

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRICOLA**

**INFLUÊNCIA DA IDADE DA ÁRVORE NA
VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE
ULTRASSOM EM PEÇAS ESTRUTURAIS DE
MADEIRA DE REFLORESTAMENTO**

MARCUS VINICIUS MASSAK

**CAMPINAS
JULHO DE 2010**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRICOLA**

**INFLUÊNCIA DA IDADE DA ÁRVORE NA
VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE
ULTRASSOM EM PEÇAS ESTRUTURAIS DE
MADEIRA DE REFLORESTAMENTO**

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

MARCUS VINICIUS MASSAK

Orientadora: Raquel Gonçalves

**CAMPINAS
JULHO DE 2010**

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

M382i **Massak, Marcus Vinicius**
**Influência da idade da árvore na velocidade de
propagação de ondas de ultrassom em peças
estruturais de madeira de reflorestamento / Marcus
Vinicius Massak. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.**

Orientador: Raquel Gonçalves.
**Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual
de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.**

**1. Classificação. 2. Pinus elliottii. 3. Eucalyptus
grandis. I. Gonçalves, Raquel. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Agrícola. III. Título.**

**Título em Inglês: Influence of the tree age on the velocity of ultrasonic
wave propagation and on the modulus of elasticity**

Palavras-chave em Inglês: Grading, Pinus elliottii, Eucalyptus grandis

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiente

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

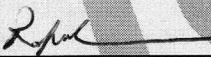
**Banca examinadora: Francisco Antonio Rocco Lahr, Claudio Henrique
Soares Del Menezzi**

Data da defesa: 08/07/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Marcus Vinicius Massak**, aprovado pela Comissão Julgadora em 08 de julho de 2010, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI



**Prof.^a. Dr.^a. Raquel Gonçalves – Presidente e Orientadora
Feagri/Unicamp**



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

**Faculdade de Engenharia Agrícola
Unicamp**



**Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr - Membro Titular
EESC/USP**

AGRADECIMENTO

À empresa Rotta Madeiras (Santa Catarina), e Duraflora (Lençóis Paulista) que cedeu as árvores, o serviço de acompanhamento de seu Engenheiro Florestal e demais funcionários durante os ensaios na Floresta, o serviço de corte e de retirada das árvores da floresta e o serviço de desdobro das toras na serraria da empresa.

Ao Engenheiro Florestal Manoel Ricardo Jungles e Raul chaves por todo o apoio e companheirismo durante o trabalho na Floresta e também por acreditar em nossa Pesquisa.

A todos os membros do LabEND, pelo espírito de equipe e disponibilidade a ajudar em qualquer atividade a ser desenvolvida sem distinção de pessoa ou pesquisa, em especial a Chiara Secco e Fernando Batista e Gisleiva C. Ferreira , pelo empenho e colaboração nos ensaios e trabalhos de campo.

A Cinthya Bertoldo, companheira de pesquisa, pela parceria nos trabalhos, seriedade, comprometimento com o trabalho e disponibilidade na colaboração das atividades.

Ao CNPq por acreditar em nossa pesquisa e fornecer apoio financeiro para concretização dos ensaios e trabalhos “in loco” nas florestas.

A professora Raquel Gonçalves, por ser mais que uma orientadora, por acreditar em seus alunos com suas particularidades, pela dedicação, pelo empenho, pela entrega às pesquisas, por se dispor a ajudar em qualquer momento, por fazer com que todos seus orientados trabalhem em grupo, potencializando os resultados e facilitando as atividades, pela amizade e acolhimento.

A minha esposa Valéria Puertas e minha família, pela sua colaboração e por entender minha ausência em alguns momentos para a dedicação aos estudos.

RESUMO

Em 2007 foi aprovada, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), norma para classificação de madeira de dicotiledônea (NBR 15521, 2007). Essa norma, elaborada com base em ensaios de espécies tropicais com idade média de 45 anos, propõe a classificação de peças estruturais por meio de faixas de velocidade de propagação de ondas de ultrassom, associadas à faixas de rigidez. Em 2008 iniciou-se a elaboração de norma equivalente para as coníferas. No entanto, de forma geral, as madeiras de reflorestamento vêm sendo comercializadas com bem menos idade do que as espécies nativas indicando a necessidade de, tanto para a norma já aprovada quanto para a norma em estudo, serem obtidas informações a respeito da influência da idade na velocidade de propagação das ondas de ultrassom. Esse estudo é importante uma vez que, caso as variações de velocidade com a idade não forem acompanhadas por variações de propriedades mecânicas a classificação poderia ser afetada. Considerando-se o exposto, o objetivo principal dessa pesquisa foi avaliar a variação da velocidade de propagação de ondas de ultrassom e a variação das propriedades de resistência e de rigidez de peças estruturais (vigas) de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus grandis* em função da idade. As variações de idade foram estudadas de duas diferentes maneiras. Para o *Pinus elliottii* as peças foram retiradas de 12 árvores com 6 diferentes idades e para o *Eucalyptus grandis* de 5 árvores, todas de 34 anos, considerando a variação da idade em função do posicionamento de retirada das toras em relação a altura do tronco. Os ensaios de ultrassom nas vigas foram realizados utilizando-se a NBR 15521 (2007) e os ensaios de flexão estática utilizando-se a ASTM D198 (2008). Os resultados demonstraram que, para o *Pinus elliottii*, os parâmetros obtidos por ultrassom (velocidade de propagação das ondas - V_{LL} e coeficiente da matriz de rigidez - CLL) e o módulo de elasticidade (E_M) obtido na flexão estática tiveram o mesmo comportamento de variação com a idade. Para o *Eucalyptus grandis* não foi possível associar a posição de retirada no tronco com a idade, mas V_{LL} , CLL e E_M tiveram o mesmo comportamento de variação com a posição de retirada. O módulo de ruptura obtido na flexão estática (f_m) não variou com a idade nem com a posição de retirada. As correlações entre os ensaios não destrutivos e destrutivos foram todas estatisticamente significativas, com

coeficientes de correlação superiores para o parâmetro de rigidez (E_M). Para o *Eucalyptus grandis* o enquadramento dos resultados de V_{LL} e E_M nas faixas de classificação da NBR 15521 (2007) foi realizado aplicando-se coeficiente de redução de 12% (fator de calibração) aos valores de velocidade obtidos na condição saturada.

Palavras-chave: Rigidez, Classificação, *Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*.

ABSTRACT

In 2007 was approved, by the Brazilian Standard Association (ABNT), standard for hardwood grading (NBR 15521, 2007). This standard, based on tests in tropical species with average age 45 years old, proposes grading the hardwood structural sizes lumber based on the ultrasonic velocity ranges associated to the stiffness ranges. In 2008 it was beginning the studies for developing an equivalent standard for softwoods. However, reforestation wood is, in general, put on the market younger than native wood, so it was important, for the cited standard and for the new one, evaluates the influence of the age on the velocity of wave propagation. This study is important because if the variation of the velocity is not follow by the rigidity variation, the grading will be affected. The aim of this research was to obtain technical information about the influence of the tree age on the velocity of ultrasonic wave propagation and on the stiffness and strength of the *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* structural beams. The age variation was studied using two ways. For *Pinus elliottii* the beams was cutting from 12 trees with 6 different ages and for *Eucalyptus grandis* the beam was obtained from 5 trees, all with 34 years old, considering the different ages as a function of the beam position in the trunk. The ultrasonic tests were performed using the NBR 15521 (2007) and the static bending test using the ASTM D198 (2008). The results showed that, for *Pinus elliottii*, the parameters obtained by the ultrasonic test (velocity of wave propagation – V_{LL} and rigidity coefficient – C_{LL}) and the modulus of elasticity (E_M) obtained in bending test had the same pattern of variation with age. For *Eucalyptus grandis* it was not possible to associate the position of the beam along the trunk with the age, but V_{LL} , C_{LL} and E_M had the same pattern of variation with this position. The modulus of rupture obtained in bending (f_m) did not present variation with age or with the extraction position. The correlations between nondestructive tests and destructive tests were all statistically significant, with higher correlation coefficients for the stiffness (E_M) than for the strength (f_m). To use the grade ranges of the NBR 15521 (2007) to the *Eucalyptus grandis* was necessary to apply 12% as reduction factor (calibrating) in the velocity values obtained in the saturated condition.

Key-words: stiffness, grading, *Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Análise do fuste de uma árvore de <i>Pinus silvestris</i> . Fonte: Mackay (1964, apud ENCINAS et al., 2005	5
Figura 2.2 Esquema de corte das peças em cada tora. Fonte: Grabianowski et al. (2006).....	6
Figura 2.3 Esquema das regiões de madeira juvenil e adulta no fuste de <i>Eucalyptus citriodora</i> . Fonte: Calonego et al. (2005	10
Figura 3.1: Localização da cidade de Caçador, SC (em azul) e das florestas (verde) de <i>Pinus elliottii</i>	19
Figura 3.2: Identificação das florestas de <i>Pinus elliottii</i> em relação às diferentes idades.....	19
Figura 3.3. Fotos de localização das florestas de <i>Eucalyptus grandis</i>	20
Figura 3.4.a - Representação da retirada das toras de <i>Pinus</i>	21
Figura 3.4.b - Representação da retirada das toras de Eucalipto.....	21
Figura 3.5. Equipamento de ultrassom USLab.....	22
Figura 3.6a - Transdutores de faces planas.....	22
Figura 3.6b - Transdutores de faces exponenciais.....	22
Figura 3.7.a - Pórtico de capacidade de carga de 500 kN	23
Figura 3.7.b- Potenciômetro	23
Figura 3.7.c -Aquisitor de dados modelo Spider 8.....	23
Figura 3.8. Máquina universal de ensaios de capacidade 300 kN.....	24
Figura 3.9. Extensômetros para medições de deformações nos corpos de prova.....	24
Figura 3.10. Medidor de umidade	25
Figura 3.11. Identificação por cores nas toras de <i>Pinus elliottii</i> para as diferentes idades das árvores.	26
Figura 3.12. Identificação do número da árvore e da posição de retirada em relação ao comprimento (<i>Eucalypto grandis</i>).	26
Figura 3.13. Ilustração das vigas provenientes de uma	27
Figura 3.14 – Desdobro das toras em vigas - empresa Rotta Madeiras em Caçador, Santa Catarina.....	27
Figura 3.15. Esquema de desdobro das toras de <i>Eucalyptus grandis</i>	28
Figura 3.16. Exemplo de codificação adotada. No caso do exemplo trata-se da viga 1 retirada da base da árvore 1 de 23 anos (<i>Pinus elliottii</i>	29

Figura 3.17a. Ensaio de ultrassom logo após o desdobro (ainda na serraria) nas vigas saturadas	30
Figura 3.18. Vigas armazenadas no Laboratório de Estruturas da FEAGRI após a secagem...	30
Figura 3.19. Medições de ultrassom na seção transversal (Fonte: NBR 15521	31
Figura 3.20. Ensaio de flexão estática realizado no pórtico	33
Figura 4.1. Gráficos de probabilidade normal obtido para os resultados de velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade, coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: <i>Pinus elliottii</i>	39
Figura 4.2. Gráficos de probabilidade normal obtido para os resultados de velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade, coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: <i>Eucalyptus grandis</i>	40
Figura 4.3 Valores médios de velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade, coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie <i>Curymbia citriodora</i>	42
Figura 4.4 Representação gráfica da variação com a idade dos valores médios de velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade, coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie	44
Figura 4.5 (a) Comportamento da variação da velocidade na condição saturada (VLL Sat) e seca (VLL seca) (a) e do coeficiente de rigidez (CLL) e do módulo de elasticidade à flexão (EM) (b) em função da idade da árvore de onde as vigas foram retiradas. Espécie: <i>Pinus elliottii</i>	48
Figura 4.6 (a) Comportamento da variação da velocidade na condição saturada (VLL Sat) e seca (VLL seca) (a) e do coeficiente de rigidez (CLL) e do módulo de elasticidade à flexão (EM) (b) em função da idade da árvore de onde as vigas foram retiradas. Espécie: <i>Eucalyptus grandis</i>	48
Figura 4.7. Classificação das vigas, utilizando o módulo de elasticidade (EM), de acordo com as faixas da NBR 15521 (2007)	54
Figura 4.8. Classificação das vigas, utilizando a velocidade na viga saturada, corrigida em 12% ($V_{LLsat,corr}$), de acordo com as faixas da NBR 15521 (2007)	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Valores médios do módulo de elasticidade (EM), módulo de ruptura (EM) e densidade específica (SG) em diferentes alturas do tronco.....	8
Tabela 2.2 Número do anel de crescimento correspondente à demarcação determinada pela porcentagem de variação de propriedades. Adaptado de Zhu et al. (2005).....	8
Tabela 3.1 – Coordenadas de referenciamentos geográficos das florestas de <i>Pinus elliottii</i> e <i>EucaliptoGrandis</i>	20
Tabela 3.3. Amostragem das vigas de <i>Pinus elliottii</i> e de <i>Eucaliptus grandis</i>	29
Tabela 4.1 – Valores médios, por idade da árvore, de Velocidade longitudinal (VLL) obtidos nas vigas na condição saturada e densidade aparente (ρ), V_{LL} , coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (fm) obtidos em flexão, na condição seca ao ar (~12% de umidade).....	37
Tabela 4.10 Modelos e parâmetros da regressão entre velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade na condição seca (VLL) e coeficiente de rigidez (CLL) com módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%).	52
Tabela 4.11. — Classificação por ultra-som da madeira de dicotiledônea (UD).....	54
Tabela 4.12. Valores de VLL,sat propostos para classificação da madeira de eucalyptus grandis nas classes UD-35 e UD-45.....	57
Tabela 4.2. Valores médios da NBR 7190 (1997) para densidade aparente (ρ), resistência à tração paralela (ft) e módulo de elasticidade na compressão (E_c). Umidade de referência (12%).	38
Tabela 4.3 Valores esperados para o módulo de ruptura característico (fmk) obtidos com a utilização da Equação 3.10.	38
Tabela 4.4. Valores das estatísticas “skewness” e “kurtosis” para os resultados de velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade (ρ), coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%)......	40
Tabela 4.5 Valores médios de velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade, coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: <i>Pinus elliottii</i>	42
Tabela 4.6 Valores médios de velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade, coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: <i>Eucalyptus citriodora</i>	44
Tabela 4.7 Análise de variação de médias com a idade da velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade, coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: <i>Pinus elliottii</i>	47

Tabela 4.8 Modelos e parâmetros da regressão entre velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade, coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: <i>Pinus elliottii</i>	51
Tabela 4.9 Modelos e parâmetros da regressão entre velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade, coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: <i>Eucalyptus grandis</i>	52

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
SUMÁRIO.....	xii
1.INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.2 Classificação da madeira.....	13
2.3. Resumo dos aspectos gerais e principais da revisão	16
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1 Material.....	18
3.2 Principais Equipamentos	20
3.3. Metodologia.....	24
3.3.1. Amostragem das vigas.....	24
3.3.2.Ensaio.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
5.CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Em novembro de 2007 foi aprovada no Brasil, pela ABNT, norma para classificação de madeira de dicotiledônea (NBR 15521/2007). Essa norma apresenta metodologia de classificação de peças estruturais de madeira de dicotiledôneas por meio de faixas de velocidade de propagação de ondas de ultrassom. As faixas foram obtidas utilizando-se resultados de ensaios em vigas provenientes de árvores de madeira nativa com idade média de 45 anos.

Em fevereiro de 2008 foram iniciadas as discussões para a elaboração de norma equivalente para as coníferas. No entanto, para madeiras de reflorestamento, as peças vêm sendo comercializadas com pouca idade, indicando a necessidade de, tanto para a norma em estudo quanto para a já aprovada (NBR 15521/2007), serem obtidas informações a respeito da influência da idade na velocidade de propagação das ondas de ultrassom, parâmetro utilizado na classificação proposta. Além disso, é importante avaliar se as faixas propostas na NBR 15521 (2007) para espécies nativas de grande idade são adequadas para classificar a madeira de reflorestamento.

A literatura pesquisada e apresentada no capítulo Revisão Bibliográfica indica que há variação das propriedades mecânicas da madeira com a idade da árvore. Assim, caso a variação da velocidade de propagação das ondas não acompanhasse a variação das propriedades mecânicas, a classificação proposta utilizando esse parâmetro poderia ser afetada.

Para avaliar as diferenças de propriedades mecânicas e acústicas da madeira em função da idade podem ser utilizadas diferentes metodologias. Uma delas é retirar peças de árvores de diferentes idades e analisar os resultados médios das peças retiradas dessas árvores. A outra forma é retirar peças de árvores de uma mesma idade variando a posição de retirada em relação ao diâmetro e/ou ao comprimento, tentando obter as variações de idade dentro de uma mesma árvore. Durante essa pesquisa essas duas formas foram utilizadas, a primeira para as árvores de *Pinus elliottii* e a segunda para as árvores de *Eucalyptus grandis*. Nesse último caso foram analisadas somente a variação da posição de retirada das peças em relação ao comprimento.

Levando em consideração os aspectos mencionados o objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a variação da velocidade de propagação das ondas de ultrassom na direção longitudinal (V_{LL}) em função da idade e verificar se essa variação apresentava a mesma tendência da variação de propriedades mecânicas com a idade. Tendo em vista que o foco principal da pesquisa está voltado à classificação mecânica de peças estruturais, os ensaios foram realizados em vigas de tamanho estrutural e as propriedades mecânicas principais foram o Módulo de Elasticidade (E_M) e o módulo de ruptura (f_m), obtidos em flexão estática, uma vez que tais parâmetros são os utilizados nas normas de classificação de peças estruturais para determinar a classe de resistência da madeira.

As etapas ou objetivos secundários seguidos durante o desenvolvimento da pesquisa foram:

Para o *Pinus elliottii*:

- Avaliar a variação, com a idade, da velocidade de propagação das ondas de ultrassom na direção paralela às fibras (V_{LL}) e das propriedades mecânicas (E_M e f_m) obtidas em vigas de seção estrutural.

- Determinar as correlações entre os parâmetros do ensaio de ultrassom (C_{LL} e V_{LL}) e os parâmetros do ensaio estático (E_M e f_m) nas vigas estruturais.

