



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DE PEÇAS ESTRUTURAIS
DE EUCALIPTO UTILIZANDO ULTRASSOM**

RAFAEL GUSTAVO MANSINI LORENSANI

Campinas

FEVEREIRO DE 2013



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DE PEÇAS ESTRUTURAIS
DE EUCALIPTO UTILIZANDO ULTRASSOM**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas , para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola, na área de Concentração de Construções Rurais e Ambiente.

RAFAEL GUSTAVO MANSINI LORENSANI

Orientadora: Raquel Gonçalves

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO RAFAEL GUSTAVO MANSINI LORENSANI
E ORIENTADO PELA PROFA. DRA. RAQUEL GONÇALVES

Assinatura do Orientador

Campinas

FEVEREIRO DE 2013

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

Mansini Lorensani, Rafael Gustavo, 1983-
M378c Classificação mecânica de peças estruturais de eucalipto utilizando ultrassom
/ Rafael Gustavo Mansini Lorensani. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

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

1. Ultrassom. 2. Elasticidade. 3. Florestas - Inovação tecnológica. I.
Gonçalves, Raquel, 1961-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Mechanical classification of structural eucalyptus pieces using
ultrasound

Palavras-chave em inglês:

Ultrasound

Elasticity

Innovations, Forestry

Área de concentração: Construções Rurais e Ambiente

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Raquel Gonçalves [Orientador]

Mário Rabelo de Souza

Julio Soriano

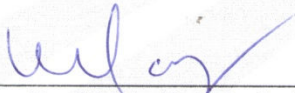
Data de defesa: 27-02-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

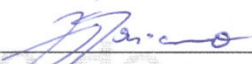
Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Rafael Gustavo Mansini Lorensani**, aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de fevereiro de 2013, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



**Profa. Dra. Raquel Gonçalves – Presidenta e Orientadora
Feagri/Unicamp**



**Dr. Mário Rabelo de Souza
Serviço Florestal Brasileiro**



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

Agradecimentos

À Professora Raquel, por ser mais do que uma simples orientadora, sendo amiga e companheira, dividindo a todo o momento sua paixão pela pesquisa.

Aos amigos do LabEND, presentes nos momentos do ensaios de laboratório e nos momentos de descontração e projetos paralelos.

À minha família, em especial à minha mãe, que me ensinou a nunca desistir quando algo parece sem solução na sua vida e a não perder a calma nos momentos difíceis.

Aos meus amigos, que são minha segunda família.

Ao *Centro de Innovación e Servizos Tecnolóxicos da Madeira de Galicia* (CISMADEIRA), à empresa Duraflora e à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALq/USP) por disponibilizarem as árvores que possibilitaram essa pesquisa.

Ao CNPq pela bolsa de estudos e apoio financeiro.

“A frase mais emocionante para se ouvir na ciência, aquela que anuncia a maioria das descobertas, não é **Eureka!**, mas **Que engraçado.**”

Isaac Asimov

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO.....	X
ABSTRACT	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE TABELAS	XIII
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 – INTRODUÇÃO.....	2
2.2 – CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA	3
2.3 – INFLUÊNCIA DA UMIDADE	21
2.4 – EUCALIPTO GRANDIS, EUCALIPTO CITRIODORA, EUCALIPTO PELLITA E EUCALIPTO GLOBULUS	25
3 – MATERIAL E MÉTODOS.....	28
3.1 – Material	28
3.2 – Retirada das vigas	28
3.3 – Ensaio de ultrassom nas vigas.....	29
3.4 – Determinação da umidade.....	31
3.5 – Determinação da velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_{LL} ou V_{LLsat})	32
3.6 – Correção da velocidade em função da umidade.....	33
3.7 – Determinação da constante de rigidez (C_{LL})	34
3.8 – Determinação do Módulo de Elasticidade (E_M)	35
3.9 – Classificação das vigas pela NBR 15521	36
3.10 – Avaliação da Classificação das vigas pela NBR 15521	37
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1 – AVALIAÇÃO DA EQUAÇÃO DE CORREÇÃO DA UMIDADE	39
4.2 – CORREÇÕES DO COEFICIENTE DE RIGIDEZ (C_{LL}) E DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (E_M) PARA A CONDIÇÃO PADRÃO DE UMIDADE (12%)	43

4.3 – CATEGORIAS DE CLASSIFICAÇÃO	47
5 – CONCLUSÕES	61
6 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
ANEXO I	69
ANEXO II.....	81

RESUMO

A Norma Brasileira que apresenta diretrizes para a classificação mecânica da madeira por meio de ultrassom (ABNT/NBR 15521, 2007) foi concebida utilizando amostragem constituída de madeiras tropicais nativas com idade média de 45 anos. O Eucalipto, proveniente de floresta plantada, tem rápido crescimento no Brasil e muitas espécies apresentam resistência adequada para serem utilizadas como elementos estruturais. Considerando que a ABNT/NBR 15521 (2007) foi elaborada com base em espécies tropicais e adultas, é possível que as faixas de classificação nela proposta não sejam adequadas para o eucalipto, comercializado com pouca idade e cujo rápido crescimento pode interferir em características de sua estrutura anatômica. Nesse contexto, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar a adequação, para a madeira de Eucalipto, das faixas de classificação e da equação de determinação da velocidade na condição saturada, a partir de valores na condição seca, propostas pela ABNT/NBR 15521 (2007). Para o desenvolvimento da pesquisa foram ensaiadas peças provenientes de árvores do gênero *Eucalyptus*, de quatro diferentes espécies (*E. grandis*, *E. citriodora*, *E. pellita* e *E. globulus*) com idades variando de 8 a 34 anos. As peças foram ensaiadas com ultrassom na condição saturada, durante a secagem e na condição de equilíbrio (12%). Nessa última condição as peças foram também ensaiadas em flexão estática de acordo com a ASTM D198-08. A análise dos resultados permitiu concluir que, para nenhuma das espécies de Eucalipto estudadas os valores de velocidade na condição saturada, obtida nos ensaios e calculada pela equação da ABNT/NBR 15521 (2007), foram estatisticamente equivalentes. A classificação das peças, utilizando as classes de resistência da ABNT/NBR 15521 (2007), foi adequada para a madeira proveniente de árvores adultas (26, 28 e 34 anos), quando se aplicou coeficiente de redução de 1,18 nos valores de velocidade obtidos nos ensaios. A classificação não foi adequada para peças provenientes de árvores jovens (8 e 10 anos). Adicionalmente a pesquisa permitiu propor, para a madeira de Eucalipto, classes de resistência e equação de determinação da velocidade saturada a partir da velocidade seca.

Palavras chave: Módulo de elasticidade, florestas plantadas, estruturas de madeira.

ABSTRACT

The Brazilian standard that provides guidelines for classifying mechanical wood with ultrasound (ABNT/NBR 15521, 2007) was designed using samples that comprise native tropical timber with an average age of 45 years. *Eucalyptus* from planted forests has rapid growth in Brazil, and many species have adequate strength to be used as structural elements. Since the ABNT/NBR 15521 (2007) was prepared based on tropical and adult species, it is possible that its proposed classification ranges are not suitable for *Eucalyptus*, which is marketed at an early age and has rapid growth characteristics that can interfere with its structure. In this context, the objective of this research was to evaluate the suitability, for *Eucalyptus* wood, of the classification ranges and the equation to determine the velocity in saturated condition proposed by ABNT/NBR 15521 (2007), from values in the dry condition. To develop this research, beams from four different species of *Eucalyptus* (*E. grandis*, *E. citriodora*, *E. globulus* and *E. pellita*) were tested, with ages ranging from 8 to 34 years. The specimens were tested with ultrasound in the green condition, through drying and equilibrium moisture content (12%). In this last condition, the beams were also tested in bending. The results showed that the velocity values in the green condition, obtained in the trials and calculated by the ABNT/NBR 15521 (2007), were not statistically equivalent for any of the species. The classification of beams, using the ABNT/NBR 15521 (2007) strength classes, was suitable for wood from adult trees (26, 28 and 34 years old) when reduction coefficient of 1.18 was applied in the velocity values obtained through tests. The classification was not appropriate for pieces from young trees (8 and 10 years old). Furthermore, the research allowed proposing, for *Eucalyptus* wood, strength classes and determination of the equation for saturated velocity from dry velocity.

Keywords: Modulus of elasticity, planted forests, wood structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Distribuição de frequência de módulos de ruptura (MPa) obtidos em corpos de prova pequenos e isentos de defeitos (a) e em peças estruturais (b) de <i>Pinnus sylvestris</i> . Fonte: Adaptado de Kretschmann& Hernandez (2006).....	4
Figura 2.2. Exemplo de relação entre Módulo de elasticidade (E_M) e Módulo de Ruptura (f_m) para a construção de classes de resistência da Norma Americana. Modelo com $R = 0,702$. Fonte: Adaptado de Kretschmann& Hernandez (2006).....	9
Figura 2.3. Modelo de regressão médio entre a velocidade longitudinal da onda ultrassônica e a tensão de ruptura (MOR) para vigas de <i>Sapin</i> e <i>Epicéa</i> . Fonte: SANDOZ, 1990 apud BARTHOLOMEU, 2001, p 24.	17
Figura 2.4. Modelo de correlação entre a velocidade longitudinal de ultrassom e o módulo de elasticidade a flexão para peças estruturais de Fichte a 12% de umidade. Fonte: STEIGER, 1996 apud BARTHOLOMEU, 2001, p 27.	19
Figura 3.1. Equipamento de ultrassom (USLab).....	29
Figura 3.2. Transdutores de 45kHz de faces planas.	30
Figura 3.3. Medição de ultrassom na viga (NBR 15521, 2007).....	30
Figura 3.4. Medidor de umidade Merlin (PM1-E).	31
Figura 3.5. Pórtico com atuador hidráulico.....	35
Figura 3.6. Esquema do ensaio da viga. Fonte: ASTM D198-08 (2008).....	36
Figura 4.1. Categorias de classificação por rigidez (E_{M12}) das peças de eucalipto utilizando os valores individualizados de velocidade na condição saturada (V_{LLsat}).	49
Figura 4.2. Categorias de classificação por rigidez (E_{M12}) das peças de eucalipto utilizando os valores individualizados de coeficiente de rigidez a 12% de umidade (C_{LL12}).	49
Figura 4.3. Distribuição das categorias de classificação das vigas de Eucalipto utilizando a Velocidade na condição saturada corrigida pelo fator 1,18 como parâmetro de classificação.	51
Figura 4.4. Modelo de regressão entre velocidade saturada (V_{LLsat} [m.s ⁻¹]) e módulo de elasticidade a 12% de umidade ($E_{M12\%}$ [MPa]) para o <i>E. grandis</i> de 8 e 34 anos.....	54
Figura 4.5. Modelo de regressão entre o coeficiente de rigidez ($C_{LL12\%}$ [MPa]) e o módulo de elasticidade ($E_{M12\%}$ [MPa]), ambos corrigidos para 12% de umidade, para o <i>E. grandis</i> de 8 e 34 anos.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Diferentes probabilidades de ruína para um mesmo valor característico ($f_{5\%}$).....	5
Tabela 2.2 – Resistência (tensões básicas de trabalho) e Rigidez (MPa) mínimas da norma Australiana (AS 2878-1986). Cada faixa de tensão é 25% maior do que a anterior.	7
Tabela 2.3 – Resistência e Rigidez (MPa) mínimas da norma Europeia (EN 338).	8
Tabela 2.4 – Resistência e Rigidez (MPa) mínimas da norma Europeia (EN 338).	13
Tabela 2.5 – Coeficientes de correlação (R) considerando os parâmetros velocidade longitudinal (V_d), E_s (módulo de elasticidade na flexão estática), σ_r (tensão de ruptura na flexão estática) e módulo dinâmico (E_d) para as 138 vigas de Fichte (<i>Picea abies</i>).	14
Tabela 2.6 – Coeficientes de correlação (R) considerando os parâmetros velocidade longitudinal (V_d), E_s (módulo de elasticidade na flexão estática), σ_r (tensão de ruptura na flexão estática) e módulo dinâmico (E_d) para as 134 vigas de Fichte (1988).	15
Tabela 2.7 – Classes de resistência segundo a SIA 164.	16
Tabela 2.8 – Faixas de classificação de vigas de <i>Sapin</i> e <i>Epicéa</i> , com teor de umidade de 12%, de acordo com as faixas de classificação da SIA 164.	17
Tabela 2.9 – Classes de resistência da EN 338 a partir de valores médios de E_M para peças estruturais de madeira com teor de umidade de 12%.	18
Tabela 2.10 – Faixas de classificação, baseadas na velocidade de propagação longitudinal de ultrassom, para peças estruturais de Fichte com teor de umidade de 12%.	19
Tabela 2.11 – Classes de rigidez de peças estruturais de madeira das espécies Cupiúba e Eucalipto Citriodora utilizando a velocidade de propagação das ondas de ultrassom (V_{vsat}).	20
Tabela 2.12 – Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Pinus elliotti utilizando a velocidade de propagação das ondas de ultrassom (V_{vsat}).	20
Tabela 2.13 – Classes de Rigidez da NBR 15521 (2007).	21
Tabela 2.14 – Modelos de Relação entre velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal (V_{LL}) e teor de umidade (MC) para a Cupiúba e Pinho do Paraná.	23
Tabela 2.15 – Dados referentes ao <i>E. citriodora</i> e ao <i>E. grandis</i>	26
Tabela 2.16 – Espécies de eucalipto e valores de densidade aparente (ρ_{ap}), módulo de elasticidade (E_{c0}) e retratibilidade volumétrica.	27

