0,486 bA	0,496 bA	0,478
Média	0,549	0,527	0,536	0,530	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Variável : Velocidade

C.V. : 3,86%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	6.036 aA	5.949 aA	5.831 aA	5.635 aA	5.863
Mad. Juvenil	4.951 bA	5.237 bA	5.301 bA	5.341 aA	5.208
Média	5.493	5.593	5.566	5.488	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Variável : Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)

C.V. : 9,60%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	23.122 aA	20.941 aAB	20.033 aAB	17.970 aB	20.517
Mad. Juvenil	11.572 bA	12.864 bA	13.675 bA	14.213 bA	13.081
Média	17.347	16.902	16.854	16.092	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

APÊNDICE XII - Análise de variância de um delineamento em parcelas sub-divididas (split-plot) para os corpos-de-prova orientados tangencialmente.

Variável : Densidade

C.V. : 5,23%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	0,681 aA	0,616 aB	0,591 aB	0,574 aB	0,616
Mad. Juvenil	0,530 bA	0,485 bA	0,498 bA	0,526 aA	0,510
Média	0,606	0,551	0,550	0,545	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Variável : Velocidade (interação não-significativa)

C.V. : 3,39%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	1.778 aA	1.718 aA	1.734 aA	1.748 aA	1.745
Mad. Juvenil	1.838 aA	1.728 aAB	1.707 aB	1.735 aAB	1.752
Média	1.808 A	1.723 B	1.721 B	1.741 AB	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Variável : Módulo de elasticidade dinâmico (E_d) (interação não-significativa)

C.V. : 11,61%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	2.209 aA	1.825 aAB	1.796 aAB	1.751 aB	1.895
Mad. Juvenil	1.808 aA	1.465 aA	1.453 aA	1.582 aA	1.577
	2.008 A	1.645 B	1.624 B	1.667 B	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).

Variável : Módulo de elasticidade estático (E_s) (interação não-significativa)

C.V. : 14,23%

Sub-parcelas	Parcelas				Média
	1	2	3	4	
Mad. Adulta	767 aA	590 aB	650 aAB	634 aB	660
Mad. Juvenil	473 bA	298 bB	308 bB	319 bB	350
	620 A	444 B	479 B	476 B	

Notas:

- i) letras minúsculas comparam sub-parcelas dentro de cada parcela.
- ii) letras maiúsculas comparam parcelas dentro de cada sub-parcela.
- iii) médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem significativamente ($p>0,05$).