Para o *Eucalyptus grandis*

- Verificar a possibilidade de avaliar a variação da velocidade de propagação das ondas de ultrassom na direção paralela às fibras (V_{LL}) e das propriedades mecânicas (E_M e f_m) obtidas em vigas de seção estrutural, em função da posição de retirada das peças em relação à altura da árvore, e de correlacionar essa variação com diferentes idades representadas por essas posições.

- Determinar as correlações entre os parâmetros do ensaio de ultrassom (C_{LL} e V_{LL}) e os parâmetros do ensaio estático (E_M e f_m) nas vigas estruturais.

- Avaliar a adequação das faixas propostas na NBR 15521/2007, considerando os resultados de V_{LL} e de C_{LL} e os resultados de E_M .

A pesquisa foi desenvolvida com o apoio de duas empresas – a Rotta Madeiras de Santa Catarina, que cedeu as árvores de *Pinus elliottii* e a *Duraflora*, de São Paulo, que cedeu o *Eucalyptus grandis*.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Influência da idade nas propriedades da madeira

Há, na literatura, diversos artigos que apresentam resultados de pesquisa que visam avaliar a influência da idade em propriedades da madeira. Nesses trabalhos se pode verificar a existência de três abordagens metodológicas. Uma delas é a utilização de peças estruturais ou de corpos-de-prova retirados de árvores de diferentes idades. Uma segunda metodologia envolve os trabalhos que utilizam árvores de uma mesma idade, nas quais a variação é obtida pela posição radial de retirada das peças. Nesses casos o mais comum é a retirada de corpos-de-prova de pequenas dimensões, pois é necessário que a amostra avaliada esteja totalmente incluída na parte correspondente aos anéis de crescimento que se quer considerar para se correlacionar com as idades. Uma terceira metodologia abrange trabalhos que utilizam, também, árvores de uma mesma idade, nas quais a variação é obtida pela posição longitudinal de retirada das peças uma vez que, tendo em vista a forma de crescimento das árvores, nas posições mais altas do tronco encontra-se a madeira mais jovem (Figura 2.1). Nesse item serão apresentados trabalhos de pesquisa que utilizam essas três metodologias.

Ainda que de forma indireta, os trabalhos que avaliam a variação de propriedades da madeira juvenil e adulta também estão relacionados com a idade e com a posição radial e longitudinal de retirada das peças. Dessa forma, nesse item também são apresentados resultados de pesquisa que se dedicam à análise dessa questão.

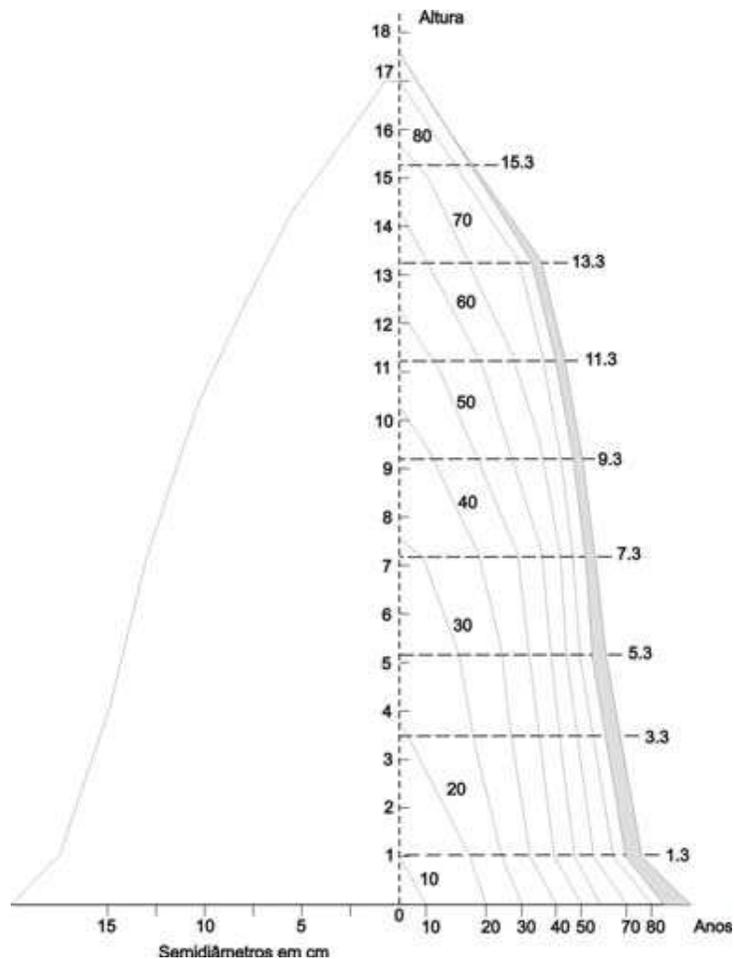


Figura 2.1. Análise do fuste de uma árvore de *Pinus silvestris*. Fonte: Mackay (1964, apud ENCINAS *et al.*, 2005)

Grabianowski *et al.* (2006) estudaram o comportamento da velocidade de propagação de ondas e da rigidez em árvores de *Pinus radiata* provenientes de Greymouth, Nova Zelândia. Para o estudo foram utilizadas toras de comprimento entre 2 m e 3 m retiradas da base de árvores com 26 anos de idade. Das toras recém cortadas eram retiradas duas bordas de forma a restar uma prancha de aproximadamente 70 mm de largura. Dessa prancha foram retiradas duas peças das bordas (denominadas A e B) e uma peça do centro (C) (Figura 2.2). As peças foram secas até atingirem umidade de equilíbrio em torno de 12%. Para o estudo foram consideradas três faixas de idade, considerando as peças retiradas da parte central como sendo 8 anos, as peças mais externas (próximas à casca) como sendo de 26 anos e as peças intermediárias como sendo de 16 anos.

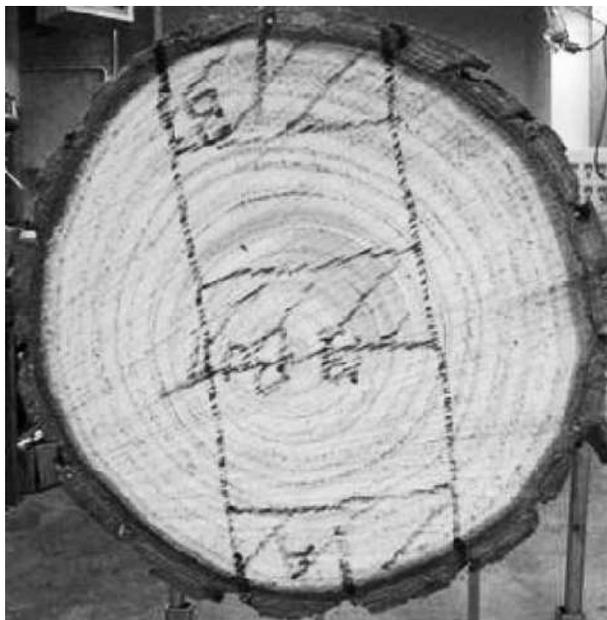


Figura 2.2 Esquema de corte das peças em cada tora. Fonte: Grabianowski *et al.* (2006)

Após atingirem a umidade de equilíbrio as peças passaram por medição de ultrassom. As velocidades foram utilizadas para determinar o coeficiente de rigidez ($C_{LL} = \rho v^2$) de cada peça. A velocidade média nas peças da região considerada de 26 anos (2870 m/s) foi 20% superior às peças da região considerada de 16 anos (2390 m/s) e 42% superior às peças da região considerada de 8 anos (2020 m/s). O CLL médio das regiões de 26 anos (11,52 GPa) foi 36% superior às peças da região de 16 anos (8,44 GPa) e 75% superior às peças da região de 8 anos (6,58 GPa). Esses resultados indicam que o coeficiente de rigidez foi mais afetado pela idade do que a velocidade. Os autores concluem que, por meio dos trabalhos realizados por eles e por outros autores citados no artigo, é possível assumir que as velocidades obtidas em árvores novas correspondem às velocidades que seriam obtidas na parte interna (madeira juvenil) de árvores mais velhas (maduras).

Innes (2007) avaliou a variação de propriedades de resistência e de rigidez da madeira de *Eucalyptus obliqua* proveniente de árvores de 102, 69, 54 e 36 anos da Tasmânia. De cada árvore foram retiradas as toras da base, com 3,1 m de comprimento. Das toras foram retiradas tábuas de 28 mm de espessura e de 80, 110 e 135 mm de largura, as quais passaram por procedimento de secagem até atingirem 12% de umidade. Toda a parte do tronco correspondente ao alburno foi retirada antes da confecção das peças. A determinação da

rigidez foi realizada utilizando-se ensaio de flexão estática com carga centrada em corpos-de-prova isentos de defeitos e de seção 20 mm x 20 mm x 300 mm. Os parâmetros de rigidez avaliados foram o módulo de elasticidade (E_M) e o módulo de ruptura (f_m). O autor concluiu não haver diferenças estatísticas entre as propriedades de rigidez (E_M e f_m) e a densidade com a idade. Esse resultado permite inferir que, acima de uma determinada idade as propriedades permanecem aproximadamente constantes.

Zhu *et al.* (2005) avaliaram as diferenças entre propriedades mecânicas (módulo de ruptura e módulo de elasticidade à flexão, módulo de cisalhamento, resistência a compressão paralela e resistência ao cisalhamento) e físicas (densidade) considerando a variação da idade em decorrência da posição radial e longitudinal de retirada das peças. A espécie utilizada foi a *Cryptomeria japonica*, proveniente de Akita, Japão. Durante o estudo foram avaliadas 4 árvores de 75 anos de idade. A amostragem foi realizada retirando-se toras de 0,5 m de comprimento a cada 2m do tronco até aproximadamente 13 m de altura (as árvores tinham em média 28 m de altura) totalizando 25 toras. Em cada altura foram também retirados discos dos quais se confeccionaram corpos-de-prova no terceiro, sexto, nono, décimo segundo e vigésimo anéis de crescimento anual e a cada 10 anos depois do vigésimo anel a partir da medula. Esses discos foram utilizados para avaliar a variação de algumas propriedades anatômicas. Os corpos-de-prova para os ensaios de rigidez tinham dimensão de 20 mm x 20 mm x 400 mm. A umidade média dos corpos-de-prova foi de 13,1%. Para os valores médios os autores verificaram não haver um comportamento regular dos parâmetros de rigidez com a posição longitudinal de retirada dos corpos-de-prova (Tabela 3.1), mas que, para E_M , a tendência dos resultados foi a diminuição dos valores com a altura. Esse resultado parece ser contraditório uma vez que em maiores alturas a madeira apresenta menor idade.

Tabela 2.1 Valores médios do módulo de elasticidade (E_M), módulo de ruptura (f_m) e densidade específica (SG) em diferentes alturas do tronco.

Propriedade/altura	1,2	3,2	5,2	7,2	9,2	11,2	13,2
E_M	8,43	8,70	8,55	8,26	8,67	8,16	8,58
(MPa)	(17,0)	(19,6)	(21,3)	(23,5)	(22,2)	(23,1)	(18,2)
f_m	66,0	69,0	66,9	66,9	69,7	68,0	69,0
(MPa)	(12,0)	(13,0)	(13,5)	(15,8)	(16,3)	(13,4)	(12,5)
SG	0,371	0,380	0,378	0,381	0,381	0,384	0,390
	(8,2)	(7,4)	(8,8)	(9,5)	(10,1)	(9,5)	(8,2)

Zhu *et al.* (2005) estimaram também a idade de transição, em termos de propriedades mecânicas, da madeira juvenil para a adulta. Essa estimativa foi realizada assumindo-se porcentagem de variação das propriedades para a qual se considere que houve tal transição. No caso do trabalho de Zhu *et al.* (2005) a porcentagem fixada foi 3% e a avaliação foi realizada considerando as diferentes posições em relação à altura do tronco. Os autores observaram que, com o aumento da altura há um decréscimo no número de anéis de crescimento que correspondem a transição da madeira juvenil para adulta. A Tabela 3.2 apresenta os resultados do número do anel de crescimento que corresponde à transições de 1%, 2% e 3% nas propriedades.

Tabela 2.2 Número do anel de crescimento correspondente à demarcação determinada pela porcentagem de variação de propriedades. Adaptado de Zhu *et al.* (2005).

Altura (m)	1%	2%	3%
1,2	31	19	15
3,2	33	20	16
5,2	32	19	15
7,2	30	18	14
9,2	29	18	14
11,2	27	16	13
13,2	27	16	12

Por essa tabela se verifica que para maiores alturas há um decréscimo no número de anéis de crescimento que corresponde a uma transição da madeira juvenil para a adulta. Em outras palavras as diferenças entre a madeira juvenil e adulta terminam antes em toras retiradas em maiores alturas e, assim, há maior homogeneidade do tronco nessas posições.

Os autores (ZHU *et al.* 2005) destacam que o comprimento do traqueíde e o ângulo de inclinação da microfibrila são parâmetros muito importantes na determinação da transição entre a madeira juvenil e adulta. Na madeira juvenil o ângulo da microfibrila é maior e o comprimento do traqueíde menor. Por meio de análises anatômicas nos discos retirados nas várias alturas do tronco os autores verificaram que comportamento similar ao descrito em relação às propriedades mecânicas (número do anel de crescimento que indica a transição) ocorre quando o parâmetro de análise dessa transição é a variação do comprimento do traqueíde e do ângulo da microfibrila. Além disso, os autores verificaram que, na direção vertical (da base do tronco até 13,2 m) o comprimento do traqueíde é pequeno e o ângulo de inclinação da microfibrila é grande comparado aos valores das partes mais altas do tronco. Análise de regressão entre E_M e MOR com as propriedades anatômicas (ângulo de microfibrila e comprimento do traqueíde) mostrou que o E_M tem maior correlação com o ângulo da microfibrila ($R = 0,657$) e com o comprimento do traqueíde ($R = 0,726$) enquanto o fm tem maior correlação com a densidade ($R = 0,837$). Essas correlações explicariam o comportamento não esperado de redução de EM com a altura no tronco.

Aparentemente os resultados obtidos por Zhu *et al.* (2005) contradizem os resultados de grande parte dos pesquisadores, pois de maneira geral, a madeira juvenil é entendida como tendo forma aproximadamente cilíndrica, com diâmetro quase uniforme desde a base até o topo da árvore. No entanto, considerando a propriedade anatômica (comprimento de fibra ou ângulo de microfibrila) como parâmetro, os resultados desses autores são confirmados por outros trabalhos.

Oliveira (1997, citado por CALONEGO *et al.*, 2005) identificou madeira juvenil no *Eucalyptus grandis* de 16 anos, nos primeiros 80 mm de raio e, no *Curymbia citriodora*, apenas nos primeiros 30 a 40 mm de raio.

Calonego *et al.* (2005), concluiu, utilizando 4 árvores de *Curymbia citriodora* com 32 anos de idade, provenientes do horto florestal de Manduri, SP, que a madeira juvenil apresenta a forma de um cilindro, com diâmetro praticamente uniforme em todo o fuste (Figura 2.3). No entanto, no mesmo trabalho, análise da variação do comprimento das fibras da madeira juvenil em função da altura do fuste da árvore, indicou aumento do comprimento das fibras com a altura e diminuição da variabilidade. Os resultados obtidos pelo autor mostram que o comprimento das fibras a 0,3 m de altura foi de 0,943 mm com coeficiente de variação de

15,3% enquanto que a 28,3 m de altura esse comprimento foi de 1,12 mm com coeficiente de variação de 3,5%. Tendo em vista que a variação de propriedades da madeira juvenil para a adulta está relacionada, principalmente, ao comprimento das fibras, esse resultado também pode explicar o aumento das propriedades mecânicas da madeira em partes mais altas do fuste.

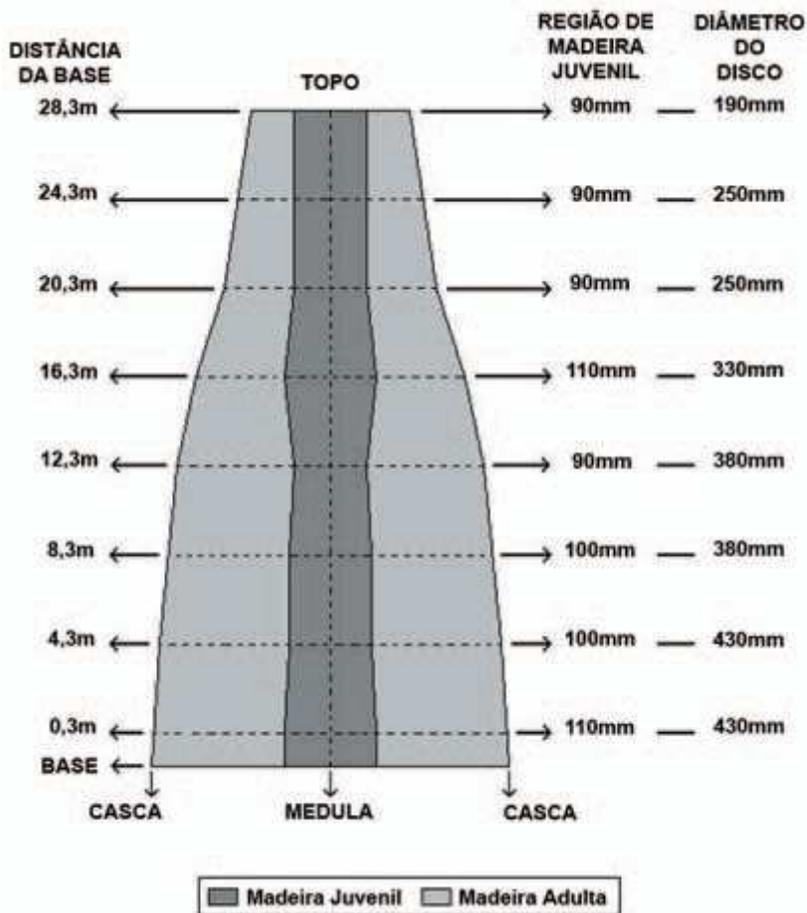


Figura 2.3 Esquema das regiões de madeira juvenil e adulta no fuste de *Curymbia citriodora*.
Fonte: Calonego et al.. (2005)

Leonello (2008) realizou trabalho com 3 árvores de *Eucalyptus grandis* de 28 anos de idade provenientes do município de Anhembi, SP, visando a delimitação da madeira juvenil. Para essa definição utilizou como parâmetro o comprimento das fibras, tendo concluído que a madeira juvenil se localizava desde o centro da árvore até 15 cm de raio. Os valores médios de comprimento de fibra da madeira juvenil foi de 1 mm com coeficiente de variação de 18,3% e da madeira adulta de 1,14 mm com coeficiente de variação de 5,6%. Os autores só realizaram

a avaliação na altura do peito. Comparando-se com os resultados de Oliveira (1997, citado por CALONEGO *et al.*, 2005) verifica-se que há grande variação de proporção de madeira juvenil e adulta no tronco mesmo para a mesma espécie. Além disso, os comprimentos de fibra da madeira adulta foram próximos dos obtidos por Calonego *et al.* (2005) para a madeira juvenil a 28,3 m de altura.