Tabela 3.1 – Espécies ensaiadas com as respectivas idades e número de vigas utilizadas durante a pesquisa.....	29
Tabela 4.1 – Valores médios, na condição de equilíbrio, de umidade (U_{eq}), de densidade aparente (ρ_{ap}), de velocidade (V_{LLeq}), de módulo de elasticidade (E_{Meq}) e de coeficiente de rigidez (C_{LLeq}) e, velocidade na condição saturada (V_{LLsat}).....	39
Tabela 4.2 – Valores médios de velocidade nas vigas provenientes das árvores.....	40
Tabela 4.3 – Intervalo de confiança para a diferença de médias entre a velocidade saturada obtida nos ensaios e obtida utilizando a equação de correção da velocidade da NBR 15521 (2007).	41
Tabela 4.4 – Modelos e parâmetros de correlação das regressões lineares entre a velocidade saturada obtida no ensaio das vigas e a velocidade saturada obtida por meio da equação de correção da velocidade da NBR 15521 (2007).	41
Tabela 4.5 – Modelos e parâmetros de correlação das regressões múltiplas considerando a velocidade saturada (V_{sat}) e seca (V_{seca}), a Umidade (U) e a densidade (ρ).	43
Tabela 4.6 – Umidades médias, valores máximos e mínimos das umidades das vigas durante a medição da velocidade na condição seca e modelos de regressão da velocidade seca em função da velocidade saturada.	45
Tabela 4.7– Correlações entre velocidades corrigidas para 12% (V_{LL12}) utilizando os modelos de Sandoz (2006) e Costa (2005) e velocidades saturadas obtidas nos ensaios (V_{LLsat}).	46
Tabela 4.8 – Valores médios de velocidade na condição saturada (V_{LLsat}), classificação média das vigas (NBR 15521, 2007) com base na V_{LLsat} , densidade aparente corrigida (ρ), coeficiente de rigidez na direção longitudinal corrigida(C_{LL}) e módulo de elasticidade em flexão estática corrigida (E_M) a 12% de umidade.....	47
Tabela 4.9 – Categorias de estimação do módulo de elasticidade (E_M) considerando as faixas da NBR 15521 (2007) e os estimadores velocidade saturada (V_{LLsat}) e coeficiente de rigidez a 12% de umidade ($C_{LL12\%}$).	48
Tabela 4.10 – Relação entre velocidade saturada estimada ($V_{Lsat,est}$) em função do enquadramento de E_M nas classes da NBR 15521 (2007) e velocidade saturada média ($V_{LLsat,médio}$) do grupo de vigas de cada espécie.....	50
Tabela 4.11 – Categorias de estimação do módulo de elasticidade (E_M) considerando as faixas da NBR 15521 (2007) e os estimadores velocidade saturada (V_{LLsat}) e coeficiente de rigidez a 12% de umidade ($C_{LL12\%}$) corrigidos.....	51
Tabela 4.12 – Modelos de Regressão entre Módulo de Elasticidade (E_M) e Velocidade longitudinal saturada (V_{LLsat}).	53

Tabela 4.13 – Faixas de classificação por ultrassom da madeira de Eucalipto proveniente de árvores com idade superior a 25 anos (<i>E. grandis</i> de 34 anos, <i>E. pellita</i> de 26 anos e o <i>E. globulus</i> de 28 anos).	58
Tabela 4.14 – Valores de velocidade na condição saturada corrigidos ($V_{LLsat, corrigido}$), de coeficientes de rigidez corrigidos ($C_{LL12, corrigido}$) e de módulos de elasticidade característicos ($E_{M12, k}$).....	59
Tabela 4.15 – Categorias de estimação do módulo de elasticidade ($E_{M, k}$) considerando as faixas da NBR 15521 (2007) e os estimadores velocidade saturada corrigida ($V_{LLsat, corrigido}$) e coeficiente de rigidez a 12% de umidade corrigido ($C_{LL12, corrigido}$).....	60
Tabela A1.1 – Dados coletados das vigas de eucalipto grandis de 8 anos.	70
Tabela A1.2 – Dados coletados das vigas de eucalipto grandis de 34 anos.	71
Tabela A1.3 – Dados coletados das vigas de eucalipto citriodora de 10 anos.	77
Tabela A1.4 – Dados coletados das vigas de eucalipto pellita de 26 anos.....	78
Tabela A1.5 – Dados coletados das vigas de eucalipto globulus de 28 anos.	80
Tabela A2.1 – Valores de assimetria e de curtose para os dados obtidos nas vigas de <i>E. grandis</i> . ..	82
Tabela A2.2 – Valores de assimetria e de curtose para os dados obtidos nas vigas de <i>E. citriodora</i>	82
Tabela A2.3 – Valores de assimetria e de curtose para os dados obtidos nas vigas de <i>E. pellita</i>	82

1 – INTRODUÇÃO

A Norma Brasileira que propõe a classificação da madeira por meio de técnica não destrutiva utilizando ultrassom, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT/NBR 15521, 2007) foi concebida utilizando propriedades de rigidez de madeiras tropicais nativas com idade média de 45 anos. Nessa norma a classificação da madeira foi proposta por meio de faixas de velocidade de propagação de ondas de ultrassom, ou de faixas de constantes de rigidez, associadas às propriedades de rigidez obtidas em ensaio de flexão estática. Dessa forma, a norma propõe que por meio do resultado do ensaio de ultrassom (faixa de velocidade ou de constante de rigidez) se determine a faixa de rigidez da madeira, dada por seu módulo de elasticidade na flexão, e assim se classifique a peça estrutural.

No entanto, atualmente utilizam-se grandes quantidades de madeira proveniente de florestas plantadas, as quais são comercializadas em idades muito inferiores à utilizada pela ABNT/NBR 15521 (2007) na amostragem adotada para a determinação estatística das faixas de classificação. Adicionalmente, árvores de florestas plantadas têm crescimento rápido no Brasil, em virtude dos altos índices de luz solar e das elevadas temperaturas, que favorecem a atividade biológica. Segundo a literatura, essa condição de crescimento pode fazer com que a estrutura anatômica dessas árvores apresente diferenciação (ângulo de microfibrila e densidade do lenho tardio) quando comparada à estrutura anatômica de espécies tropicais nativas. Essa questão, associada à idade de comercialização da madeira, faz com que seja necessário avaliar a adequação de propostas de classificação elaboradas com base em resultados obtidos em espécies tropicais adultas, como é o caso da ABNT/NBR 15521 (2007).

Assim sendo, a hipótese dessa pesquisa foi a de que as faixas de classificação da ABNT/NBR 15521 (2007) não são adequadas para classificar a madeira de Eucalipto, sendo necessário propor coeficiente de correção ou novas faixas para que a metodologia de classificação proposta na norma apresente resultados adequados.

Com base na hipótese, o objetivo geral da pesquisa foi avaliar o enquadramento, nas classes da ABNT/NBR 15521 (2007), da rigidez de peças de madeira de eucalipto de

diferentes espécies e idades, em função da velocidade de propagação das ondas de ultrassom e do coeficiente de rigidez.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Introdução

A madeira caracteriza-se por ser um compósito natural, heterogêneo, viscoelástico e que, por sua estrutura celular complexa, mas ordenada, apresenta três planos principais. Por apresentar comportamentos elásticos diferenciados em cada um dos planos principais, para que seja possível sua caracterização mecânica completa, faz-se necessário assumir que suas propriedades possam ser representadas por um meio homogêneo equivalente, nesse caso, um sólido ortotrópico.

Combinando, por meio das deduções de *Christoffel*, a *Lei de Hooke generalizada*, que relaciona a tensão à deformação por meio da matriz das componentes elásticas do material, com a segunda *Lei de Newton*, é possível obter equações matemáticas que relacionam a velocidade de propagação de ondas e a densidade do material com a rigidez, resultando assim na matriz de rigidez do mesmo.

A matriz de rigidez de um material ortotrópico contém nove constantes independentes, seis delas na sua diagonal e 3 delas fora da diagonal (Eq. 2.1).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{12} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde:

σ = componentes de tensão

C = componentes da matriz de rigidez

γ = componentes de deformações

De posse da matriz de rigidez é possível, por meio de sua inversão, obter-se a matriz de flexibilidade, que se relaciona com as constantes elásticas e, assim, caracterizar de forma completa esse material. (BUCUR, 2006).

Para o caso da classificação da madeira, foco dessa pesquisa, é usual que se utilize modelos de correlação entre o primeiro termo da matriz de rigidez (C_{11} ou C_{LL}) com o módulo de elasticidade do material nessa mesma direção (longitudinal - E_L), não sendo, portanto, necessária obtenção dos demais termos.

De forma ainda mais simplificada, a classificação pode ser realizada utilizando-se modelos de correlação do módulo de elasticidade do material (E_L) diretamente com a velocidade longitudinal de propagação das ondas na direção paralela às fibras (V_{LL}). Esses modelos normalmente são menos precisos (menores coeficientes de correlação), mas em termos práticos de mais fácil aplicação, o que faz com que haja interesse em sua utilização pelo setor produtivo.

2.2 – Classificação da madeira

A classificação de peças de madeira em uma serraria pode significar maiores ganhos para os profissionais que comercializam a madeira, uma vez que toda a madeira é valorizada, havendo a separação das peças de maior resistência para aplicações que exijam essa condição, mas o uso das de menor resistência não é descartado, á que se pode destinar esse material para aplicações nas quais a resistência não seja a limitação. Por outro lado, para os profissionais que atuam no dimensionamento de estruturas de madeira, a classificação permite maior confiabilidade do projeto, já que a madeira é material com alta variabilidade natural, dificultando o uso de tabelas com valores médios de suas propriedades.