Bucur (2006) indica que a zona de madeira juvenil é uma zona de crescimento contínuo da velocidade longitudinal de propagação das ondas de ultrassom. Para ensaios com madeira de *Pinho* e de *sitka Spruce* os resultados demonstraram que os maiores crescimentos de velocidade longitudinal ocorreram dos anéis de crescimento 1 a 9 sendo praticamente constantes do anel 10 ao 25.

Lara Palma e Ballarin (2002) estudando a transição da madeira juvenil para 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 definida a região de madeira juvenil desde a medula até o 14º anel e a região de madeira adulta desde o anel 18 até o anel 37.

Nogueira (2006) realizou ensaio com pranchas e corpos-de-prova de *Pinus taeda* retirados de 6 árvores com 34 anos de idade. De cada árvore os autores obtiveram quatro toras, totalizando 24 toras. As toras foram processadas mecanicamente obtendo-se 24 pranchas com aproximadamente 300 mm de largura, 80 mm de espessura e 2,30 m de comprimento. Das pranchas foram confeccionados corpos-de-prova de madeira juvenil (4 corpos-de-prova por prancha) e de madeira adulta (4 corpos-de-prova por prancha) nas dimensões nominais de 40 mm x 40 mm x 450 mm e 40 mm x 40 mm x 120 mm (garantindo-se que os corpos-de-prova pertencessem às regiões de interesse). Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de ultrassom. Os autores concluíram que as velocidades de propagação da onda nos corpos-de-prova de madeira adulta foram sempre superiores àquelas obtidas na região de madeira juvenil das pranchas. Os autores também concluem que a comercialização de madeira jovem, com grande proporção de madeira juvenil, resulta em problemas de qualidade nos produtos obtidos deste tipo de matéria-prima. Peças estruturais que contenham grande quantidade de lenho juvenil apresentam classes de resistências inferiores, sendo, portanto, de grande importância, um método não destrutivo que permita classificar a madeira.

Gonçalves *et al.* (2009) estudaram algumas propriedades mecânicas da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* de duas idades (6 e 14 anos

aproximadamente) e provenientes de talhadia simples e de reforma. A madeira deste estudo foi coletada em um experimento com clones de propriedade da empresa Aracruz Celulose S.A., localizada no Sul do Estado da Bahia, Municípios de Mucuri e Nova Viçosa. Foram abatidas 15 árvores com diâmetros entre 28,0 e 30,0 cm à altura do peito (DAP). De cada árvore foram retiradas as duas primeiras toras com 3 m de comprimento e, de cada tora, foi obtida uma peça central de 50 mm ,incluindo a medula. Dessas peças foram então retirados corpos-de-prova de 20 mm x 20 mm x 300 mm, em diferentes posições radiais (medula-casca) para realização de ensaios de flexão estática de onde foram obtidos o módulo de elasticidade (E_M) e o módulo de ruptura (f_m). Para a medição da umidade, após os ensaios de flexão foram retiradas pequenas amostras. A umidade média dos corpos-de-prova foi de 16,7%. Os valores de E_M e de f_m foram corrigidos para 12% utilizando-se as equações de correção da NBR 7190 (1997). O módulo de ruptura (f_m) teve acréscimo de 24% com a idade e o módulo de elasticidade (E_M) de 28%. Em relação às diferentes alturas de retirada a segunda tora apresentou os maiores valores tanto para f_m quanto para E_M . As maiores diferenças entre as toras 1 e 2 ocorreu para a árvore mais jovem. Considerando as discussões de ZHU *et al.* (2005) relativas à variação do ponto de transição da madeira juvenil para adulta e também da variação de propriedades anatômicas com a altura, é possível que no caso da madeira mais jovem a diferenciação em termos de porcentagem de madeira juvenil tenha sido mais significativa do que para a madeira mais velha, já que as toras foram retiradas na seqüência, não atingindo, portanto, grandes alturas. Em relação à variação radial os autores obtiveram aumento linear da medula para a casca, tanto para f_m quanto para E_M .

Oliveira et al. (2006) avaliaram a variação de propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. oriunda da região de Sengés/PR com a idade. Para isso utilizaram madeira proveniente de árvores de 9, 13 e 20 anos. Para cada idade foram utilizadas 5 árvores e, de cada árvore, foi retirada apenas a tora da base, com 2,4 m. De cada tora foi retirada uma prancha central de 50 mm de largura, de onde foram retiradas peças de 40 mm x 40 mm x 500 mm. Essas peças foram retiradas das posições correspondentes à 0%, 50% e 100% do raio para que fosse possível aos autores avaliarem a variação radial das propriedades. Das peças foram obtidos corpos-de-prova de 20 mm x 20 mm x 300 mm para os ensaios de flexão estática. Os corpos-de-prova passaram por secagem até umidade em torno de 12%. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que nem a densidade aparente nem a resistência à flexão (f_m) foram afetadas

pela idade ou pela posição radial de retirada dos corpos-de-prova considerando nível de 5% de significância. Para o nível de significância de 1% tanto a densidade quanto f_m foram afetados pela idade e pela posição radial de retirada. Para esse nível de significância (1%) a densidade cresceu 14% de 9 para 13 anos e 14% de 13 para 20 anos enquanto f_m cresceu 27% de 9 para 13 anos e 19% de 13 para 20%. As propriedades foram sempre crescentes da medula para a casca para nível de significância de 1%. No trabalho de Oliveira *et al.* (2006) são citados, também, resultados de Pearson e Gilmore (1980) e de Dal Ponte Filho *et al.* (2004), os quais obtiveram resultados semelhantes, ou seja, verificaram que de acordo com o aumento da idade ocorre aumento da resistência e da densidade da madeira, e que para as posições radiais há aumento do valor das propriedades, no sentido da medula para a casca.

Segundo Oliveira *et al.* (2006) o aumento das propriedades da madeira da medula para a casca é devido à tendência de homogeneização do material indicando que o mesmo estaria atingindo a maturidade. Assim, com o aumento das idades das árvores a proporção de madeira adulta em relação à madeira juvenil aumenta no sentido da região da medula para a casca, melhorando as propriedades mecânicas.

Ballarin e Lara Palma (2003) estudaram as propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *pinus taeda* através da análise do comprimento dos traqueídes. Determinaram como madeira juvenil a área compreendida do centro da tora ao 14º anel de crescimento, do 14º ao 18º compreende-se a área de transição e do 18º anel em diante madeira adulta, mostrando homogeneidade das propriedades com o passar dos anos. As diferenças observadas nos valores médios do MOE e do MOR na madeira adulta, em relação à juvenil, foram maiores em aproximadamente 54 e 47%, respectivamente. Já para as diferenças observadas nos valores médios da densidade aparente da madeira adulta em relação à juvenil, foram da ordem de 26%.

Serpa *et al.* (2003) estudaram as propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii* no sentido medula-casca e no sentido longitudinal. Na direção medula-casca, a massa específica básica, a resistência à flexão e a resistência à compressão aumentam e a contração volumétrica diminui, para todas as espécies. Longitudinalmente, a tendência para as três espécies foi de ocorrerem massas específicas, contrações volumétricas e resistências à flexão e à compressão menores na tora do meio que

nas da base e do topo. Observou-se ainda que a densidade na base, de modo geral, foi inferior às observadas no topo da árvore.

Oliveira *et al.* (2004) estudaram a variação da umidade e da densidade do lenho de sete espécies de *Eucalyptus*, de aproximadamente 16 anos de idade, avaliados na direção radial e longitudinal do tronco de árvores recém abatidas. As espécies utilizadas foram *Curymbia citriodora*, *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus paniculata*, *Eucalyptus pilularis*, *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*.

Das árvores amostradas foram retirados discos de madeira na base e a 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, considerando diâmetro mínimo de 5 cm. Esses discos foram acondicionados em sacos plásticos para evitar a perda de umidade, sendo, em seguida, retiradas amostras de 25 mm de largura na direção radial. Para a determinação do teor de umidade pelo método gravimétrico e da densidade básica da madeira, foram cortados corpos-de-prova de 10 x 25 x 50 mm³, sendo a última dimensão no sentido longitudinal, a cada 1,0 cm a partir da medula em direção à casca, nas cinco diferentes alturas do tronco das árvores. Em relação à distribuição de umidade na madeira das sete espécies de *Eucalyptus* estudadas, concluiu-se que o *Eucalyptus paniculata* e o *Curymbia citriodora* foram mais homogêneos enquanto que o *Eucalyptus urophylla* e o *Eucalyptus grandis* os mais heterogêneos. À exceção do *Eucalyptus grandis*, verificou-se nas demais espécies a queda do gradiente de umidade no sentido medula casca. O teor de umidade foi mais elevado na base do tronco, diminuindo até por volta da sua metade, aumentando a partir do terço superior, com valores no topo próximos aos da base da árvore. Quanto à densidade básica da madeira, os autores concluíram que houve aumento dessa propriedade na direção medula casca, com cada espécie apresentando perfil de variação distinto. Quanto à variação ao longo do tronco, à exceção do *Eucalyptus grandis*, com acréscimo de 25% da base para o topo, nas demais espécies houve queda da densidade considerando essa direção.

2.2 Classificação da madeira

O uso de técnicas não-destrutivas permite que a classificação da madeira seja realizada em todas as peças de um lote, em lugar das avaliações por amostragem. Embora nenhum tipo de ensaio ou de avaliação de materiais seja isento de erro, a classificação (entendida aqui como avaliação de todas as peças de um lote) é muito mais segura e precisa do que a

determinação de propriedades a partir de um lote representativo, principalmente no caso da madeira, material que apresenta grande variabilidade natural, mesmo dentro de uma mesma espécie ou até mesmo dentro de uma mesma árvore.

Por esta razão, diversos autores em todo o mundo, e também no Brasil, vêm estudando a possibilidade de se utilizar o ensaio não-destrutivo de ultrassom na avaliação de propriedades de resistência e de rigidez da madeira. Para isso, considerando peças estruturais, normalmente são estudadas as correlações entre os parâmetros do ensaio não destrutivo – velocidade na direção longitudinal (V_{LL}) e/ou coeficiente da matriz de rigidez decorrente do uso desta velocidade ($C_{LL} = \rho V_{LL}^2$) – e do ensaio destrutivo de flexão estática – Módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m).

Waubke (1981), na Alemanha, foi o primeiro pesquisador a aplicar os resultados de C_{LL} na classificação de peças estruturais de madeira através do ultrassom, por meio da correlação com E_M e, conseqüentemente, com classes de rigidez.

Posteriormente Sandoz (1990) propôs, na Suíça, método de classificação de peças estruturais, de acordo com as faixas estabelecidas pela Norma SIA 164, utilizando faixas de velocidade de ultrassom. Para isso apresentou proposta de correlações diretas entre os valores de velocidade de propagação longitudinal (V_{LL}) aos valores de E_M , E_L (módulo de elasticidade na compressão paralela) e f_m . Essa proposta foi inserida em norma de classificação naquele país.

No Brasil Bartholomeu (2001), a exemplo de Waubke (1981) e Sandoz (1990), também propôs a classificação mecânica da madeira crescida no país (nativa e de reflorestamento) por meio de correlação de C_{LL} e V_{LL} com classes de resistência e de rigidez. Como conseqüência do seu trabalho de doutorado e, adicionalmente, com ensaios de outras espécies realizados pela equipe que atuou na elaboração da norma, foi aprovada, em novembro de 2007, a NBR 15521: Ensaio não destrutivo — Ultrassom — Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas.

Carreira *et al.* (2006) realizaram ensaios de flexão estática e de ultrassom em 600 peças estruturais de *Pinus sp*, coletadas em uma indústria localizada em Lages - SC. A equação de regressão entre o E_M e o C_{LL} apresentou para o coeficiente angular o valor de 0,944, indicando que os valores do módulo de elasticidade medidos pela avaliação ultra-sônica foram bastante próximos dos valores obtidos pelo ensaio de flexão estática. O coeficiente de

correlação obtido para a equação de regressão ($R = 0,95$) foi altamente significativo para o *Pinus sp.* Os autores concluíram que a técnica ultrassônica pode ser utilizada como um método rápido e eficiente para a classificação de peças estruturais de *Pinus sp.*

González (2007), em sua tese de doutorado, cita que até a década de 70, tanto nos EUA quanto na Europa, as propriedades da madeira eram determinadas utilizando-se corpos-de-prova pequenos e isentos de defeitos. González (2007) confeccionou 395 peças de madeira serrada de tramando estrutural com seção transversal entre 150 mm x 200 mm e 200 mm x 250 mm das espécies de coníferas: pinus radiata (*Pinus radiata*), pinus silvestre (*Pinus sylvestris*) e pinus laricio (*Pinus nigra*). O autor comparou a classificação por análise visual, utilizando a norma UNE 56544 (2003), com os resultados de ensaios de flexão estática, utilizando a norma EN 408: 2004 e, também, com resultados de ensaios não-destrutivos, dentre eles o ultrassom. González (2007) conclui que a classificação visual da madeira serrada de seção estrutural, principalmente de grandes seções como as avaliadas no trabalho, não tem resultados adequados, uma vez que, por um lado a aplicação da norma traz como consequência grande porcentagem de rejeição de peças (42%), reduzindo muito o rendimento comercial da madeira e, por outro lado, as qualidades visuais que define não permitiram associação com os grupos das propriedades físicas e mecânicas das peças. Em relação à previsão de propriedades utilizando o método de propagação de ondas de ultrassom o autor concluiu que:

- A melhor predição das propriedades da madeira foi obtida utilizando-se o valor do coeficiente de rigidez (C_{LL}) ao invés da utilização apenas da velocidade (V_{LL}). Os coeficientes de determinação máximos obtidos pelo autor para a correlação com C_{LL} foram de 0,76 para o módulo e de 0,68 para a resistência a ruptura. Para o caso da correlação com a velocidade foram de 0,53 para tanto para o módulo de elasticidade quanto para a resistência. No entanto o autor não descarta o uso direto da velocidade como possível parâmetro de classificação dada a facilidade de utilização prática quando comparado com C_{LL} e também considerando que a classificação visual adotada atualmente na Espanha apresenta resultados ainda piores.
- A tensão de ruptura apresentou ajustes piores do que o módulo de elasticidade. No entanto os ajustes podem melhorar ligeiramente se houver correção do efeito dos nós nos resultados.

Nogueira (2006) estudou a correlação entre a classificação visual e a velocidade de propagação de ondas de ultrassom na madeira de *Pinus taeda* provenientes de florestas plantadas de Manduri, São Paulo. No trabalho os autores realizaram classificação visual e

ensaio de ultrassom em 24 peças de *Pinus taeda* retiradas da prancha central. O objetivo do autor era avaliar se o aumento ou diminuição da velocidade de propagação da onda de ultrassom estava associado à presença de defeitos. O autor concluiu que o método do ultrassom se mostrou adequado para ser aplicado à madeira proveniente de florestas de *Pinus taeda* com o intuito de subsidiar classificação mais rápida das peças, em detrimento à classificação visual, que é uma atividade complexa e demorada.

2.3. Resumo dos aspectos gerais e principais da revisão

De forma geral, considerando os resultados, discussões e comentários apresentados pelos autores citados, os principais aspectos de relação direta com a pesquisa são:

- O valor das propriedades de resistência e de rigidez da madeira aumenta com a idade, mas não de forma ilimitada, pois a partir de uma determinada idade (variável entre as espécies e até mesmo entre árvores) as mesmas se tornam constantes. Esse comportamento pode ser atribuído à maturidade da árvore.
- O valor das propriedades de resistência e de rigidez da madeira aumenta da medula para a casca, principalmente no caso de madeiras que já alcançaram a maturidade. Dessa forma, é possível associar a posição radial de retirada de corpos-de-prova (anéis de crescimento) com a idade da árvore, desde que esses corpos-de-prova possuam pequenas dimensões, que garantam seu posicionamento nesses anéis.
- O valor das propriedades de resistência e de rigidez da madeira diminui da base para o topo de forma constante ou apresenta aumento da base até certa altura da árvore e depois diminuição desse ponto até o topo. Esse comportamento pode estar relacionado à parâmetros anatômicos tais como o ângulo de microfibrila e o comprimento do traqueíde, ou ainda pode estar relacionado à proporção de madeira juvenil e adulta em posições mais altas do tronco. A influência desses parâmetros no comportamento da resistência e da rigidez da madeira ao longo do comprimento do tronco parece indicar que a associação da posição longitudinal de retirada dos corpos-de-prova (quanto mais alto mais jovem) com a idade será prejudicada.
- Parâmetros decorrentes do ensaio de ultrassom (V_{LL} e CLL) estão correlacionados com propriedades de rigidez e de resistência, sendo essas correlações mais fortes no caso da

rigidez. Esse comportamento é esperado uma vez que decorre da relação entre a base teórica da propagação de ondas em sólidos a teoria da elasticidade.

- Tendo em vista as correlações entre os parâmetros do ensaio de ultrassom e as propriedades de resistência e de rigidez é possível utilizar o ensaio para a classificação mecânica da madeira.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas árvores de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus grandis* oriundas de florestas de reflorestamento.

Para o *Pinus elliottii* a madeira foi obtida de 12 árvores, com seis idades distintas (8, 9, 13, 15, 22 e 23 anos). Para o *Eucalyptus grandis* a madeira foi obtida de 5 árvores, todas com 34 anos.

As árvores de *Pinus elliottii* foram provenientes de florestas situadas em Santa Catarina, pertencentes a empresa Rotta Madeiras e as árvores de *Eucalyptus grandis* provenientes de florestas em Lençóis Paulista, SP pertencente à empresa Duraflora.

As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam fotografias aéreas da localização das florestas e as Tabelas 3.1 e 3.2 detalham os dados de referenciamento geográfico das mesmas.

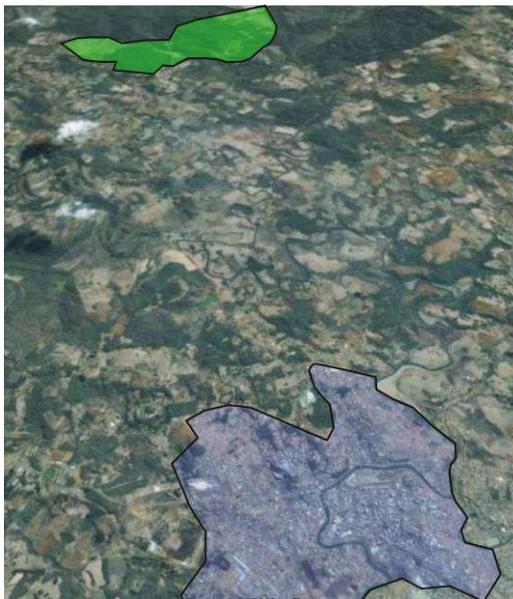


Figura 3.1: Localização da cidade de Caçador, SC (em azul) e das florestas (verde) de *Pinus elliottii*.



Figura 3.2: Identificação das florestas de *Pinus elliottii* em relação às diferentes idades

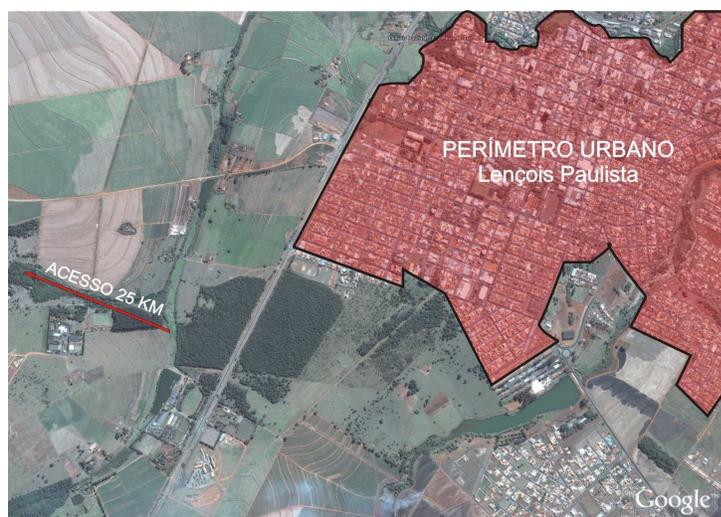


Figura 3.3. Fotos de localização das florestas de *Eucalyptus grandis*.

Tabela 3.1 – Coordenadas de referenciamentos geográficos das florestas de *Pinus elliottii* e *EucalyptusGrandis*

Espécies	Idade da floresta	Coordenadas	Altitude	Nome da fazenda
<i>Pinus elliottii</i>	8	S 26°41'16,1" / W 51°3'2,0"	1027	Ilton
<i>Pinus elliottii</i>	9	S 26°41'35,2" / W 51°3'15,5"	1080	Estação
<i>Pinus elliottii</i>	13	S 26°41'35,2" / W 51°3'15,5"	1080	Ernestino
<i>Pinus elliottii</i>	15	S 26°41'52,8" / W 51°4'21,9"	1001	Saltinho
<i>Pinus elliottii</i>	22	S 26°41'52,8" / W 51°4'21,9"	1001	-----
<i>Pinus elliottii</i>	23	S 26°41'35,2" / W 51°3'15,5"	1080	Armelinda
<i>Eucalyptus grandis</i>	35	S 22°46'17,5" / W 48°52'27,2"	--	Lençóis Paulista

No caso das árvores de *Pinus elliottii* foram retiradas, de forma consecutiva, de uma a três toras de 3,5 m (Figura 3.4). O número de toras obtidas de cada árvore dependia do diâmetro da árvore, pois esse diâmetro teria que ser suficiente para a retirada de peças de seção transversal mínima de 5 cm x 10 cm. Essa seção foi adotada em função da NBR 7190/97 que propõe que peças estruturais principais tenham área mínima de 0,005 m² e dimensão mínima da seção transversal de 0,05 m.

No caso das árvores de *Eucalyptus grandis* foram retiradas sempre 3 toras de 3,5 m sendo a primeira a partir da base, a segunda a partir de 7 m e a terceira a partir de 14 m. Tendo em vista que todas as árvores eram de 34 anos, esse procedimento visou à obtenção de

toras representativas de diferentes idades, já que o tipo de crescimento da árvore faz com que apenas na base todas as idades estejam representadas.



Figura 3.4.a - Representação da retirada das toras de Pinus.



Figura 3.4.b - Representação da retirada das toras de Eucalyptus.

3.2 Principais Equipamentos

- Equipamento de ultrassom USLab (Figura 3.5) desenvolvido pela empresa AGRICEF Soluções Tecnológicas em parceria com a Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)



Figura 3.5. Equipamento de ultrassom USLab

- Transdutores de 45 kHz de faces planas (Figura 3.6a) no caso das peças de maior dimensão e de faces exponenciais (Figura 3.6b) nas peças menores (corpos-de-prova de tração), de tal forma que o transdutor sempre ficasse circunscrito à peça ensaiada, obedecendo as prescrições da NBR 15521 (2007).



Figura 3.6a - Transdutores de faces planas.



Figura 3.6b - Transdutores de faces exponenciais.

- Câmara climática modelo MA-835; com controle de temperatura $\pm 2^\circ \text{C}$ e controle de Umidade de $\pm 5\%$, controlada por Programa de Rampas e Patamares. Essa secagem foi realizada no SENAI de Itatiba.

- Pórtico com atuador hidráulico de capacidade de carga de 500 kN, movimentado por servo válvula (Figura 3.7. a).
- Potenciômetro para medição dos deslocamentos lineares (flechas) acoplado ao pórtico. (Figura 3.7. b).
- Sistema de aquisição de dados de oito canais da HBM que permitiu a automatização das leituras de carga x deslocamentos verticais. (Figura 3.7. c).



Figura 3.7.a - Pórtico de capacidade de carga de 500 kN



Figura 3.7.b- Potenciômetro



Figura 3.7.c -Aquisitor de dados modelo Spider 8

- Máquina Universal de Ensaio DL 30000 (300 kN) da marca Emic (Figura 3.8)



Figura 3.8. Máquina universal de ensaios de capacidade 300 kN

- Extensômetros para serem acoplados aos corpos-de-prova para medições de deformações de tração e de compressão (Figuras 3.9).



Figura 3.9. Extensômetros para medições de deformações nos corpos-de-prova

- Medidor de umidade Merlin modelo PM1-E sem pinos ou eletrodos com regulagem da densidade de $0,3 \text{ g/cm}^3$ a $1,1 \text{ g/cm}^3$ de $0,01$ em $0,01 \text{ g/cm}^3$ e faixa de medição de 1 a 100% (Figura 3.10).



Figura 3.10. Medidor de umidade

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

3.3. Metodologia

3.3.1. Amostragem das vigas

Cada tora passou por sistema de identificação de idade (no caso do *Pinus elliottii*) e posição (base, meio e topo), ainda na floresta. A solução em campo foi utilizar cores para relacionar e identificar as idades (8 anos = preto; 9 anos = amarelo; 13 anos = verde; 15 anos = laranja; 22 anos = azul e 23 anos = vermelho) e anotações da posição (base, meio ou topo) com indicações das letras “B” , “M” e “T” sobre a pintura indicativa da idade. A Figura 3.11 apresenta esquema da identificação por cores para a identificação das idades e a Figura 3.12 a marcação das posições de retirada em relação ao comprimento.

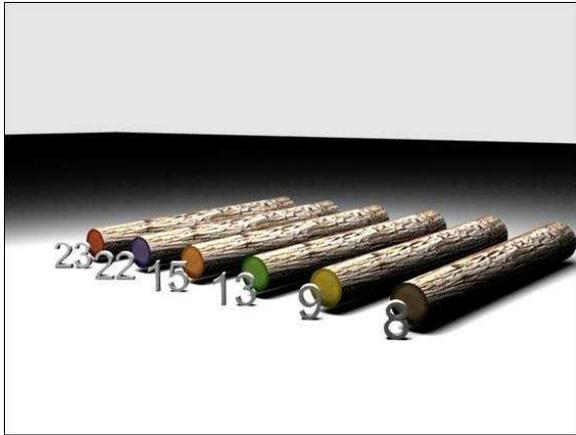


Figura 3.11. Identificação por cores nas toras de *Pinus elliottii* para as diferentes idades das árvores.



Figura 3.12. Identificação do número da árvore e da posição de retirada em relação ao comprimento (*Eucalyptus grandis*).

As toras foram desdobradas em vigas (Figura 3.13) de dimensão 0,05 m x 0,10 m.



Figura 3.13. Ilustração das vigas provenientes de uma tora

O processo de desdobro das toras de *Pinus elliottii* em vigas foi realizado na serraria da própria empresa (Figura 3.14). A idéia inicial era mapear, também, o posicionamento das vigas em relação ao diâmetro da tora, mas como o processo de desdobro nessa serraria se dá de forma aleatória, não foi possível o mapeamento deste posicionamento, mas somente do posicionamento em relação a altura da árvore.



Figura 3.14 – Desdobro das toras em vigas - empresa Rotta Madeiras em Caçador, Santa Catarina.

Para as árvores de *Eucalyptus grandis*, desdobradas em serraria contratada, foi possível acompanhar, também, a retirada das vigas em relação ao diâmetro da tora. A Figura 3.15 ilustra o esquema de desdobro das toras de Eucalipto. Esse tipo de desdobro foi utilizado na tentativa de poder associar a variação da idade, com o posicionamento da peça em relação ao diâmetro da tora. As peças retiradas mais próximas à medula seriam de madeira mais jovem enquanto as peças retiradas próximas à casca de madeira mais velha.

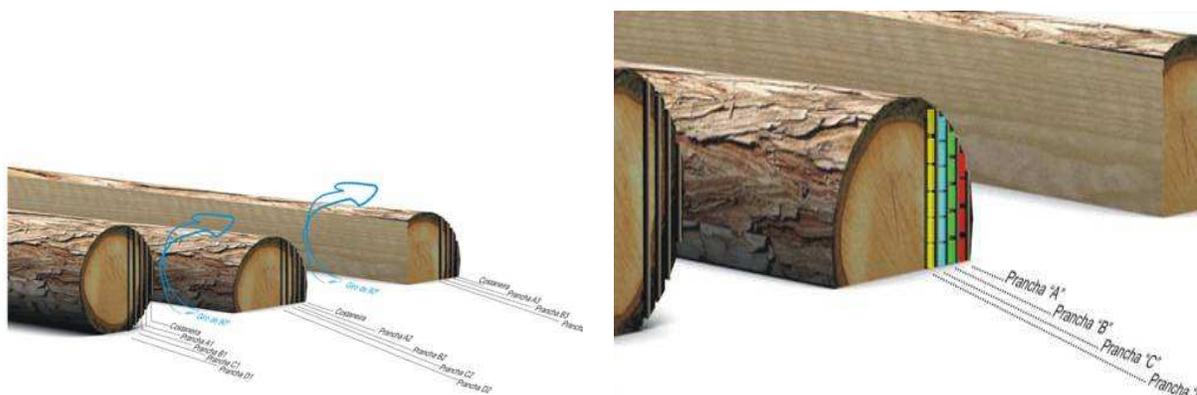


Figura 3.15. Esquema de desdobro das toras de *Eucalyptus grandis*

Posteriormente verificou-se que esse tipo de desdobro não permitiu separar e analisar as vigas provenientes de diferentes regiões em relação ao diâmetro, pois a seção da peça era grande fazendo com que, principalmente no caso das toras de menor diâmetro, as diferentes regiões ficassem misturadas não permitindo análise correta da influência da posição medula-casca. Dessa forma a avaliação não considerou a posição radial das vigas, mas somente a posição longitudinal no tronco.

As vigas retiradas de cada tora também foram demarcadas de forma a ser possível conhecer a idade da árvore (*Pinus elliottii*) e a posição de retirada em relação à altura (base, meio e topo). Para a identificação foi estabelecida codificação que obedeceu ao seguinte padrão (Figura 3.16):

- ✓ Idade (*Pinus elliottii*): Identificação por cor;
- ✓ Árvore de uma determinada idade: número 1, 2, 3, 4, 5
- ✓ Posição em relação à altura: “B” = base, “M” = meio ou “T” = topo

- ✓ Repetição: iniciando em “1” variava em função do número de vigas retiradas de cada tora.

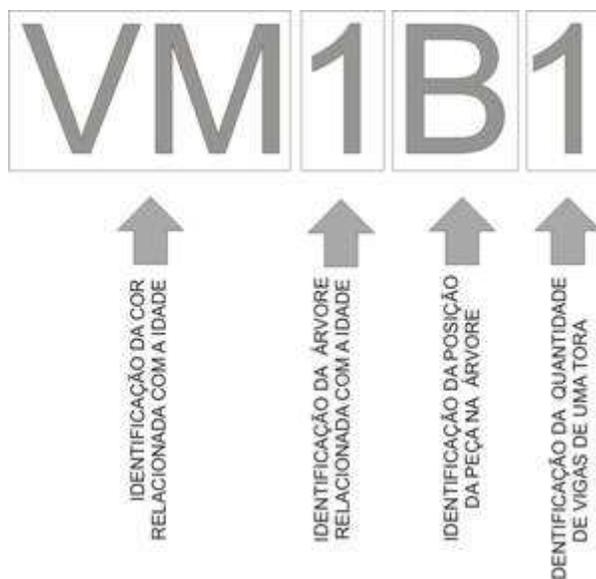


Figura 3.16. Exemplo de codificação adotada. No caso do exemplo trata-se da viga 1 retirada da base da árvore 1 de 23 anos (*Pinus elliottii*).

A Tabela 3.3 resume a amostragem de vigas obtida das árvores de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus grandis*.

Tabela 3.3. Amostragem das vigas de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus grandis*

<i>Pinus elliottii</i>				
Idade (anos)	B	M	T	Total
8	4	0	2	6
9	4	0	0	4
13	4	0	4	8
15	6	5	4	15
22	7	4	9	20
23	14	13	10	37
<i>Eucalyptus grandis</i>				
34	119	77	58	254

Após o desdobro as vigas foram imediatamente ensaiadas por ultrassom, ainda na condição saturada (Figura 3.17a) e, em seguida, encaminhadas ao SENAI de Itatiba para a secagem em câmara de climatização até atingirem 12% de umidade. O detalhamento dos ensaios de ultrassom está apresentado no item 3.3.2.1. Após a climatização, as mesmas foram encaminhadas ao laboratório onde permaneceram em local protegido e tabicadas (Figura 3.18) enquanto iam sendo ensaiadas novamente por ultrassom (Figura 3.18b) e à flexão estática.



Figura 3.17a. Ensaio de ultrassom logo após o desdobro (ainda na serraria) nas vigas saturadas



Figura 3.17b. Ensaio de ultrassom nas vigas após secagem (umidade \cong 12%)



Figura 3.18. Vigas armazenadas no Laboratório de Estruturas da FEAGRI após a secagem.

3.3.2. Ensaaios

3.3.2.1 Medições e determinação dos parâmetros de ultrassom nas vigas

Conforme já mencionado, ainda na condição saturada as vigas foram ensaiadas por ultrassom e, após a secagem na umidade de referência da NBR 7190 (1997), repetiu-se o procedimento de medição. Esse procedimento foi realizado porque a NBR 15521 (2007) prevê a classificação ou com a velocidade saturada ($V_{LL\text{ sat}}$) ou com o coeficiente de rigidez obtido com a velocidade obtida na madeira com umidade de 12% ($C_{LL\text{ seco}}$).

As medições de tempo de propagação das ondas foram realizadas, nas vigas, utilizando-se transdutores de faces planas de 45 kHz (Figura 3.6a). Para as medições os transdutores foram posicionados nas extremidades (propagação longitudinal) em três pontos da seção transversal, de acordo com a NBR 15521 (2007) (Figura 3.19).

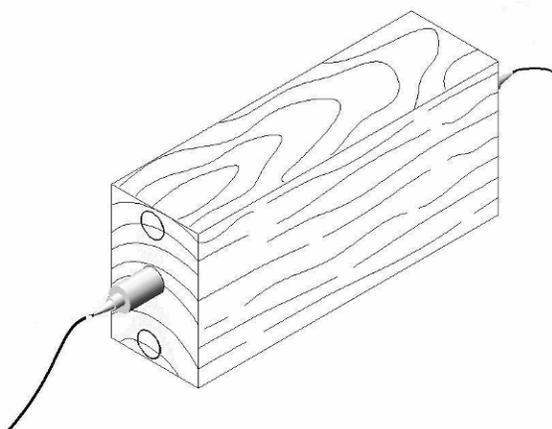


Figura 3.19. Medições de ultrassom na seção transversal (Fonte: NBR 15521/2007)

Com o valor de tempo de propagação das ondas de ultrassom (t) e o comprimento da peça (L) foram calculadas as velocidades na direção longitudinal (V_{LL}) nas três posições da viga, utilizando-se a Equação 3.1. Após a determinação de V_{LL} nos diferentes pontos da seção transversal, o valor de V_{LL} final adotado foi o intermediário, ou seja, foi eliminado o valor máximo e mínimo. Quando as velocidades nos pontos de medição apresentaram variações maiores que 10% adotou-se o valor mínimo (NBR 15521/2007).

$$V_{LL} = \frac{L}{t} \quad \text{Equação 3.1}$$

As velocidades de propagação das ondas (V_{LL}) na condição seca foram utilizadas para determinar o coeficiente da matriz de rigidez (C_{LL}) por meio da equação 3.2

$$C_{LL} = \rho V_{LL}^2 (x 10^{-6}) \quad \text{Equação 3.2}$$

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

3.3.2.2 Ensaios e determinação dos parâmetros de flexão estática

Após as medições por ultrassom, na condição de umidade de referência, as vigas foram ensaiadas à flexão estática para a determinação do módulo de elasticidade (E_M) e do módulo de ruptura (f_m). Os ensaios nas vigas foram realizados de acordo com a ASTM D198-08, uma vez que não há norma nacional para ensaios em peças de tamanho estrutural de madeira.