A classificação da madeira estrutural é, normalmente, baseada em modelos de correlação entre uma propriedade de mais fácil mensuração e outras propriedades que se deseja determinar.

Texto bastante completo a respeito da elaboração de normas de classificação da madeira foi publicado pelo *Forest Products Laboratory, USDA*, EUA. Esse texto, de

autoria de Kretschmann & Hernandez (2006), será a fonte de grande parte do conteúdo deste item da Revisão Bibliográfica.

Segundo Kretschmann & Hernandez (2006) a classificação mecânica baseada em valores obtidos em corpos de prova pequenos e livre de defeitos é muito falha. Dentre os aspectos destacados para essa afirmação encontra-se a diferença entre coeficientes de variação de propriedades obtidas em corpos de prova e em peças estruturais e a distribuição de frequência dos resultados de resistência e de rigidez. No caso de corpos de prova sem defeitos a distribuição normalmente apresenta simetria, enquanto em peças estruturais com presença de defeitos não é simétrica (Figura 2.1). Por meio dos valores apresentados na Figura 2.1 verifica-se que a resistência característica obtida para os corpos de prova foi de 31,5 MPa enquanto para as peças estruturais foi menor do que 25 MPa. Os mesmos autores apresentam tabelas de coeficientes de variação de propriedades que mostram que a variabilidade de valores obtidos em corpos de prova isentos de defeitos pode ser bem inferior àqueles obtidos em peças estruturais.

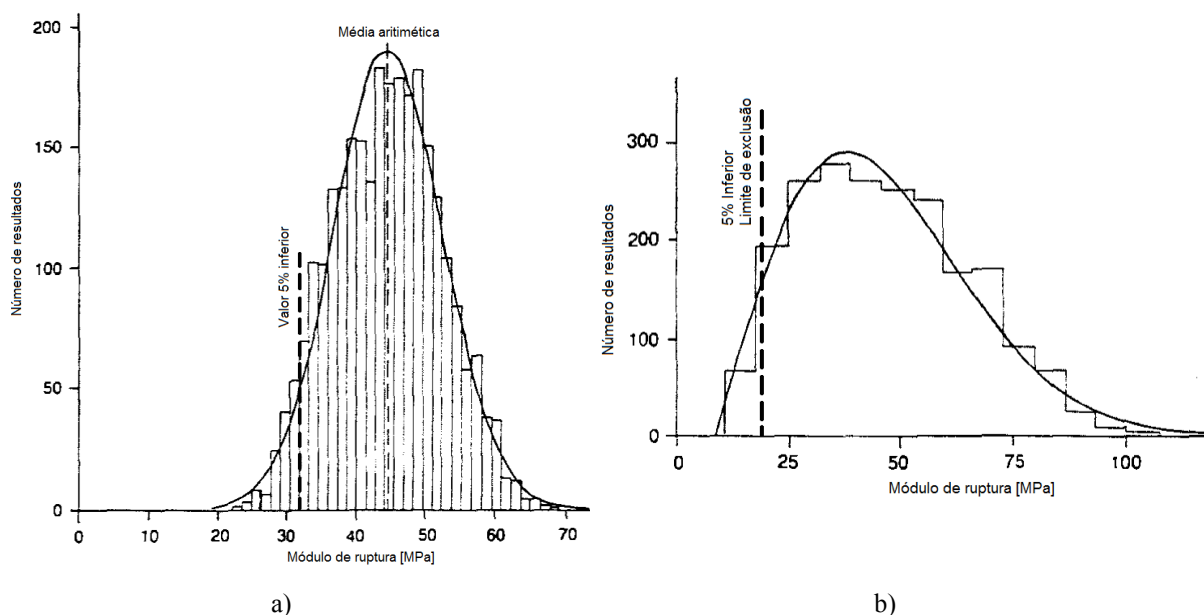


Figura 2.1. Distribuição de frequência de módulos de ruptura (MPa) obtidos em corpos de prova pequenos e isentos de defeitos (a) e em peças estruturais (b) de *Pinus sylvestris*. Fonte: Adaptado de Kretschmann & Hernandez (2006).

Sandoz (1990) também destaca que a variabilidade da amostra pode ser algo muito grave para a classificação da madeira, pois amostras de madeira com diferentes valores

médios de resistência e diferentes valores de coeficiente de variação podem apresentar o mesmo valor característico, mas probabilidades de ruína muito diferentes (Tabela 2.1). Considerando uma classificação realizada com base em valores característicos obtidos em corpos de prova retirados da amostra, que em geral apresenta menor variabilidade do que as peças estruturais, a probabilidade de ruína pode ser muito superior à esperada quando consideradas as peças estruturais.

Tabela 2.1 – Diferentes probabilidades de ruína para um mesmo valor característico ($f_{5\%}$).

Amostra	Média [MPa]	Desvio [MPa]	CV [%]	$f_{5\%}$ [MPa]	Probabilidade de ruína
1	60	21,2	35,3	25	0,0083
2	55	18,2	33,1	25	0,0067
3	50	15,2	30,3	25	0,00469
	45	12,1	26,9	25	0,0025
5	40	9,1	22,7	25	0,000748
6	35	6,1	17,3	25	$4,15 \cdot 10^{-5}$
7	30	3,0	10,1	25	$2,47 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Adaptado de Sandoz (1990)

Kretschmann & Hernandez (2006) também argumentam que a classificação da madeira com base em corpos de prova pequenos e isentos de defeitos foi proposta em uma época na qual era relativamente fácil obter grandes peças, que permitiam a obtenção de corpos de prova com os eixos perfeitamente perpendiculares e com nenhum defeito, já que isso só é possível com o uso de toras com grande diâmetro. Os autores finalizam dizendo que essa não é a realidade atual. Além disso, argumentam que o modo de ruptura de pequenos corpos de prova em flexão é muito diferente daquele obtido em peças estruturais, e que definitivamente a resistência característica tem que ser obtida por meio de avaliação de peças de dimensões estruturais. Os autores também comentam que em virtude desta discussão, um grande programa de classificação de peças estruturais, denominado “*In-Grade*” foi realizado nos Estados Unidos (GREEN et al., 1989 apud KRETSCHMANN & HERNANDEZ, 2006) e, desde então, as normas para a classificação da madeira de construção abandonaram o uso de corpos de prova.

Quando se discute classificação da madeira é necessário comentar aquelas que são baseadas em análise visual das peças estruturais. Normalmente a classificação visual impõe

limites para a dimensão dos nós e inclinação das fibras e, também, limitam a densidade mínima admitida para uma determinada classe. No entanto, muitos outros critérios podem ser adicionados, tais como rachaduras, presença de medula e de deterioração, distância entre anéis de crescimento etc. Segundo os autores as principais características da classificação visual são:

- Não requer alto grau tecnológico;
- É seguro, mas ineficiente quando utilizado de forma isolada;
- É trabalhoso, mas rápido;
- É viável para pequenas serrarias e lojas que vendem madeira por não exigir equipamentos;
- Permitem rápida separação das peças com defeitos inaceitáveis, antes da aplicação da classificação mecânica;
- É bem aceita no mercado Americano e Europeu, principalmente (KRETSCHMANN & HERNANDEZ, 2006).

Kretschmann & Hernandez (2006) mencionam ainda que a correlação entre a dimensão do nó e a resistência a flexão é fraca e que o principal causador do efeito do nó é o desvio da fibra em sua proximidade. Destaca ainda que o maior efeito do nó ocorre na tração, que na flexão seu efeito é dependente da localização (borda comprimida ou tracionada) e que na compressão é praticamente inexistente.

A Austrália foi o primeiro país a implementar a classificação mecânica independente da espécie (classes de resistência), ou seja, considerando as espécies agrupadas. Esse tipo de classificação é especialmente favorável em regiões tropicais, onde há centenas de diferentes espécies no mercado, tornando a identificação inviável (KRETSCHMANN & HERNANDEZ, 2006). Além disso, espécies de aparência semelhantes podem ter propriedades completamente diferentes (KRETSCHMANN & HERNANDEZ, 2006), tornando a classificação apenas visual ineficiente.

A norma Australiana (AS 2878 - 1988) contempla 12 classes resistentes para a madeira estrutural (Tabela 2.2) enquanto a norma Europeia (EN 338) 9 classes (Tabela 2.3). De forma geral, as classes de resistência são estabelecidas em função de ensaios de flexão em peças estruturais (módulo de elasticidade e tensão de ruptura) e as demais propriedades (compressão, tração e cisalhamento) são propostas por meio de correlações. As classes de resistência são estabelecidas por cada país e os valores apresentam grandes variações. A

norma americana não contempla classes de resistência de espécies agrupadas. No entanto, a ASTM D1990 contém procedimentos para o cálculo das propriedades de projeto para grupos de espécies a partir de ensaios em peças com dimensões estruturais.

Tabela 2.2 – Resistência (tensões básicas de trabalho) e Rigidez (MPa) mínimas da norma Australiana (AS 2878-1986). Cada faixa de tensão é 25% maior do que a anterior.

Classe	f_m	f_t	f_v	f_c	E_M
F34	34,5	20,7	2,45	26,0	21500
F27	27,5	16,5	2,05	20,5	18500
F22	22,0	13,2	1,70	16,5	16000
F17	17,0	10,2	1,45	13,0	14000
F14	14,0	8,4	1,25	10,2	12000
F11	11,0	6,6	1,05	8,4	10500
F8	8,6	5,2	0,85	6,6	9100
F7	6,9	4,1	0,70	5,2	7900
F5	5,5	3,3	0,60	4,1	6900
F4	4,3	2,6	0,50	3,3	6100
F3	3,4	2,0	0,45	2,6	5200
F2	2,7	1,6	0,35	2,1	4500

Fonte: Adaptado de Kretschmann & Hernandez (2006)

f_m = resistência a flexão; f_t = resistência a tração; f_v = resistência ao cisalhamento; f_c = resistência à compressão e E_M = módulo de elasticidade em flexão.

Tabela 2.3 – Resistência e Rigidez (MPa) mínimas da norma Europeia (EN 338).

Classe	f_m	f_t	f_c	E_M
C14	14	8	4,3	7000
C16	16	10	4,6	8000
C18	18	11	4,8	9000
C22	22	13	5,1	10000
C24	24	14	5,3	11000
C27	27	16	5,6	12000
C30	30	18	5,7	12000
C35	35	21	6,0	13000
C40	40	24	6,3	14000

Fonte: Adaptado de Kretschmann& Hernandez (2006)

f_m = resistência a flexão; f_t = resistência a tração; f_c = resistência à compressão e E_M = módulo de elasticidade em flexão.

O procedimento geral para a classificação da madeira estrutural na Europa e nos Estados Unidos consiste em, primeiramente, separar visualmente o lote em subpopulações. Esse procedimento não elimina a variabilidade de propriedades, mas a reduz, aumentando a precisão da classificação. As propriedades mecânicas são então determinadas utilizando-se peças estruturais (independente do método de ensaio), seguindo as normas específicas de cada local (Ex: EUA a D198 e Europa a EN 384), e os valores característicos (5% de probabilidade de serem ultrapassados) são determinados e, posteriormente, modificados por coeficientes que levam em conta as condições de serviço (umidade, duração do carregamento e segurança) para o cálculo da resistência de projeto.

Os ensaios para enquadramento da amostra em classes de resistência são realizados por meio de ensaios não destrutivos (máquinas de classificação, métodos de propagação de ondas etc.). O parâmetro de classificação por meio desses métodos é, normalmente, o módulo de elasticidade (E_M) e a determinação dos demais parâmetros de resistência e de rigidez são obtidos por correlações com E_M . Por meio dos modelos de correlação se determinam os limites correspondentes ao percentil de 5%, os quais são utilizados para a determinação das classes de resistência (Figura 2.2).

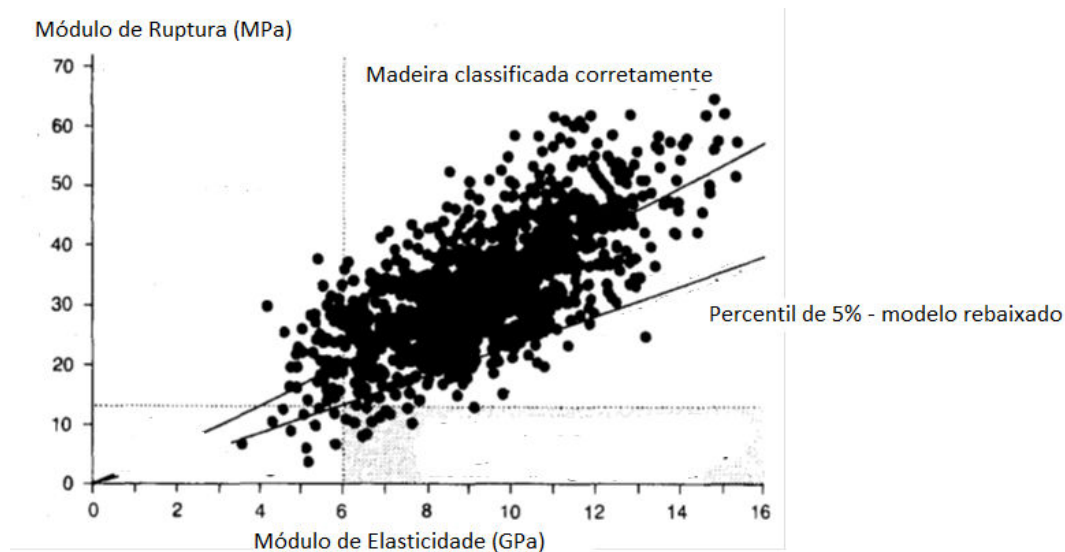


Figura 2.2. Exemplo de relação entre Módulo de elasticidade (E_M) e Módulo de Ruptura (f_m) para a construção de classes de resistência da Norma Americana. Modelo com $R = 0,702$. Fonte: Adaptado de Kretschmann & Hernandez (2006).

O modelo que representa a curva rebaixada (percentil de 5%) é usado em função da variabilidade inerente do material, da influência de defeitos nas peças estruturais e, também, da dificuldade na obtenção, para a madeira, de modelos de regressão com coeficientes de correlação elevados. Segundo Kretschmann & Hernandez (2006), para a madeira, os coeficientes de correlação (R) dos modelos utilizados para a determinação das classes de resistência estão, normalmente, entre 0,5 e 0,85. Embora esses valores de R pareçam baixos, Kretschmann & Hernandez (2006) comentam que o coeficiente de correlação R entre a classificação visual e o f_m é em torno de 0,3 a 0,4; ou seja, bem menores do que os obtidos com a utilização das correlações com E_M .

Essencialmente, a classificação é focada nos limites inferiores de resistência que as peças podem ter para serem classificadas em uma determinada faixa, já que são elaboradas utilizando modelos que representam faixas com apenas 5% de chance de possuírem valores inferiores de resistência.

Ainda segundo Kretschmann & Hernandez (2006), espécies plantadas de rápido crescimento (como é o caso do pinus e do eucalipto no Brasil e outros países de clima

tropical) têm sido pouco aceitas em mercados dos EUA e da Europa, por haver desconfiança quanto as propriedades mecânicas, fazendo com que a classificação mecânica seja importante para a comprovação das propriedades destas espécies. Os autores indicam que os elevados ângulos de microfibrilas seriam os principais responsáveis pela baixa resistência e rigidez da madeira com rápido crescimento.

O texto de Kretschmann & Hernandez (2006) propõe categorias de enquadramento da madeira em normas de classificação, correspondente ao material que foi corretamente aceito (peças com resistência e rigidez suficientes), material que foi aceito de forma incorreta (peças com resistência ou rigidez insuficientes) e material que foi rejeitado corretamente (peças que não atingiram suficiente valor de resistência e de rigidez). Segundo os autores somente é considerado problema o material que foi aceito de forma incorreta, sendo este o motivo para se utilizar, em normas de classificação, o modelo inferior ou rebaixado (percentil de 5%), pois o uso do modelo de regressão médio acarretaria número de erros desse tipo muito superior. Por outro lado, a porcentagem de material classificado abaixo de sua capacidade real certamente será muito grande, mas esse comportamento já é esperado neste tipo de classificação (usando o modelo inferior).

No Brasil, o fato de se trabalhar com a madeira de folhosa classificada (de forma visual e mecânica) implicaria no uso de coeficiente de modificação, que leva em conta a qualidade do material ($k_{mod,3}$) com valor 1,0 ao invés do $k_{mod,3} = 0,8$ referente a madeira não classificada (ABNT/NBR 7190,1997). Esse acréscimo no $k_{mod,3}$ implica em menores reduções da resistência de cálculo e, portanto melhor aproveitamento da madeira. No entanto, o maior ganho do uso da madeira classificada está no conhecimento mais adequado das propriedades, por parte dos profissionais que utilizam desse material em seus projetos. Na situação atual tais profissionais, em geral, recorrem ao uso de tabelas com propriedades de espécies, as quais nem sempre são coincidentes com o material adquirido. Na melhor das hipóteses utiliza-se a caracterização simplificada da NBR 7190 (1997), baseada no ensaio de compressão paralela em seis corpos de prova pequenos e isentos de defeito.

Para validar a utilização do método de ultrassom como forma de classificar peças estruturais de madeira, diversas pesquisas vêm sendo realizadas visando analisar a correlação da velocidade de propagação das ondas com a classificação visual proposta em normas nacionais e internacionais. Apesar de a classificação visual possibilitar a

identificação de defeitos externos, tais como nós e desvios de fibras, que podem implicar na diminuição da classe de resistência, essa avaliação, de forma isolada, não permite garantir a resistência e a rigidez da madeira. Um grupo de peças de mesma espécie que não contenham defeitos não necessariamente apresenta resistência e rigidez iguais, de forma que é possível que nem todas estejam enquadradas em uma mesma classe resistente. Adicionalmente, o ultrassom é capaz de identificar variações provenientes de defeitos internos, rachaduras, desvios de fibras, nós, além de diferenças na estrutura celular da madeira, o que não ocorre na inspeção visual.

Ballarin e Nogueira (2006) utilizaram 6 árvores de *Pinus Taeda L.* com 34 anos de idade, desdobradas em 24 pranchas de 300 mm x 80 mm x 2300 mm. Cada uma das toras foi subdividida em 4 regiões para que os defeitos presentes em cada uma fosse quantificado, medido e identificado, seguindo a NB 1381 (ABPM, 1990)¹. Posteriormente, as toras foram ensaiadas por ultrassom em 5 regiões distintas, sendo 2 regiões de madeira juvenil, 2 regiões de madeira adulta e uma na região da medula. De cada prancha foram retirados 8 corpos de prova, 4 provenientes de região de madeira adulta, e 4 provenientes de região de madeira juvenil, com dimensões de 40 mm x 40 mm x 450 mm e 40 mm x 40 mm x 120 mm. Esses corpos de prova, assim como as pranchas, foram ensaiados por ultrassom, utilizando-se transdutores de faces planas de 45 kHz. Os autores concluíram que o ultrassom desempenha papel fundamental na classificação de peças estruturais de madeira, pois identifica, com a variação de velocidade de propagação da onda, defeitos e possíveis peças com resistência comprometida.

Arriaga et al (2006) utilizaram 82 peças estruturais de *Guinea* e *Cameroon*, agrupadas nas dimensões de 200 mm x 250 mm x 5000 mm e 80 mm x 80 mm x 1600 mm. Todas as peças tiveram os defeitos analisados, quantificados e medidos de acordo com a norma britânica de análise visual BS 5756 (1997)². Adicionalmente, as peças foram ensaiadas utilizando ultrassom e, a densidade, o módulo de elasticidade e o módulo de

¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE MADEIRA (1990b). NB-1381: Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral – medição e quantificação de defeitos. ABPM. [s.l.].

² BS 5756 (1997) Specification for visual strength grading of hardwood

ruptura foram obtidos de acordo com a norma Europeia EN 408 (2003)³. Os autores concluíram que a inspeção visual não é suficiente para a classificação da madeira considerando sua resistência característica, sendo necessária a inserção de outro método para corroborar as informações. No entanto, a pesquisa não foi conclusiva a ponto de sugerir um método de classificação de peças estruturais baseado somente no ultrassom, mas, segundo os autores, a alta correlação encontrada entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e as propriedades mecânicas da madeira, sugere avanço importantíssimo frente à classificação feita única e exclusivamente pelo método visual.

Puccini (2002) avaliou, estatisticamente, a possibilidade de se utilizar o método do ultrassom na detecção de defeitos em peças de madeira serrada. Para isso foram utilizadas 882 peças de *Pinus taeda* L., de dimensões nominais: 16 mm de espessura; 40 mm de largura e 385 mm de comprimento, retiradas de tábuas e de pranchas provenientes de árvores do Horto Florestal de Manduri/SP. Todas as peças foram secas ao ar e ensaiadas na umidade aproximada de 12%. Para a realização dos ensaios foi utilizado equipamento de emissão de ondas de ultrassom (BP-7, Steinkamp, Alemanha) equipado com transdutores de faces exponenciais de 45 kHz. Inicialmente foi realizada a análise visual detalhada dos defeitos e, então, foi determinada a velocidade de propagação da onda de ultrassom nas amostras de madeira. Com os resultados foram analisados modelos de regressão, visando verificar a relação entre a presença de defeitos e a velocidade de propagação da onda de ultrassom na madeira. Os resultados demonstraram que a velocidade foi altamente significativa para os modelos, envolvendo, como variável independente, a presença de nós e de medula e o desvio da grã. A análise de correlação múltipla permitiu concluir, ainda, que a característica mais associada à variação da velocidade de propagação da onda ultrassônica foi a presença do nó, assim como Sandoz (1989), que concluiu que a presença de nó era o parâmetro que apresentava maior influência na velocidade de propagação de onda.

Puccini (2002) conclui, também, que a velocidade média de propagação das ondas ultrassônicas decresceu no mesmo sentido em que as classes da norma IRAM, baseada em

³ EN 408 (2003) Timber structures. Sawn timber and glued laminated timber for structural use. Determination of some physical and mechanical properties

análise visual (CORONEL, 1995)⁴, decresceu em graus de qualidade. Ao serem analisados separadamente (um a um e não na média), alguns resultados apresentaram discrepâncias (velocidades elevadas associadas à classe III ou velocidades baixas associadas à classe I). Esse resultado foi explicado pelo elevado coeficiente de variação da classe III e pela presença de defeitos internos, não detectados pela análise visual. A comparação da velocidade média com a classificação visual adotada (IRAM) permitiu aos autores indicar os seguintes intervalos de classificação (Tabela 2.4):

Tabela 2.4 – Resistência e Rigidez (MPa) mínimas da norma Europeia (EN 338).

Velocidade [m.s ⁻¹]	Classe
$V \geq 5350$	Classe I
$5050 \leq V < 5350$	Classe II
$4680 \leq V < 5050$	Classe III
$V < 4680$	Desclassificado

Trabalho de Puccini et al (2002) utilizando a mesma amostragem detalhada comprovou que a velocidade de propagação das ondas de ultrassom foi estatisticamente diferente para os grupos de peças de madeira com e sem defeito. Nesse trabalho também foi possível estabelecer um intervalo de velocidade que, para as peças defeituosas, indica, com 74,32% de acertos, a confirmação do defeito. Para as peças sem defeitos, a chance de o ultrassom indicar que a mesma é defeituosa é de apenas 18,87%.