Os ensaios de flexão estática foram realizados em pórtico de capacidade de 500 kN e as medições dos deslocamentos verticais foram realizadas no ponto central por meio de deflectômetro eletrônico de 0,001 mm de resolução acoplado a um sistema de aquisição de dados que permite a realização das leituras de carga e de deformação automatizadas e a criação de um arquivo de dados que posteriormente foi utilizado para determinação de f_m e E_M .

De acordo com a ASTM D198 o ensaio em vigas estruturais pode ser realizado com aplicação de carga centrada, como a realizada nessa pesquisa (Figura 3.20) desde que sejam obedecidas relações mínimas entre vão livre e altura e valores máximos de dimensões da seção transversal no ponto de aplicação da carga. A definição detalhada desses critérios encontra-se no Apêndice X5.1.1 da ASTM D198, indicando que, para que este tipo de ensaio (carga centrada) não se tenha influência do cisalhamento, o vão livre mínimo da viga deverá ser de pelo menos 15 vezes a sua altura. No mesmo item a referida norma especifica que o ensaio

com carga centrada não deve ser realizado se a largura da peça a ser ensaiada for maior que 4 polegadas (0,1016 m). Considerando a seção de 0,05 m x 0,10 m e o vão livre de 2,1 m adotado para esta pesquisa, o ensaio com carga centrada pode ser realizado sem prejuízo para os resultados, pois a relação vão livre e altura foi de 21 vezes e a largura da peça está adequada aos limites estabelecidos.

A Figura 3.20 ilustra um dos ensaios sendo realizado, sendo a primeira (Figura 3.20a) a fase inicial do ensaio e a segunda (Figura 3.20b) próximo à ruptura.



(a)



(b)

Figura 3.20. Ensaio de flexão estática realizado no pórtico

O f_m e E_M foram determinados também de acordo com a ASTM D198-08. Nesta norma o f_m é calculado utilizando o momento máximo, o qual é obtido com a máxima força (P_{max}) absorvida pela viga, embora não necessariamente a ruptura ocorra com esta carga, principalmente no caso de carga centrada. O f_m foi determinado utilizando a Equação 3.3.

$$f_m = \frac{3P_{max}L}{2bh} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde: P_{max} é a força máxima, L = vão livre (distância entre os apoios); b = largura da viga; h = altura da viga

O E_M é determinado utilizando-se o trecho linear do gráfico força x deslocamento vertical. De acordo com a ASTM D198-08 usualmente se utiliza a inclinação do trecho linear do gráfico força x deslocamento vertical, mas, se os dados são obtidos utilizando sistema de aquisição, o cálculo pode ser realizado utilizando dois diferentes níveis de tensão abaixo do limite de proporcionalidade. Esta norma indica que os níveis adotados é de responsabilidade do usuário do método, mas que, se pode utilizar o trecho entre 10% e 30% ou 20% e 40% do f_m . A ASTM D198-08 alerta que o valor do E_M pode estar afetado pelo cisalhamento, principalmente se a relação vão livre altura for pequena (não obedecer os limites estabelecidos anteriormente). Tendo em vista que, nessa pesquisa, foram obedecidos os limites de L/h para minimização deste efeito, o E_M foi determinado utilizando-se a Equação 3.4.

$$E_M = \frac{(P_{40\%} - P_{20\%})L^3}{4bh^3(\Delta_{40\%} - \Delta_{20\%})} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde $P_{40\%}$ e $P_{20\%}$ são as forças com 20% e 40% de f_m e Δ_{40} e Δ_{20} os deslocamentos obtidos com 20% e 40% de f_m .

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

A aplicação do carregamento foi realizada com atuador cuja superfície apresentou raio de curvatura dentro do limite estabelecido pela ASTM D198-08 (de 2 a 4 vezes a largura da viga).

3.3.2.3 Análise dos resultados

A variação dos parâmetros do ensaio não-destrutivo (V_{LL} e C_{LL}) e destrutivo (E_M , f_m) nas vigas foi avaliada estatisticamente em função da idade para o *Pinus elliottii* e em função da posição em relação à posição longitudinal para o *Eucalyptus grandis*.

Para o *Pinus elliottii* foram avaliadas, também, as correlações entre os parâmetros do ensaio não-destrutivo (V_{LL} e C_{LL}) e destrutivo (E_M , f_m).

Para o *Eucalyptus grandis* realizou-se avaliação da adequação da classificação utilizando as faixas de classificação propostas pela NBR 15521/2007, visando avaliar a adequação ou a necessidade de calibração dos resultados para a madeira (folhosa) de reflorestamento.

Para avaliar os valores médios obtidos nos ensaios de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus grandis*, foram utilizadas as tabelas da NBR 7190/1997 (1997). Tendo em vista que os resultados dessa pesquisa se referem à ensaios de flexão, para as comparações são utilizadas as relações (Equações 3.5, 3.6 e 3.7) da NBR 7190/1997.

$$\frac{f_{mk}}{f_{tk}} = 1,0 \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde f_{mk} e f_{tk} são, respectivamente, resistência a flexão e resistência à tração paralela

$$E_M = 0,85 \text{ Eco (coníferas)} \quad \text{Equação 3.6}$$

$$E_M = 0,90 \text{ Eco (dicotiledôneas)} \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde E_M e Eco são, respectivamente, o módulo de elasticidade obtido na flexão e obtido na compressão paralela

Para os valores de f_{t0} tabelados pela NBR 7190 (1997), as resistências características (f_{tk}) foram obtidas utilizando-se a Equação 3.8

$$f_{tk} = f_{tm} - 1,65 s \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde f_{tm} é a resistência média e s é o desvio padrão.

Tendo em vista que não há, na tabela de médias da NBR 7190 (1997) os valores do desvio padrão, adota-se coeficiente de variação ($CV = s/f_{cm}$) máximo de 18%, o que resulta em

$$f_{tk} = 0,7 f_{tm} \quad \text{Equação 3.9}$$

Para o caso dos valores ensaiados f_{mk} foi obtido utilizando-se a expressão completa da NBR 7190 (1997) dada pela Equação 3.10.

$$f_{tk} = \left(2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - f_{\frac{n}{2}} \right) \times 1,1 \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde os resultados são colocados em ordem crescente $f_1 < f_2 < \dots < f_n$. O valor de f_{tk} não pode ser inferior a f_1 nem a 0,7 do valor médio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4.1 apresenta os resultados médios gerais (por idade) de velocidade de propagação da onda de ultrassom (V_{LL}) obtido nas vigas na condição saturada e densidade aparente (ρ), V_{LL} , coeficiente de rigidez (C_{LL}) e E_M obtidos nas vigas na condição seca ao ar (12% de umidade) para o *Pinus Elliottii* e para o *Eucalyptus grandis*.

Tabela 4.1 – Valores médios, por idade da árvore, de Velocidade longitudinal (V_{LL}) obtidos nas vigas na condição saturada e densidade aparente (ρ), V_{LL} , coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) obtidos em flexão, na condição seca ao ar (~12% de umidade).

Idade	Condição Saturada	Condição de equilíbrio (12 % de umidade)					N
	V_{LL} (m/s)	ρ Kg/m ³ (12%)	V_{LL} (m/s)	C_{LL} (MPa)	E_M (MPa)	f_m (MPa)	
<i>Pinus Elliottii</i>							
8	2153 (12,6)	419,5 (9,1)	3758 (11,8)	6681 (15,6)	4001 (16,7)	34,0 (19,3)	6
9	2355 (24,5)	442,6 (7,7)	3991 (9,3)	6377 (30,3)	3893 (52,6)	30,8 (34,9)	4
13	3094 (13,8)	448,4 (5,3)	4568 (10,8)	9387 (18,9)	6064 (16,3)	44,0 (15,5)	8
15	3287 (12,5)	419,4 (6,2)	4984 (10,5)	10581 (23,4)	6899 (20,7)	42,8 (26,0)	15
22	3388 (15,3)	458,7 (10)	4961 (12,1)	11587 (30,8)	7715 (23,8)	48,6 (29,7)	20
23	3187 (25,1)	453,9 (13)	4759 (15,1)	10814 (39,3)	6779 (37,5)	49,6 (41,5)	37
<i>Eucalyptus grandis</i>							
34	4772 (7)	724,0 (17)	5896 (6)	25986 (16)	15394 (20)	73 (35)	254

*Valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (%)
N= nº de vigas ensaiadas

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios de densidade aparente, resistência à tração paralela (f_t) e módulo de elasticidade na compressão (E_c) para a madeira de *Pinus elliotii* e de *Eucalyptus grandis* a 12% de umidade.

Tabela 4.2. Valores médios da NBR 7190 (1997) para densidade aparente (ρ), resistência à tração paralela (f_t) e módulo de elasticidade na compressão (E_c). Umidade de referência (12%).

Espécie	ρ kg.m⁻³	f_t MPa	E_c MPa
<i>Pinus elliottii</i>	560	66,0 (46,2)	11889 (10105)
<i>Eucalyptus grandis</i>	640	70,2 (49,1)	12813 (11532)

Valores entre parêntesis correspondem à resistência característica (f_{ik}) obtida com a Equação 3.9 e ao EM obtido pelas relações dadas nas Equações 3.6 e 3.7.

Da Equação 3.10 foram obtidos os valores de f_{mk} para o *Pinus elliottii* e para o *Eucalyptus grandis* (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 Valores obtidos para o módulo de ruptura característico (f_{mk}) obtidos com a utilização da Equação 3.10.

Idade	f_{mk} (MPa)
<i>Pinus elliottii</i>	
8 anos	24,0
9 anos	21,5
13 anos	35,7
15 anos	31,1
22 anos	34,0
23 anos	34,7
<i>Eucalyptus grandis</i>	
34 anos	51,5

Considerando as propriedades da madeira de 23 anos, a madeira de *Pinus elliottii* ensaiado nessa pesquisa apresentou valores inferiores aos indicados pela NBR 7190/1997 (Tabela 4.2) para todos os parâmetros. A densidade foi 22% inferior, o E_M 31% inferior e f_m

33% inferior. Esse resultado pode estar relacionado à questão do manejo da floresta uma vez que, no caso das florestas mais velhas, não havia, por parte desse proprietário, essa preocupação. As florestas mais jovens, no entanto, estão sendo manejadas de forma que é provável que as propriedades das mesmas sejam superiores ao atingirem 23 anos. Por outro lado a madeira de *Eucalyptus grandis* apresentou valores superiores aos indicados pela NBR 7190 (1997), com densidade 13% superior, f_{mk} 5% superior e E_M 33,5% superior. Mesmo considerando que as relações da NBR 7190 (1997) utilizadas não são as mais adequadas uma vez que foram estabelecidas para corpos-de-prova isentos de defeito e, no caso dessa pesquisa foram utilizadas vigas de tamanho estrutural com e sem defeitos, esses resultados mostram que é muito difícil, para a madeira, estabelecer valores de propriedades ou ainda relações fixas de variação dessas propriedades.

Antes do início das avaliações estatísticas relativas ao objetivo principal da pesquisa (variação com a idade), verificou-se se os resultados de velocidade saturada (V_{LLsat}) e seca ($V_{LL12\%}$), de densidade (ρ), de coeficiente de rigidez (C_{LL}), de módulo de elasticidade (E_M) e de módulo de ruptura (f_m) apresentavam distribuição normal. Essa avaliação é importante para a validação dos testes estatísticos utilizados.

Para essa análise foram utilizadas as estatísticas “skewness” e “kurtosis” e o gráfico de probabilidade normal. Para o caso das estatísticas os valores devem estar entre -2 e +2 para que os dados sejam considerados como tendo distribuição normal e, para o caso do gráfico, quanto mais o mesmo se aproximar de uma reta mais os dados se aproximam da distribuição normal. A Tabela 4.4 resume os resultados das estatísticas obtidas e a Figura 4.1 os gráficos de probabilidade normal.

Verifica-se, por meio dos valores das estatísticas, que a hipótese de normalidade pode ser aceita para todos os parâmetros, pois em nenhum dos casos as duas estatísticas apresentaram valores fora do intervalo de aceitação da hipótese de normalidade. Para o *Pinus elliottii* somente f_m apresentou uma das estatísticas fora do intervalo e para o *Eucalyptus grandis* ρ e f_m .

Tabela 4.4. Valores das estatísticas “skewness” e “kurtosis” para os resultados de velocidade na condição saturada ($V_{LL\text{ Sat}}$) e velocidade (V_{LL}), densidade (ρ), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) na condição de umidade de equilíbrio (12%).

<i>Pinus elliottii</i>						
	VLL sat	VLL	ρ	CLL	EM	f_m
skewness	-1,16742	-0,527882	1,99242	1,94905	1,81804	2,10079
kurtosis	-0,770193	-1,81215	-0,494096	-0,884056	-0,135086	-0,599075
<i>Eucalyptus grandis</i>						
skewness	-1,86472	-1,86472	-2,5327	0,0307118	0,307047	-5,641740
kurtosis	-1,94590	-1,94590	-1,24572	-0,3880610	-1,31,120	-0,159808

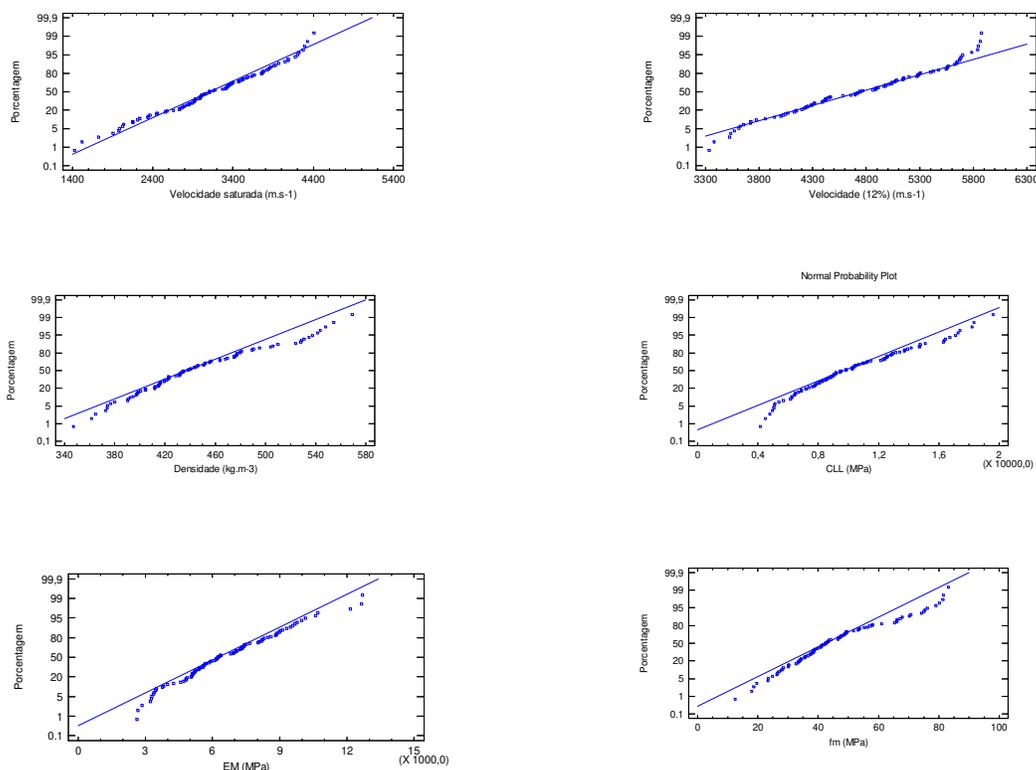


Figura 4.1. Gráficos de probabilidade normal obtido para os resultados de velocidade na condição saturada ($V_{LL\text{ Sat}}$) e velocidade (V_{LL}), densidade, coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) na condição de umidade de equilíbrio (12%).
Espécie: *Pinus elliottii*

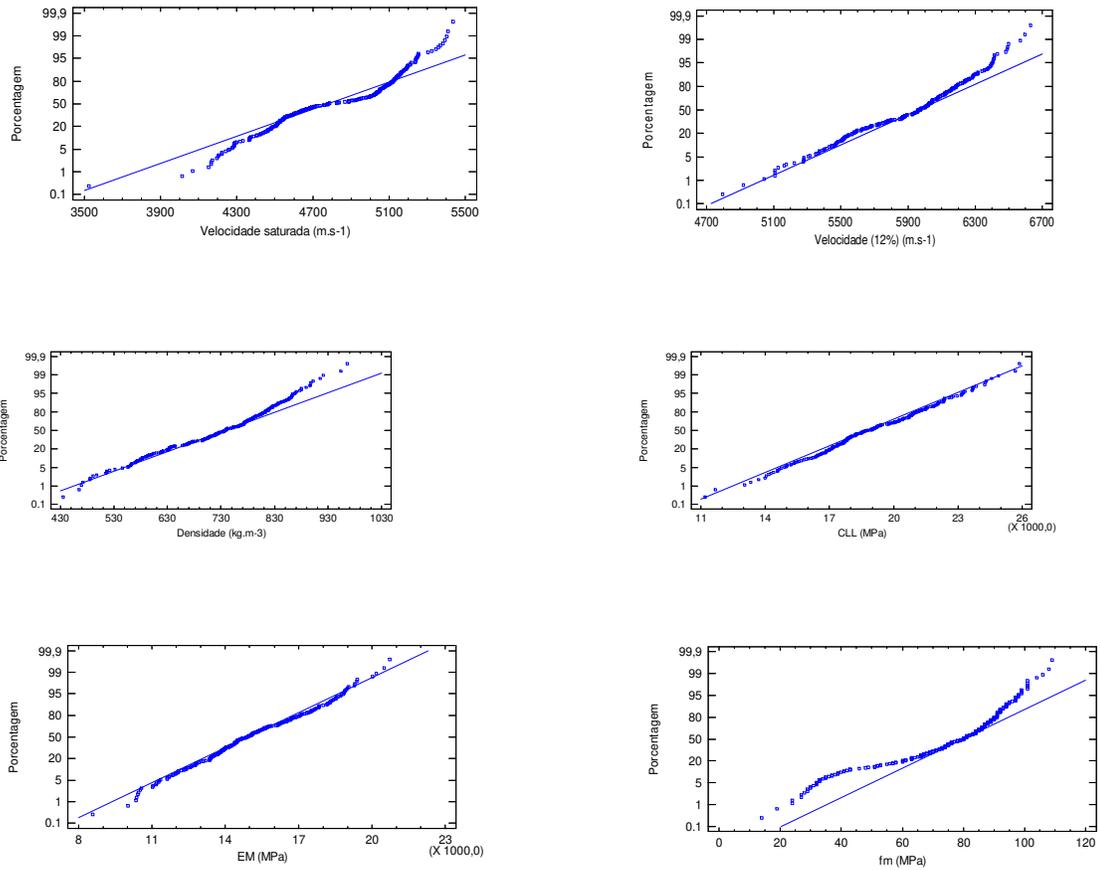


Figura 4.2. Gráficos de probabilidade normal obtido para os resultados de velocidade na condição saturada ($V_{LL\ Sat}$) e velocidade (V_{LL}), densidade, coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) na condição de umidade de equilíbrio (12%).
Espécie: *Eucalyptus grandis*