Há, também, diversos pesquisadores que se utilizaram do ultrassom como meio para avaliar peças estruturais de madeira, criando assim as primeiras metodologias para a utilização desse ensaio na classificação estrutural da madeira. Alguns desses autores são considerados muito importantes para essa pesquisa por terem sido, em seus países de origem, aqueles que não só obtiveram correlações entre o ensaio de ultrassom e a resistência e ou rigidez da madeira, mas também utilizaram essa correlação para proporem classificação baseada nessa metodologia. Devido à dificuldade de conseguir os textos originais de 2 dos pesquisadores aqui citados, por se tratarem de textos de teses e não de

⁴ CORONEL, E. O. **Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas**. Aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Edição Argentina. Editora EL LIBERAL de Santiago del Estero, 1995.

artigos publicados em periódicos, e por serem redigidos em alemão, serão utilizadas as citações obtidas na tese de doutorado de Bartholomeu (2001).

Waubke (1981 apud BARTHOLOMEU, 2001), apresenta correlações entre a velocidade do pulso ultrassônico, o coeficiente de rigidez (denominado pelo autor de módulo de elasticidade dinâmico), o módulo de elasticidade em flexão e a tensão de ruptura em flexão (Tabela 2.5). Para os ensaios foram utilizadas 138 vigas da espécie Fichte (*Picea abies*) de dimensões 80mm x 80mm x 4500mm, com os seguintes teores de umidade: saturado, 20% e 13% (seco ao ar). Os ensaios de flexão estática foram realizados utilizando o esquema estrutural de 4 pontos e os ensaios de ultrassom com transdutores de 42kHz. O coeficiente de rigidez (denominado pelo autor de Módulo de elasticidade dinâmico E_d) foi obtido pela relação $E_d = \rho V_d^2$, onde V_d é a velocidade longitudinal.

Tabela 2.5 – Coeficientes de correlação (R) considerando os parâmetros velocidade longitudinal (V_d), E_s (módulo de elasticidade na flexão estática), σ_r (tensão de ruptura na flexão estática) e módulo dinâmico (E_d) para as 138 vigas de Fichte (*Picea abies*).

Correlação	Umidade: Saturada	Umidade: 20%	Umidade: 13%	Independente do teor
$V_d \times E_s$	0,52	0,77	0,63	0,71
$V_d \times \sigma_r$	0,71	0,58	0,33	0,67
$V_d \times E_d$	0,78	0,78	0,63	0,77
$E_s \times E_d$	0,88	0,80	0,68	0,83
$E_d \times \sigma_r$	0,83	0,58	0,33	-

Fonte: (WAUBKE, 1981 apud BARTHOLOMEU, 2001, p 21).

Em 1988, Waubke (1981 apud BARTHOLOMEU, 2001) utilizou 134 vigas de Fichte, das quais 68 peças tinham seção 140mm x 160mm x 4500mm e 68 peças tinham seção: 100mm x 120mm x 4500mm. As árvores de onde as vigas foram retiradas eram provenientes de duas regiões da Alemanha, uma montanhosa e outra plana e baixa. Os teores de umidade utilizados nessa pesquisa foram: saturado (recém-cortado), 20% e 10%. As vigas com teor de umidade de 20% e 10% foram ensaiadas em flexão estática com esquema estático de 4 pontos, com distância entre apoios de 4000 mm, apenas no trecho elástico. Em seguida, as vigas com teor de 10% foram levadas até a ruptura utilizando o mesmo esquema estático. Todas as vigas foram ensaiadas com o ultrassom, de forma direta

(transdutores posicionados em faces paralelas), para obtenção das velocidades longitudinais de propagação de ondas. Adicionalmente, as vigas foram ensaiadas de forma indireta (transdutores posicionados na mesma face da viga, com a onda se propagando também na direção longitudinal) a cada 200 mm, totalizando 16 medições, para verificar a presença de possíveis defeitos nas mesmas. De posse dos resultados os autores determinaram as correlações (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 – Coeficientes de correlação (R) considerando os parâmetros velocidade longitudinal (V_d), E_s (módulo de elasticidade na flexão estática), σ_r (tensão de ruptura na flexão estática) e módulo dinâmico (E_d) para as 134 vigas de *Fichte* (1988).

Correlação	Seção Transversal	
	140mm x 160mm	100mm x 120mm
$V_{dsat} \times E_s$ 20%	0,60	0,66
$V_{dsat} \times E_s$ 10%	0,54	0,63
$V_{dsat} \times \sigma_r$ 10%	0,41	0,38
$E_{d sat} \times E_s$ 20%	0,83	0,66
$E_{d sat} \times E_s$ 10%	0,76	0,63
$E_{d sat} \times \sigma_r$ 10%	0,56	0,37
V_d 20% x E_s 20%	0,60	0,66
V_d 20% x E_s 10%	0,58	0,64
V_d 20% x σ_r 10%	0,43	0,29
E_d 20% x E_s 20%	0,84	0,78
E_d 20% x E_s 10%	0,82	0,77
E_d 20% x σ_r 10%	0,65	0,43
V_d 10% x E_s 10%	0,68	0,73
V_d 10% x σ_r 10%	0,47	0,45
E_d 10% x E_s 10%	0,82	0,76
E_d 10% x σ_r 10%	0,53	0,46

Fonte: WAUBKE, 1988 *apud* BARTHOLOMEU, 2001, p 22

Apesar dos valores dos coeficientes de correlação terem sido inferiores ao do trabalho publicado em 1981, os dados estão dentro do nível de confiabilidade estatística e apresentam a mesma ordem de grandeza de outros métodos de classificação. Waubke (1988 *apud* BARTHOLOMEU, 2001) concluiu que era necessária a comprovação dos resultados para outras espécies e para outras seções transversais. Entretanto, concluiu que o ensaio não destrutivo de ultrassom é método rápido e seguro, podendo ser aplicado inclusive quando se tem valores de umidade diferentes para correlacionar com ensaios estáticos.

Shafer (2000) também considera importante a utilização do ultrassom nos processos industriais de desdobro e de classificação de peças estruturais de madeira serrada. Em seu artigo discorre sobre a importância do bom acoplamento entre os transdutores e a peça, assim como salienta a importância de se desenvolver tecnologia para melhorar a utilização de um material de construção com grande variabilidade como é o caso da madeira.

Sandoz (1990) utilizou o método de ultrassom na classificação de peças estruturais de Sapin (*Abies alba*) e de Epicéa (*Picea abies*), todas com 12% de teor de umidade. Foram ensaiadas 583 vigas, sendo 192 vigas de Sapin e 391 de Epicéa, das quais 192 possuíam seção transversal de 100mm x 140mm x 2800mm; 109 possuíam seção de 100mm x 180mm x 3600mm e 282 com seção de 100mm x 220mm x 4400mm. As vigas foram ensaiadas com ultrassom, utilizando transdutores de frequência de 40kHz, para determinação da velocidade de propagação longitudinal. Posteriormente as vigas foram ensaiadas em flexão estática em esquema estático de 4 pontos, segundo a ISO 8375 (1995) com distância entre apoios de 18 vezes a altura da seção transversal, para obtenção do módulo de elasticidade (E_M) e do módulo de ruptura (f_m). Como resultado desse trabalho Sandoz (1990) obteve a correlação entre as velocidades longitudinais nas vigas e o módulo de ruptura das mesmas, para então poder classificar suas vigas de acordo com as faixas de classificação propostas pela norma suíça SIA 164 (1982/1992), apresentadas na tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Classes de resistência segundo a SIA 164.

Classe de Resistência	Tensão de Ruptura em Flexão [MPa]	Tensão de Ruptura em Compressão [MPa]	Tensão de Ruptura na Tração [MPa]
FK I	12,0	10,0	10,0
FK II	10,0	8,5	8,5
FK III	7,0	6,0	-

Fonte: Adaptado de SANDOZ (1990)

Sandoz (1990) relacionou a velocidade de ultrassom na direção longitudinal (V_{LL}) com a tensão de ruptura (f_m) (Figura 2.3), criando assim a base para a delimitação das classes de resistência da SIA 164. A regressão linear (Equação 2.2) que contempla 95% dos resultados das vigas ensaiadas (limite de predição inferior ou modelo rebaixado) foi utilizada para construir as classes de resistência (Tabela 2.8).

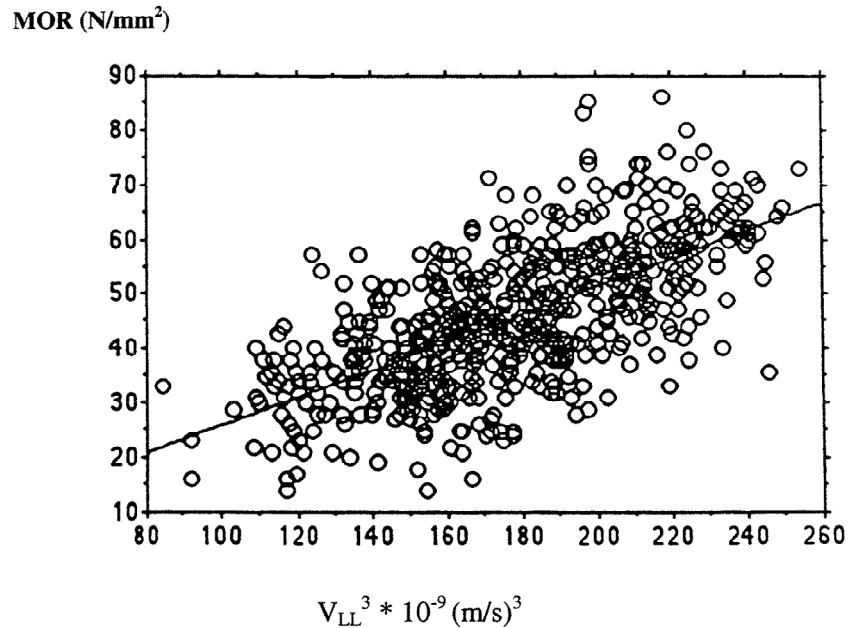


Figura 2.3. Modelo de regressão médio entre a velocidade longitudinal da onda ultrassônica e a tensão de ruptura (MOR) para vigas de *Sapin* e *Epicéa*. Fonte: SANDOZ, 1990 apud BARTHOLOMEU, 2001, p 24.

$$f_m = 0,2544 \cdot V_{LL}^3 \cdot 10^{-9} - 15,1 \quad R = 0,652 \quad \text{Equação 2.2}$$

Tabela 2.8 – Faixas de classificação de vigas de *Sapin* e *Epicéa*, com teor de umidade de 12%, de acordo com as faixas de classificação da SIA 164.

Classe	Faixa de Velocidade [m.s ⁻¹]
Classe 0	$V_{LL} \geq 5800$
Classe I (FKI)	$5600 \leq V_{LL} < 5800$
Classe II (FKII)	$5350 \leq V_{LL} < 5600$
Classe III (FKIII)	$V_{LL} < 5350$

Fonte: Adaptado de SANDOZ (1990)

Comparando a Tabela 2.6, da norma SIA 164, com a Tabela 2.8, obtida por Sandoz (1990), pode-se notar a inclusão de uma nova faixa de classificação, a Classe 0, que só foi possível ser inserida devido a utilização do ultrassom, uma vez que a SIA 164 se baseia na inspeção visual, um método de menor acuidade (SANDOZ, 1990).

Os resultados de Sandoz (1990) motivaram e deram fundamento teórico para a criação de uma máquina automatizada de classificação de peças estruturais de madeira serrada por ultrassom. A empresa que investiu no desenvolvimento dessa máquina foi a

CBS-CBT (*Concept Bois Structure e Concept Bois Technologie*). Os transdutores que esse equipamento utiliza são de frequência de 22 kHz e o equipamento efetua automaticamente a medição da velocidade longitudinal de propagação da onda ultrassônica e marca as peças de acordo com a classe de velocidade contemplada na EN 338. (SANDOZ, 2007).

Em 1991 passava a vigorar na Europa o *Eurocode*, constituído de um conjunto de normas e procedimentos que visava a padronização da utilização de todos os materiais utilizados em construções europeias. Desse modo, a norma em que se baseava o trabalho de Sandoz (1990) já não mais existia, vigorando a EN 338 à partir de março de 1994. Assim, em maio de 1996, a exemplo de Waubke (1981 e 1988 apud BARTHOLOMEU, 2001) e Sandoz (1990), Steiger (1996 apud BARTHOLOMEU, 2001) apresenta seu trabalho para obtenção do título de Doutor em Ciências Técnicas, utilizando o método de ultrassom na classificação de peças estruturais de Fichte (*Picea abies*).

Steiger (1996 apud BARTHOLOMEU, 2001) utilizou em sua pesquisa 334 vigas de seção transversal de 60 mm x 120 mm e 80 mm x 160 mm, com teor de umidade de 12%, levadas à ruptura em ensaio de flexão com esquema estático de 4 pontos, com distância entre apoios de, aproximadamente, 18 vezes a altura da seção transversal. Como resultado desses ensaios foi obtido o módulo de elasticidade a flexão (E_M) e o módulo de ruptura (f_m), que conjuntamente com as velocidades longitudinais de propagação (V_{LL}) foram utilizados para o enquadramento nas classes de rigidez da EN 338 (Tabela 2.9), relacionando a velocidade longitudinal e o módulo de elasticidade na flexão (E_M) (Figura 2.4 e Equação 2.3).

Tabela 2.9 – Classes de resistência da EN 338 a partir de valores médios de E_M para peças estruturais de madeira com teor de umidade de 12%.

Classe	C18	C22	C27	C35	C40
E_M , médio [MPa]	9.000	10.000	12.000	13.000	14.000

Fonte: (STEIGER, 1996 apud BARTHOLOMEU, 2001, p 28).

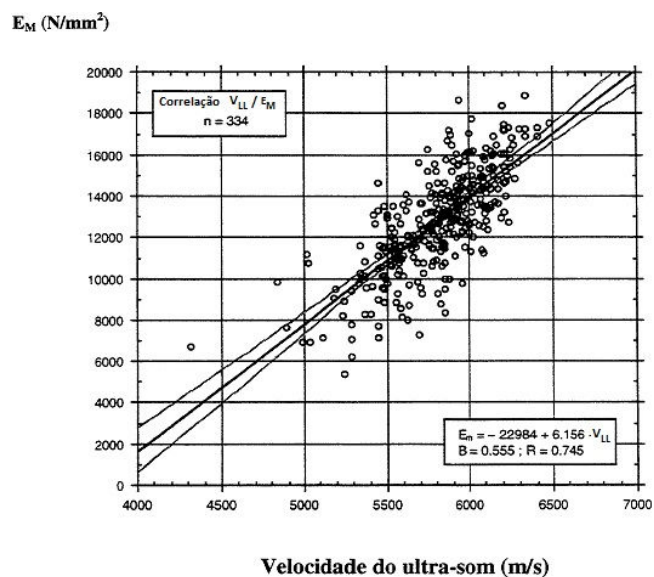


Figura 2.4. Modelo de correlação entre a velocidade longitudinal de ultrassom e o módulo de elasticidade a flexão para peças estruturais de Fichte a 12% de umidade. Fonte: STEIGER, 1996 apud BARTHOLOMEU, 2001, p 27.

$$EM = 6,156 \cdot V_{LL} - 22984 \quad R = 0,745 \quad \text{Eq.2.3}$$

Juntamente com as informações da Tabela 2.8 da EN 338, e da equação de correlação encontrada (Equação 3.2), o autor propôs as faixas de classificação baseadas nos ensaios de ultrassom (Tabela 2.10) (STEIGER, 1996 apud BARTHOLOMEU, 2001, p 26).

Tabela 2.10 – Faixas de classificação, baseadas na velocidade de propagação longitudinal de ultrassom, para peças estruturais de Fichte com teor de umidade de 12%.

Classe	Faixa de Velocidade [m.s ⁻¹]
Sem classificação	$V_{LL} < 5100$
C18	$5100 \leq V_{LL} < 5250$
C22	$5250 \leq V_{LL} < 5500$
C27	$5500 \leq V_{LL} < 5750$
C35	$5750 \leq V_{LL} < 5900$
C40	$V_{LL} \geq 5900$

Fonte: STEIGER, 1996 apud BARTHOLOMEU, 2001, p 28.

Bartholomeu (2001) realizou pesquisa utilizando três espécies de madeira – a Cupiúba (*Goupia glabra*), o Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*) e o Pinus elliottii (*Pinus elliottii*). Inicialmente o autor realizou ensaios de ultrassom em vigas de seção estrutural (0,06 m x 0,12 m e 2,00 m) e, posteriormente, ensaios de flexão nessas mesmas vigas, para a obtenção do módulo de elasticidade (E_M). Os ensaios de flexão foram realizados de acordo com a ASTM D198-08. De forma complementar o autor realizou ensaios de compressão paralela às fibras, de acordo com a NBR 7190 (1997), para a obtenção da resistência a compressão paralela (f_{c0}) e do módulo de elasticidade (E_{c0}).

Utilizando os resultados, Bartholomeu (2001) propôs faixas de classificação das espécies ensaiadas em função da velocidade de propagação das ondas longitudinais na direção paralela às fibras, na condição saturada (V_{Vsat}). Para cada faixa foram estabelecidos os valores esperados de módulo de elasticidade característico na flexão ($E_{M,k}$) e na compressão ($E_{c0,k}$) bem como resistência característica na compressão ($f_{c0,k}$). Essas faixas são apresentadas nas Tabelas 2.11 e 2.12.

Tabela 2.11 – Classes de rigidez de peças estruturais de madeira das espécies Cupiúba e Eucalipto Citriodora utilizando a velocidade de propagação das ondas de ultrassom (V_{Vsat}).

Classe	$E_{M,k}$ Condição seca ao ar [kN.cm ⁻²]	$E_{c0,k}$ Condição seca ao ar [kN.cm ⁻²]	$f_{c0,k}$ Condição seca ao ar [kN.cm ⁻²]	Faixa de velocidade (madeira saturada) [m.s ⁻¹]
7500	750	904	3,80	$2850 \leq V_{Vsat} \leq 3800$
10000	1000	1205	4,60	$3800 < V_{Vsat} \leq 4150$
12500	1250	1506	5,30	$4150 < V_{Vsat} \leq 4380$
15000	1500	1807	5,90	$4380 < V_{Vsat} \leq 4550$
17500	1750	2108	6,35	$V_{Vsat} > 4550$

Fonte: BARTHOLOMEU (2001).

Tabela 2.12 – Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Pinus elliotti utilizando a velocidade de propagação das ondas de ultrassom (V_{Vsat}).

Classe	$E_{M,k}$ Condição seca ao ar [kN.cm ⁻²]	$E_{c0,k}$ Condição seca ao ar [kN.cm ⁻²]	$f_{c0,k}$ Condição seca ao ar [kN.cm ⁻²]	Faixa de velocidade (madeira saturada) [m.s ⁻¹]
4000	400	400	1,50	$2700 \leq V_{Vsat} \leq 3150$
5000	500	500	1,90	$3150 < V_{Vsat} \leq 3500$
6000	600	600	2,20	$3500 < V_{Vsat} \leq 3850$
7000	700	700	2,45	$V_{Vsat} > 3850$

Fonte: BARTHOLOMEU (2001).

Os resultados de Bartholomeu (2001), acrescidos de novos ensaios realizados utilizando amostragens com espécies tropicais provenientes de árvores com idade média de 45 anos, foram utilizados para a elaboração das classes de rigidez NBR 15521 (2007) (Tabela 2.13), a qual propõe a classificação mecânica da madeira de folhosas por ultrassom.

Tabela 2.13 – Classes de Rigidez da NBR 15521 (2007).

Classe	V_{LLsat} [m.s ⁻¹]	$C_{LL12\%}$ [MPa]	$E_M 12\%$ [MPa]	$f_{c0,k} 12\%$ [MPa]	$E_{c0} 12\%$ [MPa]
UD - 20	$V_{LLsat} < 3040$	< 10620	< 6750	20	8000
UD - 25	3040 – 3690	10620 – 13000	6750 – 10420	25	12000
UD - 30	3690 – 3950	13000 – 15400	10420 – 13020	30	14000
UD - 35	3950 – 4140	15400 – 17800	13020 – 14920	35	15000
UD - 40	4140 – 4300	17800 – 20150	14920 – 16520	40	16500
UD - 45	4300 – 4390	20150 – 22500	16520 – 17420	45	18500
UD - 50	4390 – 4490	22500 – 24900	17420 – 18420	50	19500
UD - 55	4490 – 4600	24900 – 27300	18420 – 19120	55	20500
UD - 60	$V_{LLsat} > 4600$	> 27300	$E_M > 19120$	60	21200

Fonte: NBR 15521(2007).

2.3 – Influência da Umidade

Aspectos teóricos ligados à relação madeira e água são básicos e podem ser estudados em vários livros. No caso deste texto esses aspectos foram obtidos do livro de Haygreen e Bowyer (1995).

A madeira, sendo material higroscópico, realiza constantemente trocas de umidade com o ambiente. Tais trocas ocorrem em função da umidade da própria madeira e das condições de temperatura e de umidade relativas do meio.

A condição de umidade da madeira é dita como sendo *saturada* quando a água encontra-se tanto nas cavidades dos elementos celulares (lúmen) quanto em suas paredes. A água contida no lúmen é denominada de água livre enquanto a água contida nas paredes celulares de água de impregnação, também chamada de embebição ou de constituição. A água livre, como o nome já indica, não está ligada aos componentes celulares e, por isso, é mais fácil de ser retirada. Já a água de impregnação apresenta-se infiltrada à parede celular

e, ligada quimicamente à mesma, sendo, portanto, necessária a aplicação de energia para sua retirada.

Há duas condições de umidade muito importantes e conhecidas – o ponto de saturação das fibras (PSF) e o ponto de equilíbrio (PE). O ponto de saturação das fibras é a porcentagem de umidade correspondente à condição da madeira na qual toda a água livre foi retirada (lúmen vazio), mas as paredes celulares encontram-se completamente saturados de água de impregnação. O valor do ponto de saturação das fibras é assumido, normalmente, como sendo 30%, mas de fato pode variar muito de espécie para espécie. Essa variação pode ser causada pela quantidade de extrativos que as espécies possuem.

Uma peça de madeira, inicialmente saturada (com água livre e água de impregnação), seca naturalmente, fazendo trocas de umidade com o ambiente. Até o PSF essa secagem é mais rápida porque a água livre é mais fácil de ser retirada. A partir do PSF a madeira continua secando naturalmente, embora de forma mais lenta, até o ponto de equilíbrio ao ar (PEA), que é o valor de umidade na qual a madeira entra em equilíbrio com o ambiente, não fazendo, portanto, mais trocas com ele. A partir desse ponto de umidade só é possível continuar retirando água da madeira por meio da introdução de energia (secagem artificial).