As Tabela 4.5 e 4.6 resumem os valores médios dos parâmetros dos ensaios não destrutivos e destrutivos obtidos para cada idade e para cada posição de retirada das vigas de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, respectivamente. Nessas tabelas também se pode visualizar os resultados da análise estatística realizada para verificar a existência de variações, estatisticamente significativas, das propriedades avaliadas em função da posição de retirada. Os resultados de *Pinus elliottii* para 9 anos de idade não constam da Tabela 4.5 porque para essa idade só foi possível obter a primeira tora. A análise estatística (diferença de médias) foi realizada utilizando-se o programa computacional Statgraphics. As Figuras 4.3 e 4.4 representam, de forma gráfica, os valores das Tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5 Valores médios de velocidade na condição saturada ($V_{LL\text{ Sat}}$) e velocidade (V_{LL}), densidade, coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: *Pinus elliottii*

	Tora 1	Tora 2	Tora 3
8 anos			
VLL sat (m.s⁻¹) *	2198 (7,96)		2669 (5,7)
VLL (m.s⁻¹)	3806(7,4)		4132(3,4)
ρ (kgm⁻³)	438,6 (4,14)		381,2(12,6%)
CLL (MPa)	6391 (16,8)		7260 (15,5)
EM (MPa) *	3621 (12,1)		4764 (1,32)
fm (MPa)	37,3 (3,0)		28,5(25,8)
13 anos			
VLL sat (m.s⁻¹) *	2791 (7,22)		3397 (11,0)
VLL (m.s⁻¹)*	4171 (4,2)		4965 (7,0)
ρ (kgm⁻³)*	464,6 (4,5)		432,2 (3,2)
CLL (MPa)*	8069 (3,78)		10705 (15,0)
EM (MPa)	5800 (8,45)		6328(21,6)
fm (MPa)	46,1 (5,03)		41,9(22,8)
15 anos			
VLL sat (m.s⁻¹)	3162 (5,4)	3453 (5,4)	3268 (6,4)
VLL (m.s⁻¹)	4791 (10,8)	5082 (12,62)	5150 (7,8)
ρ (kgm⁻³)	420,11 (2,7)	420,1 (3,0)	417,6 (3,3)
CLL (MPa)	9799 (10,7)	11089 (10,4)	11118 (11,6)
EM (MPa)	6788 (9,3)	6981 (9,9)	6963 (11,0)
fm (MPa)	48,4 (29,7)	38,6 (18,4)	39,8 (19,7)
22 anos			
VLL sat (m.s⁻¹)	3364 (17,5)	3601 (17,1)	3312 (13,7)
VLL (m.s⁻¹)	4668 (11,9)	5008 (14,2)	5167 (10,9)
ρ (kgm⁻³)	475,8 (9,45)	471,8 (15,8)	439,6 (5,8)
CLL (MPa)	10672 (32,6)	12379 (43,2)	11947 (23,4)
EM (MPa)	7550 (28,7)	8983 (34,3)	7279 (19,5)
fm (MPa)	53,4 (32,3)	52,2 (33,2)	43,2 (22,9)
23 anos			
VLL sat (m.s⁻¹)	3243 (22,5)	3112 (33,5)	3207 (17,9)
VLL (m.s⁻¹)	4674 (16,0)	4817 (16,7)	4804 (12,7)
ρ (kgm⁻³)	461,8 (14,6)	454,2 (15,14)	442,4 (9,0)
CLL (MPa)	10670 (41,5)	11215 (44,4)	10496 (3261)
EM (MPa)	6817(36,4)	7058 (39,8)	6365 (39,1)
fm (MPa)	55,6 (38,4)	49,7 (39,3)	40,9 (48,1)

*Existe diferença estatística entre médias com 95% de nível de confiança

Valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%)

**Resultados de *Pinus elliottii* para 9 anos de idade não constam porque para essa idade só foi possível obter a primeira tora.

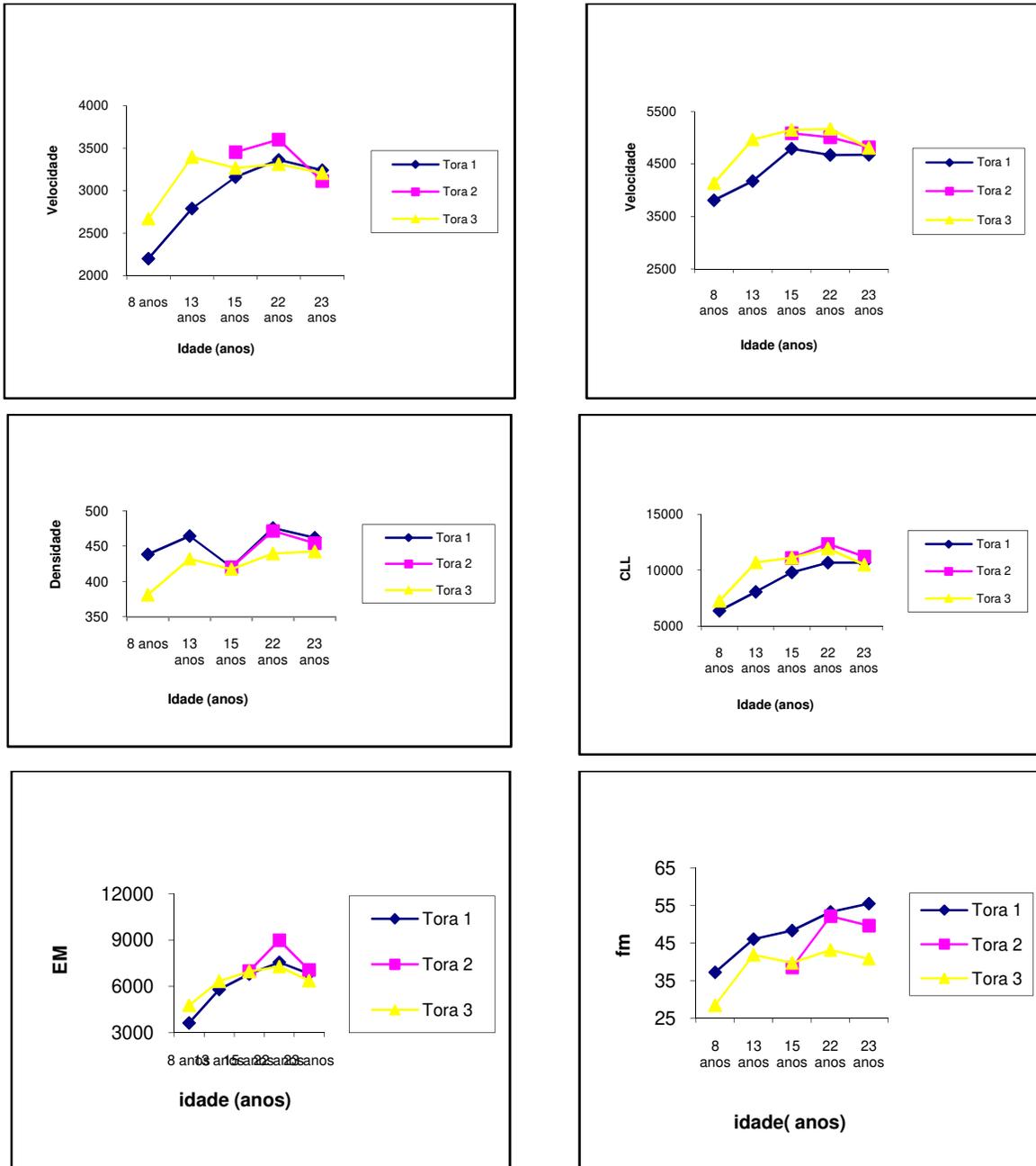
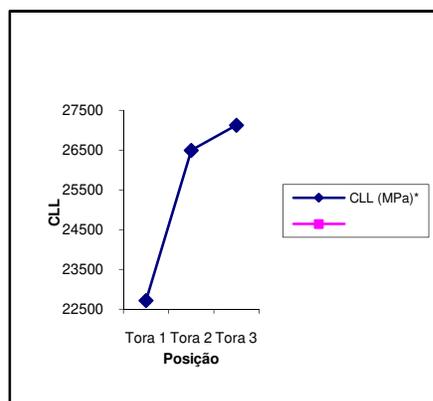
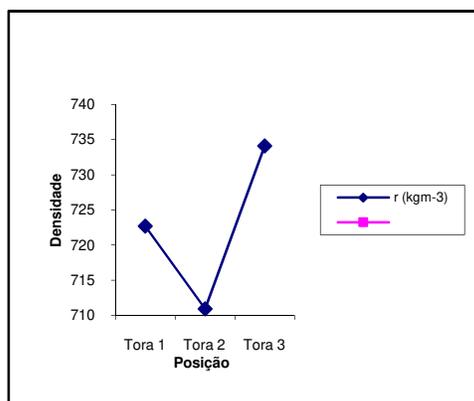
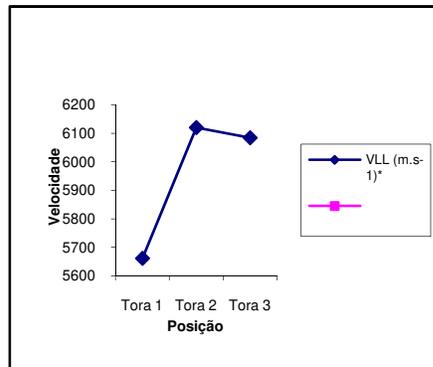
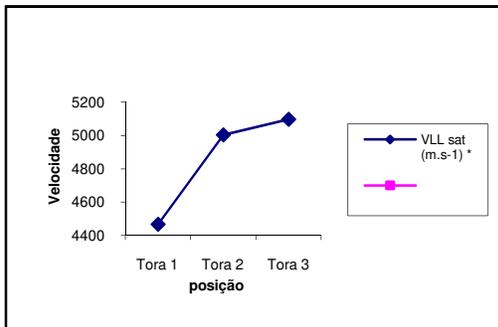


Figura 4.3 Valores médios de velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade, coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: *Eucalyptus grandis*

Tabela 4.6 Valores médios de velocidade na condição saturada ($V_{LL\text{ Sat}}$) e velocidade (V_{LL}), densidade, coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: *Curymbia citriodora*

	Tora 1	Tora 2	Tora 3
$V_{LL\text{ sat}}$ (m.s^{-1})*	4467a (4,8)	5003b (3,7)	5098c (4,27)
V_{LL} (m.s^{-1})*	5661a (5,6)	6120 b (4,14)	6084 b (3,84)
ρ (kgm^{-3})	722,7 (18,4)	710,9 (14,8)	734,1 (11,8)
C_{LL} (MPa)*	22720a (16,3)	26494b (12,6)	27131b (12,1)
E_M (MPa)*	13456a (15,5)	15857b (15,5)	16220b (14,2)
f_m (MPa)	74,2 (32,9)	70,7 (34,2)	76,0 (30,3)

*Existe diferença estatística entre médias com 95% de nível de confiança
Valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%)
Letras diferentes indicam diferenças entre média



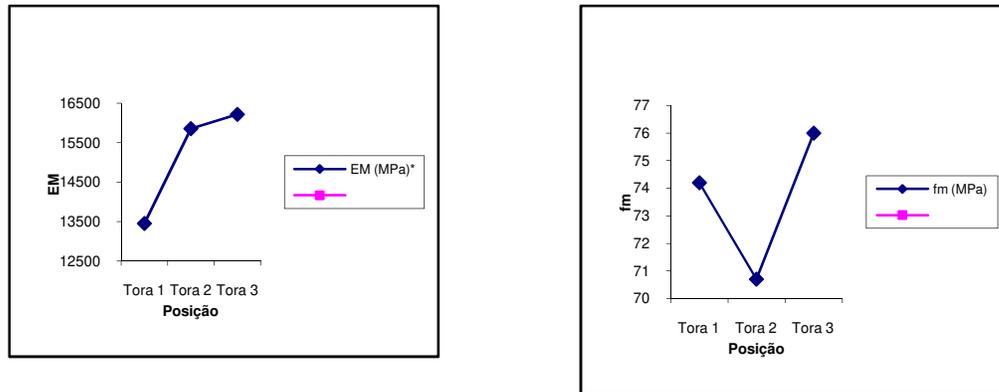


Figura 4.4 Representação gráfica da variação com a idade dos valores médios de velocidade na condição saturada (VLL Sat) e velocidade (VLL), densidade, coeficiente de rigidez (CLL), módulo de elasticidade (EM) e módulo de ruptura (fm) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: *Eucalyptus grandis*

Os resultados (Tabela 4.5) demonstram que as diferenças estatísticas entre propriedades mecânicas e acústicas, nas diferentes posições de retirada da tora em relação ao comprimento, ocorreram, para o *Pinus elliottii*, somente para árvores com idades de até 13 anos. Para árvores com idades superiores, embora numericamente haja diferença, as três toras podem ser consideradas estatisticamente iguais.

Considerando o tipo de crescimento, somente a base a árvore apresenta todos os anéis de crescimento referentes à sua idade, e, à medida que se avança em alturas haverá número menor de anéis, indicando idades menores. No entanto, como cada árvore apresenta o seu ritmo de crescimento, é difícil estabelecer essas diferentes alturas nas quais há variação de idade. Além disso, a literatura consultada e apresentada no capítulo de revisão bibliográfica, mostra que as variações das propriedades não seguem um padrão definido, decrescendo sempre da base para o topo acompanhando a diminuição de idade com a altura da árvore. Na maioria dos casos o comportamento é contrário, crescendo da base para o topo.

No caso dos resultados obtidos para o *Pinus elliottii* verifica-se que somente a densidade aparente e o módulo de ruptura foram decrescendo com a altura. Para as demais propriedades analisadas os valores foram maiores na segunda tora, quer quando havia somente duas toras ou quando havia três toras. É provável que nas árvores com mais idade, as variações

mais significativas estivessem em alturas mais elevadas do que aquelas abrangidas pelas toras retiradas, explicando a igualdade estatística.

No caso do *Eucalyptus grandis* (Tabela 4.6) somente para a densidade e para f_m não houve variação estatística dos valores com a posição longitudinal na tora. Para esses dois parâmetros os valores decresceram na segunda tora, mas voltaram a crescer na terceira tora onde atingiram os valores máximos. A velocidade na condição seca, C_{LL} e E_M tiveram o mesmo comportamento, com valores estatisticamente diferentes para as três toras e sempre crescente da tora 1 para a tora 3. A velocidade saturada também foi sempre crescente da tora 1 para a tora 3 mas as toras 2 e 3 apresentaram valores estatisticamente iguais.

O fato das propriedades aumentarem de valor nas toras superiores confirmam, como já indicado na literatura consultada e apresentada no Capítulo 2, que a retirada de peças de uma mesma árvore, variando-se apenas a posição longitudinal, não permitiu a associação com a idade. Esse resultado pode ter sido consequência de diferentes fatores, tais como interferência de outros parâmetros ou altura insuficiente de retirada das peças. No caso do primeiro fator, a hipótese é que pode ter havido, na primeira tora, influência maior de madeira dos primeiros anos de crescimento (madeira juvenil) quando comparado à partes mais altas do tronco ou ainda influência de parâmetros relacionados à anatomia, como relatado por Zhu et al.. (2005). Para o segundo fator, a hipótese é a de que não tenhamos atingido altura suficiente no tronco para que as toras representassem idades inferiores.

Para o caso do *Pinus elliottii*, tendo em vista que há, para algumas idades e para algumas propriedades, diferenças estatísticas com a posição de retirada das peças em relação à altura, a análise da variação das propriedades com a idade foi realizada de forma separada para as toras 1, 2 e 3. Além disso, para as peças retiradas de árvores de 9 anos só havia toras da base. A Tabela 4.7 resume os resultados da análise estatística de comparação de médias entre os grupos representados pelas diferentes idades e a Figura 4.5 apresenta, de forma gráfica, essas variações.

Tabela 4.7 Análise de variação de médias com a idade da velocidade na condição saturada (V_{LL} Sat) e velocidade (V_{LL}), densidade, coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: *Pinus elliottii*

	8 anos	9 anos	13 anos	15 anos	22 anos	23 anos
Tora 1 ou Tora da base						
V_{LL} sat ($m.s^{-1}$)*	2198a	2153a	2791ab	3162b	3243b	3364b
V_{LL} ($m.s^{-1}$)*	3806a	3758a	4171ab	4668b	4674b	4791b
ρ (kgm^{-3})	438,6	442,6	464,6	420,1	475,8	461,8
CLL (MPa)*	6391ab	6377a	8069abc	9799abc	10670c	10672bc
E_M (MPa)*	3621a	3893a	5800ab	6788b	7550b	6817b
f_m (MPa)*	37,3a	30,8ab	46,1ab	48,4ab	53,4b	55,6b
Tora 2						
V_{LL} sat ($m.s^{-1}$)*				3112	3453	3601
V_{LL} ($m.s^{-1}$)				4817	5008	5082
ρ (kgm^{-3})				420,0	454,2	471,8
CLL (MPa)				11089	12379	12562
E_M (MPa)*				7457	8983	7057
f_m (MPa)				38,0	52,2	49,7
Tora 3						
V_{LL} sat ($m.s^{-1}$)	2669		3397	3268	3312	3207
V_{LL} ($m.s^{-1}$)	4360		4965	51510	5167	4804
ρ (kgm^{-3})	381,2		432,2	417,6	439,6	442,5
CLL (MPa)	7260		10706	11118	11947	10496
E_M (MPa)*	4764		6328	6963	7279	6365
f_m (MPa)	28,5		41,9	39,7	43,2	40,9
Toras 1, 2 e 3						
V_{LL} sat ($m.s^{-1}$)*	2354a	2153a	3094ab	3287b	3888b	3187b
V_{LL} ($m.s^{-1}$)*	3991a	3758a	4568bc	4984c	4961c	4759c
ρ (kgm^{-3})	419,4	442,6	448,4	419,4	458,7	453,9
CLL (MPa)*	6681a	6377a	9387ab	10581b	11587b	10814b
E_M (MPa)*	4002a	3893a	6064ab	6899b	7714b	6779b
f_m (MPa)	34,35	30,8	44,0	42,8	48,6	49,5

*Existe diferença estatística entre médias com 95% de nível de confiança
Letras diferentes indicam diferenças entre médias

Verifica-se, pela Tabela 4.7 que, para a tora da base, V_{LL} (saturado e seco) e E_M apresenta dois grupos de variação com a idade – até 13 anos e acima de 15 anos. A densidade não apresentou variação estatística com a idade. No caso da tora 2 não houve diferença estatística para nenhuma propriedade. Esse resultado pode estar associado ao fato que só havia dados para as idades 15, 22 e 23 anos nas quais, pelos resultados da primeira tora, as propriedades se

estabilizaram. No caso da tora 3 o teste estatístico também indicou não haver diferença de nenhuma propriedade com a idade (P-valor > 0,05). Considerando apenas as peças provenientes de uma mesma idade, sem distinção de posição longitudinal no tronco verifica-se que V_{LLsat} , C_{LL} e E_M têm o mesmo comportamento, apresentando dois blocos – até 13 anos e acima de 15 anos. A densidade e f_m não apresentaram diferença estatística com a idade. No caso de f_m a explicação pode estar relacionada à grande influência dos defeitos, que superam a influência da idade. De maneira geral observa-se que os parâmetros destrutivos (E_M e f_m) e não destrutivos (V_{LL} e C_{LL}) apresentam comportamento semelhante em termos de variação com a idade. Esse resultado encontra-se em acordo com os obtidos por Lara Palma e Ballarin (2002) que concluíram, para o *Pinus taeda*, que a madeira juvenil estaria presente até o 14º anel de crescimento, uma vez que para a madeira adulta considera-se que as propriedades são praticamente constantes.

Considerando os valores gerais (todas as toras) da Tabela 4.7, o C_{LL} da madeira de 15 anos (10,6 GPa) foi 58% superior ao da madeira de 8 anos (6,7 GPa) enquanto V_{LL} da madeira de 15 anos (3991 m.s⁻¹) foi 25% superior à V_{LL} da madeira de 8 anos (4984). Grabianowski (2006) obteve variação de 42% para o C_{LL} e 18% para V_{LL} considerando idades de 8 e 16 anos indicando resultados próximos aos obtidos nessa pesquisa.

Os gráficos da Figuras 4.5 representam o comportamento, para a madeira de *Pinus elliottii*, dos parâmetros mecânicos que apresentaram variação estatisticamente significativa com a idade. Na Figura 4.6 se pode verificar o comportamento, para a madeira de *Eucalyptus grandis*, dos parâmetros mecânicos que apresentaram variação estatisticamente significativa com a posição de retirada ao longo do tronco.

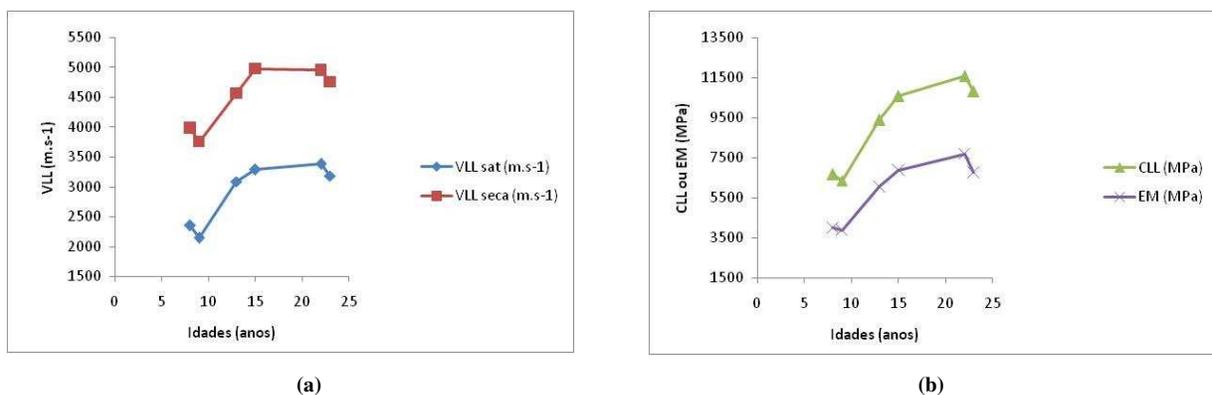


Figura 4.5 (a) Comportamento da variação da velocidade na condição saturada (VLL Sat) e seca (VLL seca) (a) e do coeficiente de rigidez (CLL) e do módulo de elasticidade à flexão (EM) (b) em função da idade da árvore de onde as vigas foram retiradas. Espécie: *Pinus elliottii*

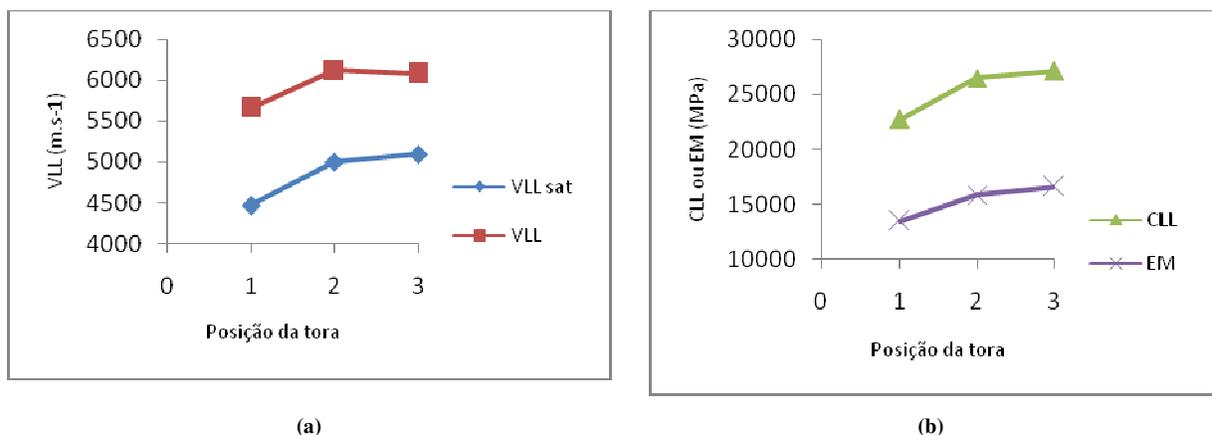


Figura 4.6 (a) Comportamento da variação da velocidade na condição saturada (V_{LL Sat}) e seca (V_{LL seca}) (a) e do coeficiente de rigidez (C_{LL}) e do módulo de elasticidade à flexão (E_M) (b) em função da idade da árvore de onde as vigas foram retiradas. Espécie: *Eucalyptus grandis*

Como já verificado por meio das análises estatísticas, o gráfico da Figura 4.5 permite verificar que, para o *Pinus elliottii*, os parâmetros destrutivos e não destrutivos apresentam rápido crescimento até 15 anos e, após essa idade, continuam crescendo de forma mais lenta ou permanecem praticamente constantes. Verifica-se, também, que o comportamento dos resultados obtidos nos ensaios não destrutivos e destrutivos apresenta a mesma tendência de variação com a idade, indicando sensibilidade do ensaio não destrutivo para detectar tais variações.

No caso do *Eucalyptus grandis* os gráficos da Figura 4.6 permitem verificar que a tendência de variação ao longo do tronco é a mesma para os ensaios destrutivos e não

destrutivos. Para V_{LLSat} , C_{LL} e E_M há um crescimento maior da tora 1 para a tora 2 e a continuidade de crescimento para a tora 3, embora com menor intensidade. A velocidade na condição seca (umidade de equilíbrio) se mostrou crescente da tora 1 para a 2 e constante da 2 para a 3. Embora não tenha sido possível estabelecer relação com a idade da árvore, ficou demonstrada a sensibilidade do ensaio não destrutivo para detectar variação de propriedades nas diferentes posições de retirada das toras, permitindo inferir que variações provenientes da idade também seriam detectadas.

Para o *Pinus elliotii*, levando em consideração a alteração na inclinação do gráfico – 8 a 15 anos e 15 a 23 anos – foram realizadas análises de regressão separando esses dois trechos. A Tabela 4.8 resume os resultados das regressões de cada parâmetro em função da idade considerando os dois trechos de variação destacados pela análise estatística. Quando P-valor da tabela de Anova é menor ou igual a 0,05 há correlação estatística entre dos parâmetros avaliados com 95% de nível de confiança. As regressões foram realizadas com todos os valores e não somente com as médias como no caso dos gráficos. Utilizando-se as médias por idade os modelos de regressão não se alteram muito, mas os coeficientes de correlação (R) aumentam significativamente, pois o número de pares passam a ser apenas 4 em lugar de 33 no trecho de 8 a 15 anos e 3 em lugar de 72 no trecho de 15 a 23 anos. No entanto, a significância do modelo se reduz quando se tomam poucos pares de valores.

Da Tabela 4.8 pode-se verificar que, acima de 15 anos não há correlação estatística entre a idade e os parâmetros dos ensaios não destrutivos e destrutivos (P-value > 0,05) indicando não haver influência da idade como já observado nos gráficos. Para o trecho de 8 a 15 anos a idade tem correlação estatisticamente significativa com os parâmetros destrutivos e não destrutivos. Considerando os modelos de regressão verifica-se que a idade tem maior influência em C_{LL} (maior coeficiente de inclinação), seguida de E_M e, por último, da velocidade. Esse comportamento também pode ser observado no gráfico da Figura 4.4.

Tabela 4.8 Modelos e parâmetros da regressão entre velocidade na condição saturada ($V_{LL\text{ Sat}}$) e velocidade (V_{LL}), densidade, coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: *Pinus elliottii*.

Regressão	R	P-value
Trecho considerando idades de 8 a 15 anos		
VLL sat = 10241 + 150*idade	0,76	0,0000
VLL seca = 2556 + 160*idade	0,70	0,0000
CLL = 1551 + 602*idade	0,66	0,0000
EM = 288 + 443*idade	0,71	0,0000
Trecho considerando idades acima de 15 anos		
VLL sat x idade	-	0,8261
VLL seca x idade	-	0,3029
CLL x idade	-	0,8064
EM x idade	-	0,9367

Para o caso do *Eucalyptus grandis* a Tabela 4.9 resume os resultados das regressões de cada parâmetro em função da posição longitudinal de retirada da tora. Da mesma forma que no caso do *Pinus elliottii* as regressões foram realizadas utilizando-se os 254 pares de resultados e não somente as médias.

Tabela 4.9 Modelos e parâmetros da regressão entre velocidade na condição saturada ($V_{LL\text{ Sat}}$) e velocidade (V_{LL}), densidade, coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) na condição de umidade de equilíbrio (12%). Espécie: *Eucalyptus grandis*

Regressão	R	P-value
VLL sat = 4175 + 349 *tora	0,81	0,0000
VLL seca = 5462 + 254*tora	0,56	0,0000
CLL = 20810 + 2413*tora	0,53	0,0000
EM = 12161 + 1559*tora	0,48	0,0000

Tanto para o *Pinus elliottii*, quanto para o *Eucalyptus grandis* o parâmetro que mais foi afetado pela posição longitudinal de retirada foi o C_{LL} , seguido do E_M , V_{LLsat} e, por último, $V_{LL\text{ seca}}$. A V_{LLsat} foi, para ambas espécies, o parâmetro que apresentou maior coeficiente de correlação com a posição de retirada.

A Tabela 4.10 resume os modelos de correlação e os parâmetros de regressão dos resultados dos ensaios não destrutivos (velocidade e coeficiente de rigidez) e destrutivos (módulo de elasticidade e de ruptura). Para essa avaliação foram considerados os ensaios nas 90 vigas de *Pinus elliottii* e 254 vigas de *Eucalyptus grandis*. A significância da correlação foi avaliada pelo P-valor e a adequação do modelo de regressão pelos gráficos de resíduos que não apresentaram tendências.

Tabela 4.10 Modelos e parâmetros da regressão entre velocidade na condição saturada ($V_{LL\text{ sat}}$) e velocidade na condição seca (V_{LL}) e coeficiente de rigidez (C_{LL}) com módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) na condição de umidade de equilíbrio (12%).

Regressão	R	P-value
<i>Pinus elliottii</i>		
$EM = -2594,61 + 2,92378 * V_{LL\text{ sat}}$	0,89	0,0000
$EM = -6452,6 + 2,75899 * V_{LL\text{ seca}}$	0,85	0,0000
$fm = -9,9291 + 0,0176829 * V_{LL\text{ sat}}$	0,74	0,0000
$fm = -27,1619 + 0,015394 * V_{LL\text{ seca}}$	0,64	0,0000
$EM = 903,022 + 0,551085 * C_{LL}$	0,91	0,0000
$fm = 10,488 + 0,0034045 * C_{LL}$	0,77	0,0000
<i>Eucalyptus grandis</i>		
$EM = -7464,66 + 4,67244 * V_{LL\text{ sat}}$	0,66	0,0000
$EM = 4452,75 + 1,76494 * V_{LL\text{ seca}}$	0,25	0,0001
$fm = 20,1946 + 0,0110065 * V_{LL\text{ sat}}$	0,18	0,0046
$fm = 179,2 - 0,0180274 * V_{LL\text{ seca}}$	-0,29	0,0000
$EM = 181,597 + 0,588643 * C_{LL}$	0,86	0,0001
$fm = -18,6356 + 0,0036619 * C_{LL}$	0,62	0,0000

Verifica-se, pelos dados da Tabela 4.10 que os coeficientes de correlação entre os ensaios não destrutivos e destrutivos foram sempre superiores para a conífera. Esse

comportamento também já foi observado por outros autores (BARTHOLOMEU, 2001; BUCUR, 2006). A explicação para esse comportamento está ligada à estrutura anatômica das coníferas, que é menos complexa do que a das dicotiledôneas, aproximando-se mais das condições teóricas da propagação de ondas.

Outro comportamento, já discutido por outros autores (BARTHOLOMEU, 2001, BARTHOLOMEU, 2007; GONÇALVES, 2000) e também observado durante os ensaios para a elaboração da NBR 15521 (2007), é a fraca correlação entre a velocidade na condição seca (umidade de equilíbrio) e os parâmetros de resistência e elasticidade nas madeiras de dicotiledôneas. Essa observação levou os responsáveis pela proposição da NBR 15521 (2007) a adotarem a classificação com base na velocidade saturada ou no coeficiente de rigidez quando a peça a ser classificada estiver na condição de equilíbrio. Esse mesmo comportamento pode ser visto nos resultados dessa pesquisa (Tabela 4.10) para o *Eucalyptus grandis*. Para essa madeira, embora as correlações tenham sido estatisticamente significantes (P-valor < 0,05), os coeficientes de correlação indicam que as mesmas são fracas.

As correlações entre ensaios não destrutivos e destrutivos são sempre superiores com propriedades de rigidez do que com propriedades de resistência. Esse comportamento, também obtido por González (2007), está relacionado aos aspectos teóricos da determinação de propriedades dos materiais por meio de propagação de ondas, já que a associação da propagação de ondas com a teoria da elasticidade demonstra que, com o ensaio não destrutivo se acede à matriz de rigidez do material. Além disso, as propriedades de resistência da madeira, principalmente aquelas ligadas à tração, como é o caso do módulo de ruptura em flexão, são fortemente influenciadas pela posição dos defeitos. Quando o ensaio de ultrassom é realizado considerando a viga como um todo (onda longitudinal com transdutores nas extremidades), um defeito afetará a propagação da onda, diminuindo a velocidade independente de sua posição. No entanto, caso esse nó esteja situado em zonas de alta tensão (proximidades do meio do vão da viga) e em zona tracionada (face inferior da viga), a tensão de ruptura será muito mais afetada do que se o mesmo estiver em uma zona comprimida ou com tensões menores. Essa diferença de comportamento do ensaio não destrutivo e destrutivo certamente afetará a correlação entre ambos. Assim, é importante que a classificação por ultrassom seja associada à classificação visual, principalmente no caso das coníferas, onde a

ocorrência de defeitos é muito maior e, no caso da madeira de reflorestamento comercializada mais jovem, cuja seção contenha presença de medula.

Considerando os resultados para o *Pinus*, os coeficientes de correlação (R) entre E_M e C_{LL} (0,91) obtidos nessa pesquisa foram muito próximos dos obtidos por Carreira et al. (2007), $R = 0,95$ e superiores aos obtidos por González (2007), 0,76. Da mesma forma, os coeficientes de correlação entre V_{LL} e E_M (0,85), V_{LL} e f_m (0,64) e C_{LL} e f_m (0,77) foram superiores aos obtidos por Carreira et al. (2007) cujos valores foram 0,53; 0,53 e 0,68, respectivamente.

Considerando as faixas de classificação da NBR 15521 (2007), utilizando os valores da rigidez de cada viga (E_M) como parâmetro de classificação (Tabela 4.11.), o *Eucalyptus grandis* estudado nessa pesquisa apresentou a distribuição apresentada no gráfico da Figura 4.6. Desconsiderando a posição longitudinal de retirada as vigas foram classificadas, em sua maioria nas classes UD 35 e UD-45, totalizando cerca de 60% das vigas. Considerando as diferentes posições longitudinais das toras verifica-se que a tora 1 (base) apresentou a maioria das vigas classificadas como UD-35 e as toras 2 e 3 como UD-45, confirmando as discussões anteriores de melhoria das propriedades com a altura de retirada das vigas.