A grande maioria das propriedades da madeira cresce de forma pouco acentuada à medida que a umidade da madeira diminui, até o PSF e, a partir daí continuam a crescer, mas de forma muito acentuada. Em aplicações práticas de engenharia se assume que acima do PSF as propriedades se mantêm constantes. Esse mesmo comportamento é observado para a velocidade de propagação das ondas de ultrassom.

Estudo detalhado de Gonçalves e Costa (2008), utilizando duas espécies nativas - Cupiúba (*Goupia glabra*) e Pinho do Paraná (*Araucária Angustifolia*) - confirmaram esse comportamento, ou seja, que a velocidade de propagação das ondas de ultrassom cresce com o decréscimo da umidade e que esse efeito é maior para umidades abaixo do PSF. Por meio de estudo de regressão os autores obtiveram modelos de variação polinomial de segundo grau para representar a variação da velocidade em função da umidade para todo o trecho de variação da umidade e modelos lineares considerando os trechos acima e abaixo do ponto de saturação das fibras (Tabela 2.14). Na pesquisa os autores utilizaram corpos de prova (30mm x 60mm x 300mm) e não peças estruturais.

Tabela 2.14 – Modelos de Relação entre velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal (V_{LL}) e teor de umidade (MC) para a Cupiúba e Pinho do Paraná.

Espécie	Umidade	Modelos	R ²	P value
Cupiúba	69% até 1%	$V_{LL} = 0,23MC^2 - 29,8MC + 5239$	0,99	0,0000
	> PSF	$V_{LL} = 4619 - 5,3 MC$	0,74	0,0000
	<PSF	$V_{LL} = 5217 - 23,6 MC$	0,99	0,0000
Pinho do Paraná	111% até 3%	$V_{LL} = 0,12MC^2 - 22,98MC + 5899$	0,96	0,0000
	>PSF	$V_{LL} = 5383 - 5,8 MC$	0,96	0,0000
	<PSF	$V_{LL} = 5974 - 25,4 MC$	0,99	0,0000

Fonte: Adaptado de Gonçalves e Odilon (2008).

A NBR 15521 (2007) apresenta proposta de classificação da madeira proveniente de florestas tropicais nativas de três diferentes formas, dependendo da condição de umidade. Essas três condições são: 1) madeira com umidade acima do ponto de saturação das fibras (PSF), adotado como sendo de 30%; 2) madeira na condição seca ao ar, nesta Norma considerada no intervalo de 11% a 13% de umidade; 3) madeira com umidade entre 13% e 30%.

Para o caso da madeira com umidade acima do ponto de saturação das fibras (30%), as classes são definidas por meio de intervalos de velocidade de propagação de ondas de ultrassom na direção longitudinal às fibras, denominado de V_{LLsat} . Para madeiras com umidade em torno de 12% (de 11% a 13%), as classes são definidas por meio de intervalos de constante de rigidez na direção longitudinal, denominado de C_{LL} . Para madeiras com umidades inferiores ao PSF (30%) e superiores à umidade de equilíbrio (acima de 12%), a velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal, denominada V_{LL} é corrigida por meio da equação 2.4, obtendo-se a velocidade correspondente na condição saturada (V_{LLsat}), com a qual se pode ingressar nas classes.

$$V_{LLsat} = -1745 + V_{LL} + 16xU + \rho_{ap} \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde V_{LLsat} é o valor numérico da velocidade na peça saturada, com teor de umidade maior que 30%, em metros por segundo ($m.s^{-1}$); V_{LL} é o valor numérico da velocidade na peça com teor de umidade entre 12% e 30%, em metros por segundo ($m.s^{-1}$); U é o valor numérico do teor de umidade da viga, em porcentagem (%) e ρ_{ap} é o valor numérico da densidade aparente da viga na umidade $U\%$, em quilogramas por metro cúbico ($kg.m^{-3}$).

Costa (2005) apresentou, para o Eucalipto citriodora, equações de correção da velocidade obtida na condição seca (Equação 2.5) e na condição saturada (Equação 2.6) para a condição de 12% de umidade. Essas equações de correção são importantes, porque nem sempre é possível a obtenção da velocidade seca na umidade de 12%, valor esse de referência em normas de classificação.

$$V_{12} = \frac{V_U}{1-0,0033 (U-12)} \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde V_u é a velocidade obtida em peças com umidade (U) abaixo do ponto de saturação das fibras, nesse trabalho adotado como 30%.

$$V_{12} = \frac{V_U}{0,9367-0,0007(U-30)} \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde V_u é a velocidade obtida em peças com umidade (U) acima do ponto de saturação das fibras, nesse trabalho adotado como 30%.

Assim como Costa (2005), Sandoz (2006) apresentou equações de correção da velocidade para 12% de umidade, também considerando medições realizadas na condição abaixo do ponto de saturação das fibras (Equação 2.7) e acima do ponto de saturação das fibras (Equação 2.8).

$$V_{12} = V_U + 33 (U - 12) \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde V_u é a velocidade obtida em peças com umidade (U) abaixo do ponto de saturação das fibras, nesse trabalho adotado como 30%.

$$V_{12} = V_U + 2,5 (U - 30) + 594 \quad \text{Equação 2.8}$$

Onde V_u é a velocidade obtida em peças com umidade (U) acima do ponto de saturação das fibras, nesse trabalho adotado como 30%.

Tendo em vista que no cálculo do coeficiente de rigidez a 12% de umidade, pela equação de *Christoffel* ($C = \rho V^2$), a densidade (ρ) também deve estar na umidade de 12%, é necessário que se utilize parâmetros para a correção de densidades que não estejam na umidade desejada.

Logsdon (1992) apresentou proposta de equação (Equação 2.9) para corrigir densidades obtidas em umidades (U) diferentes da umidade da umidade de referência (12%). A utilização da equação de Logsdon (1992) exige o conhecimento do coeficiente de retratibilidade volumétrica (δ_v) da espécie.

$$\rho_{12\%} = \rho_{U\%} + \rho_{U\%}((1 - \delta_v) \frac{(12-U)}{100}) \quad \text{Equação 2.9}$$

Onde: $\rho_{12\%}$ é a densidade a 12% de umidade; $\rho_{U\%}$ é a densidade com U% de umidade e δ_v é o coeficiente de retratibilidade.

2.4 – Eucalypto grandis, eucalypto citriodora, eucalypto pellita e eucalypto globulus

Esse item tem como objetivo apresentar algumas propriedades das espécies de eucalyptos que foram utilizados nesta pesquisa, visando a possibilidade de comparar os resultados experimentais obtidos com resultados de outros pesquisadores. Além disso, para que correções de propriedades obtidas em diferentes condições de umidade para valores de umidade de referência (12% de umidade) sejam mais adequadas, é necessário o conhecimento de parâmetros específicos da espécie.

Oliveira Filho e Fiedler (2010) obtiveram, para a retratibilidade volumétrica do *E. grandis* e do *E. citriodora*, valores de 15,9% e 18,3%, respectivamente. O estudo foi realizado utilizando 5 árvores de cada espécie, com 16 anos de idade, provenientes da Estação Experimental de Anhembi, SP, do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP.

A NBR 7190 (1997) apresenta propriedades de algumas espécies nativas e de reflorestamento. Entre as espécies, na Tabela 2.15 são apresentados os dados referentes ao *E. citriodora* e ao *E. grandis*.

Tabela 2.15 – Dados referentes ao *E. citriodora* e ao *E. grandis*.

Nome comum	Nome científico	$\rho_{ap(12\%)}^1$ [kg.m ⁻³]	f_{c0}^2 [MPa]	f_{t0}^3 [MPa]	f_{t90}^4 [MPa]	f_v^5 [MPa]	E_{c0}^6 [MPa]
<i>E. Citriodora</i>	<i>Eucalyptus citriodora</i>	999	62,0	123,6	3,9	10,7	18421
<i>E. Grandis</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>	640	40,3	70,2	2,6	7,0	12813

Fonte NBR 7190:1997.

1) $\rho_{ap(12\%)}$ é a massa específica aparente a 12% de umidade;

2) f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras;

3) f_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras;

4) f_{t90} é a resistência à tração normal às fibras;

5) f_v é a resistência ao cisalhamento;

6) E_{c0} é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras.

Como forma de aumentar o conhecimento das propriedades e potenciais usos para a madeira de eucalipto, Acosta (1999) apresenta diversos dados compilados pela *Faculdade Regional de Concepción do Uruguai*, realizados pelo GEMA – *Grupo de Estudios de Madera*. Nesse estudo foram utilizadas madeiras comerciais da região, contemplando ainda dados obtidos pelo INTA – *Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária da Argentina*. Dentre as propriedades apresentadas encontram-se a densidade (810 kg.m⁻³), o módulo de elasticidade (10520 MPa) e a retratibilidade volumétrica (21%) do *E. globulus*.

Em 2008, na monografia defendida para obtenção do título de engenheiro florestal, Xavier (2008) utilizou-se de 40 toretes de 4 espécies de eucalipto, sendo elas: *E. grandis*, *E. pellita*, *E. saligna* e *E. citriodora*. Cada torete, com 800 mm de comprimento e 200 mm de diâmetro foram desdobrados em corpos de prova para a determinação da densidade e da estabilidade dimensional (20 mm x 30 mm x 50 mm). O autor obteve para o *E. pellita*, o valor de retratibilidade volumétrica de 18,5%.

Bailleres, Hopewell e McGavin (2008) estudaram 32 árvores de *E. pellita* com 15 anos de idade, derrubadas pela passagem do ciclone *Larry* em 2006 ao norte de *Queensland*. Os autores avaliaram diversas propriedades, dentre elas a densidade e o módulo de elasticidade cujos valores foram 995 kg.m⁻³ e 18.000 MPa respectivamente.

Para facilitar a visualização os dados de densidade aparente, de módulo de elasticidade na compressão e de coeficiente de retratibilidade, obtidos pelos diferentes autores citados nesse item foram compilados (Tabela 2.16).

Tabela 2.16 – Espécies de eucalipto e valores de densidade aparente (ρ_{ap}), módulo de elasticidade (E_{c0}) e retratibilidade volumétrica.

Espécie	ρ_{ap} (12%)	E_{c0}	Retratibilidade volumétrica
	[kg.m⁻³]	[MPa]	[%]
E. grandis	640	12813	15,9
E. Citriodora	999	18421	18,3
E. Pellita	995	18000	18,5
E. globulus	810	10520	21,0

3 – MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – Material

Nesta pesquisa foram utilizadas árvores do gênero *Eucalyptus*. A obtenção das árvores foi realizada por meio de parcerias com empresas e com Instituições.

Tendo em vista que o objetivo da pesquisa não foi obter dados para uma determinada espécie, mas sim o comportamento geral da madeira de eucalipto frente às faixas de classificação da NBR 15521 (2007), foi mais importante obter um número maior de espécies do que um número maior de árvores de uma mesma espécie. Assim, buscou-se obter árvores de idades e espécies diferentes, ampliando o espectro de avaliação dos resultados. As espécies e as idades avaliadas foram 2 árvores de *E. grandis*: 8 anos; 5 árvores de *E. grandis*: 34 anos; 2 árvores de *E. citriodora*: 10 anos; 2 árvores de *E. pellita*: 26 anos e 2 árvores de *E. globulus*: 28 anos.

As árvores de *E. grandis* de 34 anos foram provenientes de floresta da *Duraflora*, localizada em Lençóis Paulista/SP. As árvores de *E. globulus* provenientes de floresta da Galícia, Espanha, foram ensaiadas no *Centro de Innovación e Servizos Tecnolóxicos da Madeira de Galícia* (CISMADEIRA), fruto de parceria dos grupos CISMADEIRA e LabEND⁵. As árvores de *E. grandis* de 8 anos, *E. citriodora* e *E. pellita* foram provenientes de Floresta Experimental da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALq/USP), localizada em Anhembi/SP.