Tabela 4.11. — Classificação por ultra-som da madeira de dicotiledônea (UD)

Classe ^a	V_{LLsat} m/s	C_{LL} 12 % MPa	E_M 12 % MPa	$f_{c0,k}$ 12 % MPa	$E_{c0,m}$ 12 % MPa
UD - 20	$V_{LLsat} < 3\ 040$	$< 10\ 620$	$< 6\ 750$	20	8\ 000
UD - 25	3\ 040 – 3\ 690	10\ 620 – 13\ 000	6\ 750 – 10\ 420	25	12\ 000
UD - 30	3\ 690 – 3\ 950	13\ 000 – 15\ 400	10\ 420 – 13\ 020	30	14\ 000
UD - 35	3\ 950 – 4\ 140	15\ 400 – 17\ 800	13\ 020 – 14\ 920	35	15\ 000
UD - 40	4\ 140 – 4\ 300	17\ 800 – 20\ 150	14\ 920 – 16\ 520	40	16\ 500
UD - 45	4\ 300 – 4\ 390	20\ 150 – 22\ 500	16\ 520 – 17\ 420	45	18\ 500
UD - 50	4\ 390 – 4\ 490	22\ 500 – 24\ 900	17\ 420 – 18\ 420	50	19\ 500
UD - 55	4\ 490 – 4\ 600	24\ 900 – 27\ 300	18\ 420 – 19\ 120	55	20\ 500
UD - 60	$V_{LLsat} > 4\ 600$	$> 27\ 300$	$E_M > 19\ 120$	60	21\ 200

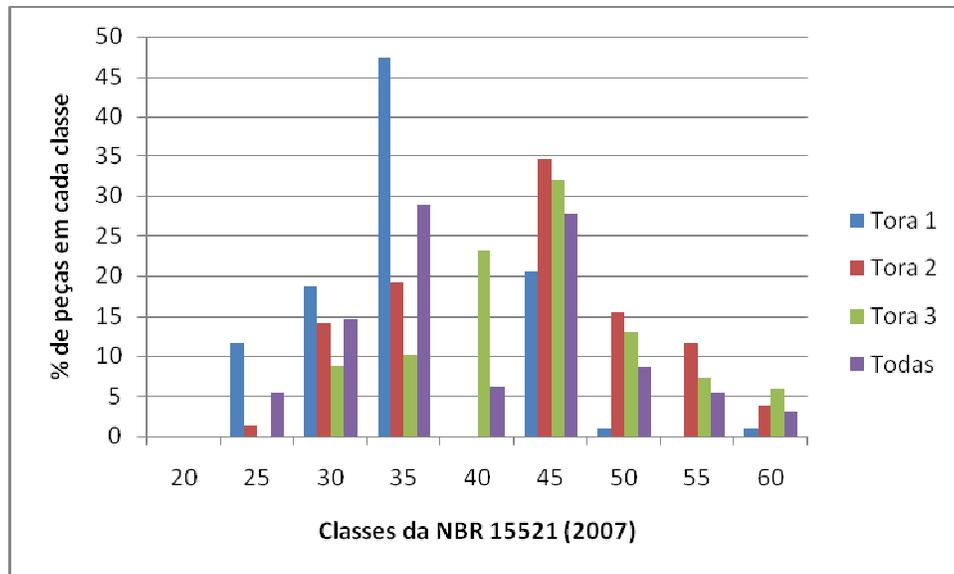


Figura 4.7. Classificação das vigas, utilizando o módulo de elasticidade (EM), de acordo com as faixas da NBR 15521 (2007)

Considerando os ensaios de ultrassom o *Eucalyptus grandis* apresentou V_{LLsat} elevadas, mas os valores de E_M não corresponderam aos esperados pelas faixas de classificação da NBR 15521 (2007). Bucur (2006) adverte que o comportamento da velocidade em madeira de rápido crescimento, como é o caso da madeira de reflorestamento, pode ser diferenciado, apresentando valores superiores aos obtidos para madeiras nativas de mesmas características de rigidez. Para verificar a porcentagem de correção à ser aplicada à V_{LLsat} , de forma que se obtivesse a mesma faixa de classificação obtida por EM, calculou-se, para cada viga, o valor de V_{LLsat} esperado obtendo-se o valor médio de 12%. Aplicando-se essa redução (12%) para cada valor de V_{LLsat} obtido nas vigas, resultou nas classificações apresentadas na Figura 4.6.

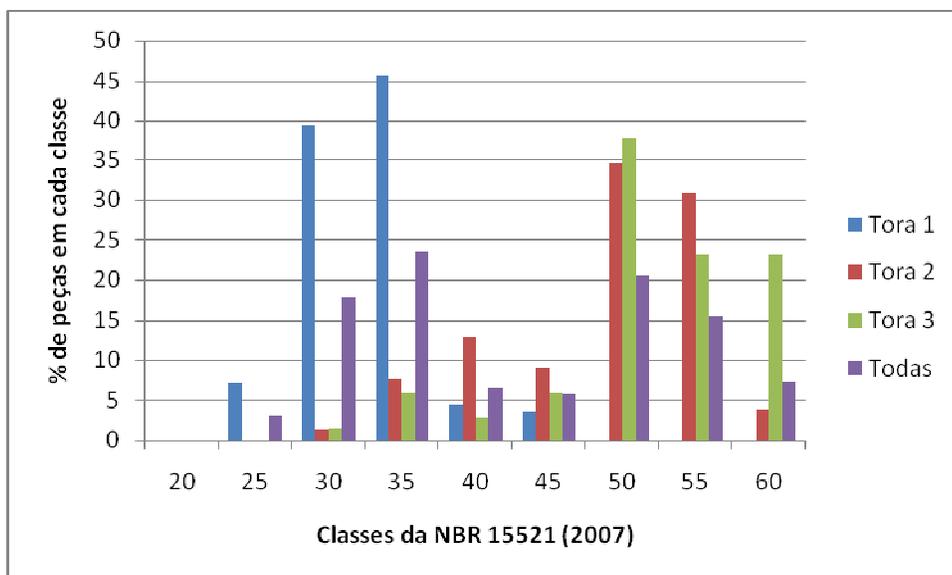


Figura 4.8. Classificação das vigas, utilizando a velocidade na viga saturada, corrigida em 12% ($V_{LLsat,corr}$), de acordo com as faixas da NBR 15521 (2007)

O gráfico da Figura 4.6 permite verificar que, para a tora 1, 45% das vigas foram classificadas como sendo da Classe UD 35 enquanto para as toras 2 e 3 a maioria das vigas foram classificadas como UD 50. Desconsiderando a posição de retirada as vigas foram classificadas, em sua maioria (cerca de 60%) nas classes UD 30, UD 35 e UD 50.

Comparando-se, de forma geral, as classificações das vigas utilizando como parâmetro o EM ou V_{LLsat} corrigido, verifica-se comportamentos próximos, com leve tendência de classificação superior quando se usa a velocidade.

É importante destacar que, as diferenças de propriedades entre as classes da NBR 15521 (2007) são muito pequenas. Por exemplo, a diferença de EM das classes UD 30 e UD 35 é de apenas 14,5%, UD 40 e UD 35 de 11% , UD 45 e UD 40 de 5% e de UD 50 para UD 45 de apenas 5,7%. Dessa forma, em uma revisão da NBR 15521 (2007) seria importante se pensar em reduzir o número de classes.

Caso a amostragem de *Eucalyptus grandis* utilizada nessa pesquisa fosse classificada utilizando os valores médios tabelados para essa espécie e as classes de resistência da NBR 7190 (1997) ela seria enquadrada na classe C 20, pois o f_{c0} tabelado é de 40,3 MPa, resultando em f_{ck} de 28,2 MPa. Do ponto de vista da rigidez média real obtida ($E_M = 15394$ MPa) essa classificação implicaria em erro de 80% contra a economia, ou seja, se estaria subestimando a rigidez em flexão das vigas.

Considerando erros máximos de 5% nos valores de E_M previstos para cada uma das 259 vigas de *Eucalyptus grandis*, conclui-se que 65% das vigas foram corretamente classificadas com base em $V_{LLsat,corr}$ e nas faixas propostas pela NBR 15521 (2007). Do restante, 20% foram classificadas com erro de 8% (7,7% contra a economia e 12,3% contra a segurança) e 15% com erros superiores a 8% (5% contra a economia e 10% contra a segurança).

Tendo em vista os comentários de Bucur (2006) a respeito da velocidade nas madeiras de reflorestamento e os resultados obtidos durante essa pesquisa, verifica-se que é imprescindível que se faça alteração ou calibração das faixas de classificação da NBR 15521 (2007) para que as mesmas sejam mais bem aplicadas à madeira de reflorestamento. Para o caso dos resultados obtidos nessa pesquisa, a calibração proposta seria a aplicação de coeficiente de redução de 12% nos valores de V_{LLsat} obtidos. Considerando os modelos de regressão entre V_{LLsat} e E_M seriam propostas faixas de classificação apresentadas na Tabela 4.12. Somente as classes UD-35 e UD-45 foram propostas uma vez que, para as demais, o número de vigas enquadradas foi pequeno. Assim, sugere-se que outros estudos sejam feitos com madeira de *Eucalyptus*, de forma que se possa obter amostragem suficiente para a proposição de coeficientes de calibração ou de novas faixas aplicáveis às dicotiledôneas de reflorestamento.

Tabela 4.12. Valores de $V_{LL,sat}$ propostos para classificação da madeira de *eucalyptus grandis* nas classes UD-35 e UD-45.

Classe	$V_{LL,sat}$ (m.s-1)
UD-35	4793
UD-45	5329

De forma geral foi possível verificar que, tanto para o *Pinus elliottii* quanto para o *Eucalyptus grandis*, o ensaio de ultrassom tem sensibilidade para detectar as diferenças provenientes da idade e da posição longitudinal de retirada das peças de forma que, a elaboração de faixas de classificação utilizando a velocidade de propagação das ondas ou o coeficiente de rigidez podem ser utilizados. No entanto, é importante destacar que as amostragens para a obtenção das faixas de classificação devem incluir madeiras jovens e maduras para que o modelo seja amplo suficiente para cobrir todas as condições. No caso da NBR 15520 (2007) os modelos e, conseqüentemente as faixas de classificação, foram obtidos considerando apenas madeiras com idades elevadas (em torno de 45 anos), o que pode prejudicar o enquadramento de madeiras de idades mais jovens nas faixas de classificação propostas. No caso de madeiras nativas essa questão não parece ser problema, já que a comercialização é realizada utilizando-se madeiras mais velhas e, portanto, adequadas à amostragem utilizada pela norma para a elaboração das faixas. No entanto, para o caso de madeira de reflorestamento, comercializada bem mais jovem, será necessário estudo que englobe, na amostragem, madeiras com idades menores.

5.CONCLUSÕES

Para o *Pinus elliottii*:

- A variação, com a idade, da velocidade de propagação das ondas de ultrassom na direção paralela às fibras (V_{LL}), do coeficiente de rigidez (C_{LL}) e do módulo de elasticidade (E_M), apresentou o mesmo comportamento, crescendo de forma mais significativa até 15 anos e, a partir dessa idade, apresentando crescimento bem menor ou constante. O C_{LL} foi mais afetado pela idade, seguido do E_M e de V_{LL} . O módulo de resistência à flexão (f_m) não apresentou variação estatisticamente significativa com a idade.
- As correlações entre os parâmetros do ensaio de ultrassom (C_{LL} e V_{LL}) e os parâmetros do ensaio estático (E_M e f_m) foram todas estatisticamente significativas. Os melhores coeficientes de correlação foram entre E_M e C_{LL} e entre E_M e V_{LLsat} . Apesar das correlações utilizando V_{LLsat} serem superiores às utilizando V_{LLseco} , as diferenças são pequenas, indicando que se pode utilizar uma ou outra sem prejuízos para a classificação. As correlações entre o ensaio de ultrassom e o parâmetro de rigidez (E_M) foram sempre melhores do que com o parâmetro de resistência (f_m).
- De posse de amostragem que englobe madeiras jovens e maduras é possível elaborar faixas de classificação de coníferas, baseadas no ensaio de ultrassom, como as que foram feitas para as dicotiledôneas (NBR 15521,2007). Essa conclusão baseia-se nas duas conclusões anteriores, ou seja, nos resultados do comportamento dos parâmetros do ensaio de ultrassom (V_{LL} e C_{LL}) e do ensaio de flexão (E_M) com a idade, bem como nas correlações obtidas entre esses parâmetros.

Para o *Eucalyptus grandis*

- Não foi possível correlacionar a posição longitudinal de retirada das vigas com a idade da madeira, pois há outros parâmetros que interferem nas propriedades de madeiras retiradas nessas diferentes posições. Era esperado que as toras retiradas da base representassem madeiras mais velhas, e que toras retiradas da parte mais superior representassem madeiras mais velhas. Sendo assim, esperava-se que a madeira da parte superior do tronco (mais jovem) apresentasse propriedades inferiores. No entanto, as propriedades cresceram da base para o topo.

- A variação, com a posição longitudinal de retirada da tora, da velocidade de propagação das ondas de ultrassom na direção paralela às fibras (V_{LL}), do coeficiente de rigidez (C_{LL}) e do módulo de elasticidade (E_M), apresentou o mesmo comportamento, crescendo da base para o topo. O C_{LL} foi mais afetado posição, seguido do E_M e de V_{LL} . A resistência à flexão (f_m) não apresentou variação estatisticamente significativa com a posição de retirada.
- As correlações entre os parâmetros do ensaio de ultrassom (C_{LL} e V_{LL}) e os parâmetros do ensaio estático (E_M e f_m) foram todas estatisticamente significativas. Os melhores coeficientes de correlação foram entre E_M e C_{LL} e entre E_M e V_{LLsat} . Os coeficientes de correlação com V_{LLseco} foram muito baixos indicando que sua utilização na classificação não seria viável, confirmando o que propõe a NBR 15521 (2007). As correlações entre o ensaio de ultrassom e o parâmetro de rigidez (E_M) foram sempre melhores do que com o parâmetro de resistência (f_m).
- Os valores de V_{LLsat} foram elevados, não se adequando às faixas de E_M propostas na NBR 15521 (2007). Para a obtenção de adequado enquadramento das faixas da NBR 15521 (2007) aos resultados de E_M foi necessário realizar calibração dos resultados aplicando-se coeficiente de redução de 12% em V_{LLsat} . Esse resultado indica necessidade de se estudarem, para espécies de reflorestamento e para madeiras dicotiledôneas comercializadas mais jovens, novas faixas de classificação ou calibração das velocidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198-08** Static tests of Timbers in Structural Sizes. Philadelphia, Pa, USA, 1984.

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

ANDREWS, M. Where **are we with sonics?** In: Proceedings, Capturing the benefits of forestry research: Putting ideas to work, Workshop 2000. October 18, 2000, Wood Technology Research Center, University of Canterbury. p. 57-61.

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

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

BALLARIN, A.W., LARA PALMA, H.A. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *pinus taeda* l. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.371-380, 2003

BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som**. 105 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Na área de concentração de Construções Rurais, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2001.

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

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

CALONEGO, Fred Willians, et al.. Mensuração do comprimento das fibras para a determinação da madeira juvenil em *Curymbia citriodora* .**SCIENTIA FORESTALIS** n. 68, p.113-121, ago. 2005

CARREIRA, M.R., et al.. Classificação de peças estruturais de *pinus sp* por ultra-som, 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...** 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

CORONEL, E. O. **Fundamento de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas.** Editora El Liberal, Santiago del Estero, Argentina, 1996.329p.

EUROPEAN STANDARD – **EN 338** - Structural timber Strength classes. 10p. 2003.

GONÇALVES, F.G., et al.. Estudo de algumas propriedades mecânicas da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.33, n.3, p.501-509, 2009

GONZÁLEZ, G.I. **Clasificación mediante técnicas no destructivas y evolución de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadria para uso estructural**, Escuela técnica superior de ingenieros de montes, (2007)

GRABIANOWSKI M, Manley B, Walker JCF. **Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. Wood Sci. Technol.** (2006) **40:205–216.**

INNES, T. C. , Processing and wood properties of four ages of *Eucalyptus oblique*, **Holz Roh Werkst** (2007) 65:197– 200

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARD – **ISO 3129** - Wood - Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. 4P, Suíça, 1975.

JANKOWSKY ,I. P. **Madeira juvenil : formação e aproveitamento industrial.** Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. circular No.81(1979).

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...Uberlândia: **IBRAMEM**, 2002, 12p. (editado em CD-Rom)

LEONELLO, E. C., et al., Delimitação da madeira juvenil e adulta de *Eucalyptus grandis* em São Paulo, Brasil. **Revista Forestal Venezolana**, Año XLI, Volumen 52(1) enero-junio, 2008, **pp.** 93-98

MASSAK, M. V. **Influência da idade da árvore na velocidade de propagação de ondas de ultrassom em peças estruturais de madeira.** 2009. Plano de Pesquisa Submetida à Banca Examinadora de Exame de Qualificação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas, 2009.

NOGUEIRA, M., Ballarin, A.W. O ultra-som como ferramenta na classificação de peças de *pinus taeda* l. In: **Seminário END Madeira, 2006, Itatiba, SP.** Anais, 9p. (editado em CD-Rom).

OLIVEIRA, S.T.J., et al.. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista árvore**. Viçosa-MG, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

OLIVEIRA, F.L., et al.. Propriedades da madeira de *Pinus taeda*. em função da idade e da posição radial na tora. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, v. 18, n. único, p. 59-70, dez. 2006.

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

SANDOZ, J. L. **Triage et fiabilité de bois de construction**. 186p. Thèse (Doctorat em Sciences Techniques) – Departement de Génie Civil, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Suisse, 1990.

SERPA p.n., et al. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *eucalyptus grandis*, *eucalyptus saligna* e *pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.5, p.723-733, 2003

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

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

WANG, X. et al.. Acoustics assessment of wood quality of raw forest materials. **Forest Products Journal**, v. 57, p. 6-14. Maio 2007.

WAUBKE, N.V. **Grundsätzliche Untersuchungen zur Eignung der Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen als vereinfachte und genauere Methode zur Klassifikation von Bauhölzern**. 56p. Institut für Baustoffkunde und Bauphysik der Hochschule der Bundeswehr München, München, Deutschland, 1981.

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