3.2 – Retirada das vigas

Após o corte das árvores foi efetuado o desdobro das toras em vigas de seção estrutural mínima, de acordo com a NBR 7190 (1997), 50 mm x 100 mm e comprimento de 2500 mm, totalizando 79 vigas. No caso de árvores de menor idade (Grandis 8 anos e

⁵ Laboratório de ensaios não destrutivos - Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Citriodora 10 anos), como não foi possível a retirada de peças de seção estrutural devido ao pequeno diâmetro, foram retirados corpos de prova de flexão, 13 no total, com dimensões propostas pela NBR 7190 (1997), 50 mm x 50 mm x 1150 mm. Todas as vigas apresentavam umidade acima de 40%. A Tabela 3.1 resume, por espécie a quantidade de vigas ensaiadas durante a pesquisa.

Tabela 3.1 – Espécies ensaiadas com as respectivas idades e número de vigas utilizadas durante a pesquisa.

Espécie	Idade	Número de vigas
Grandis	8 anos	22
Grandis	34 anos	247
Citriodora	10 anos	15
Pellita	26 anos	55
Globulus	28 anos	35

3.3 – Ensaio de ultrassom nas vigas

Para a obtenção dos valores da velocidade de propagação na viga saturada (V_{LLsat}) foram adotados os procedimentos da NBR 15521(2007). O tempo de propagação das ondas foi medido utilizando-se equipamento de ultrassom (USLab, AGRICEF, Brasil), Figura 3.1.



Figura 3.1. Equipamento de ultrassom (USLab).

As medições foram realizadas posicionando os transdutores de 45kHz de faces planas (Figura 3.2), de forma alinhada, nas faces das extremidades da peça, para que a onda de compressão se propagasse no sentido longitudinal da madeira (medição direta).



Figura 3.2. Transdutores de 45kHz de faces planas.

As medições nas peças foram realizadas em três pontos da seção transversal (superior, meio e inferior) (Figura 3.3).

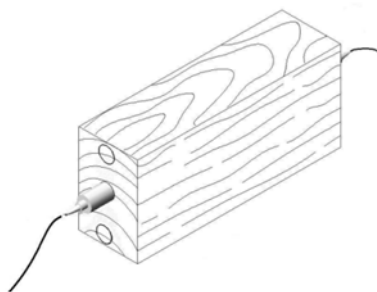


Figura 3.3. Medição de ultrassom na viga (NBR 15521, 2007).

Visando verificar a equação proposta pela NBR 15521 (2007) para a correção da velocidade (Equação 2.4) em função da umidade, as medições na viga foram realizadas, também, na condição de equilíbrio.

Antes do início dos ensaios o equipamento de ultrassom era calibrado utilizando-se bloco acrílico, cuja velocidade de propagação de ondas longitudinais é conhecida (2750

m.s⁻¹). Essa calibração é realizada utilizando a função de calibração do equipamento. O acoplamento do transdutor nas peças foi feito utilizando-se gel medicinal.

3.4 – Determinação da umidade

De acordo com a NBR 15521 (2007), todas as peças ensaiadas passaram por medição de umidade, utilizando-se equipamento elétrico de contato (PM1-E, Merlin, Brasil) com faixa de densidade de 300 a 1100 kg.m⁻³ e regulagem a cada 10 kg.m⁻³ e faixa de umidade de 1 a 100% (Figura 3.4).



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

A medição da umidade foi realizada em pelo menos três posições da peça, próximos das bordas e na zona central. A média das medições foi utilizada para acompanhar a secagem das peças. Após o ensaio de flexão, de cada viga foram retirados corpos de prova para a determinação da umidade segundo os procedimentos indicados pela NBR 7190 (1997). Com esse procedimento foi possível, ao final dos ensaios, corrigir as umidades das vigas inicialmente tomadas com o medidor elétrico.

3.5 – Determinação da velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_{LL} ou V_{LLsat})

O cálculo da velocidade longitudinal (V_{LL}) se dá pela relação entre o comprimento de percurso (L) e o tempo de propagação (t) da onda pelo material. Para isso, em cada ponto de medição foi realizada:

- a) medição do comprimento de percurso L , que no caso da medição direta é a distância entre os transdutores de emissão e de recepção;
- b) aplicação de acoplante nas faces dos transdutores, de maneira a introduzir película que recobria totalmente essa face, evitando a presença de ar entre o transdutor e a face da peça, melhorando assim a transmissão da energia do pulso ultrassônico para a madeira;
- c) medição do tempo de propagação das ondas (t) por meio do equipamento de ultrassom (USLab, AGRICEF, Brasil);
- d) cálculo da velocidade pela Equação 3.1:

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

Onde:

V_{LL} é a velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal expresso em $m.s^{-1}$;

L é o comprimento do percurso expresso em m;

t é o tempo de propagação das ondas expresso em μs .

Após a determinação de V_{LL} nos diferentes pontos da seção transversal (Figura 3.3), o valor de V_{LL} final adotado para a entrada nas faixas de classificação da NBR 15521 (2007), foi o valor intermediário, ou seja, no caso de três medições foram eliminados os valores máximo e mínimo. Quando as diferenças de velocidades eram maiores que 10%, ou se tenha efetuado apenas duas medições em função da dimensão da peça, foi tomado, por segurança, o valor mínimo. Esse procedimento é o indicado pela NBR 15521 (2007).

3.6 – Correção da velocidade em função da umidade

O material utilizado nesta etapa da pesquisa foi proveniente apenas de 6 árvores, sendo 2 de *E. grandis* com 8 anos, 2 de *E. citriodora* com 10 anos e 2 de *E. pellita* com 26 anos, todas provenientes da Fazenda Experimental da ESALQ - USP em Anhembi SP. Esse procedimento não foi realizado para todas as árvores porque a amostragem composta de *E. grandis* de 34 anos e de *E. globulus* de 28 anos fazia parte de outras pesquisas do grupo, nas quais as peças tiveram que ser encaminhadas para a secagem em câmara climática imediatamente após as medições na condição saturada em função dos prazos de finalização dos ensaios.

Tendo em vista que o laboratório não possuía câmara de secagem com variação de umidade relativa e de temperatura, a obtenção das umidades intermediárias para as espécies que permaneceram no laboratório foi realizada durante secagem natural. Após as medições dos tempos de propagação das ondas de ultrassom na condição saturada, as vigas foram tabicadas dentro do laboratório de materiais e estruturas (LME), mantidas, portanto, em local protegido da incidência direta de vento, sol e chuva. Durante a secagem natural medições de umidade e de velocidade de propagação de ondas de ultrassom foram sendo realizadas.

Tendo em vista que as espécies se diferenciavam em termos de densidade e de porosidade, a espécie menos densa (*E. grandis*) atingiu umidade em torno de 12% de forma natural. As demais espécies tiveram que ser enviadas ao SENAI⁶ de Itatiba-SP para finalização da secagem em câmara climática com controle de umidade relativa e de temperatura. Ao retornarem ao laboratório, com umidades em torno de 12%, foram ensaiadas por ultrassom pela última vez. Os ensaios desta etapa foram realizados durante 9 meses.

Após a finalização dos ensaios de ultrassom e dos cálculos de velocidade, foi realizada a comparação entre as médias de velocidade de propagação da onda obtidas na condição saturada e a velocidade saturada calculada pela equação da NBR 15521 (2007).

⁶ Escola SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) “LUIZ SCAVONE” situado na R: Alfredo Massaretti, 191 – Centro – Itatiba-SP

Esta comparação permitiu avaliar se os conjuntos de dados para cada espécie eram estatisticamente equivalentes. Foi realizada também a regressão linear destes conjuntos de dados para verificar a correlação entre as velocidades obtidas pelos ensaios e as velocidades calculadas pela equação da norma. Por fim foi realizada regressão linear múltipla, considerando as velocidades calculadas pelo ensaio, incluindo os parâmetros da equação proposta pela NBR 15521 (2007) – velocidade na condição seca (umidade entre 12% e 30%), umidade e densidade.

3.7 – Determinação da constante de rigidez (C_{LL})

A constante de rigidez C_{LL} (MPa) foi calculada pela equação 3.2.

$$C_{LL} = \rho_{12\%} \times V_{LL}^2 \times 10^{-6} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde: $\rho_{12\%}$ é a densidade aparente da madeira com umidade em torno de 12 % (11 % a 13%); expresso em kg.m^{-3} ; V_{LL} é a velocidade de propagação da onda na madeira com umidade em torno de 12 %, expresso em m.s^{-1} .

Para o cálculo desta constante a densidade aparente foi calculada pela equação 3.3

$$\rho_{12\%} = \frac{m}{V} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde: m é a massa da peça de madeira ensaiada, na umidade entre 11% e 13% expresso em kg; V é o volume da peça ensaiada, na umidade entre 11% e 13% expresso em m^3 .

Tendo em vista que as vigas não estavam todas na condição de umidade de 12%, foi necessário corrigir a densidade e a velocidade para 12% antes de utilizar o C_{LL} como parâmetro de entrada nas faixas de classificação da NBR 15521 (2007).

A densidade foi corrigida para 12% utilizando-se a equação 2.9 proposta por Logsdon (1992) e a velocidade foi corrigida para 12% utilizando as equações 2.5 a 2.8.

3.8 – Determinação do Módulo de Elasticidade (E_M)

As vigas, após atingirem a umidade de equilíbrio e terem sido ensaiadas por ultrassom (visando a verificação da equação de correção da umidade e o cálculo do coeficiente de rigidez), foram ensaiadas em flexão estática para a determinação do módulo de elasticidade E_M . Os ensaios nas vigas de seção estrutural foram realizados de acordo com a ASTM D198-08 (2008), uma vez que na norma brasileira (NBR 7190/1997) não há procedimentos para ensaios em peças estruturais. Para os corpos de prova (retirados de árvores de menor idade) o ensaio de flexão foi realizado de acordo a NBR 7190 (1997).

Os ensaios de flexão estática nas vigas foram realizados em pórtico com atuador hidráulico (Figura 3.5) com capacidade de carga de 500 kN, movimentado por servo válvula. As cargas e os deslocamentos verticais no ponto central da viga foram obtidos utilizando sistema de aquisição de dados (Quantun, HBM, Alemanha) com 8 canais, no qual a célula de carga e o transdutor de posição linear eletrônico (0,001 mm de resolução) foram acoplados, permitindo leitura automatizada durante o ensaio.



Figura 3.5. Pórtico com atuador hidráulico.

No caso de corpos de prova de flexão, os ensaios foram realizados em máquina microprocessada (EMIC, Brasil), de capacidade máxima 300 kN. Da mesma forma

procederam-se medições automatizadas de carga e de deslocamento vertical no meio do vão e, com esses dados, se determinou o módulo de elasticidade.

De acordo com a ASTM D198-08 (2008) o ensaio em vigas estruturais pode ser realizado com aplicação de carga centrada (Figura 3.6) desde que a seção transversal e o vão não sejam muito grandes. A definição da magnitude das dimensões encontra-se no Apêndice X5.1.1 da ASTM D198-08 (2008), indicando que neste tipo de ensaio (carga centrada), para que não se tenha influência do cisalhamento, o vão livre mínimo da viga (L) deverá ser de, pelo menos, 15 vezes a sua altura (h). No mesmo item da referida norma especifica-se 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).

Levando em conta indicação da NBR 7190 (1997), foi sempre adotada a relação mínima L/h de 21 para todos os ensaios de flexão, quer seja nas vigas ou nos corpos de prova.

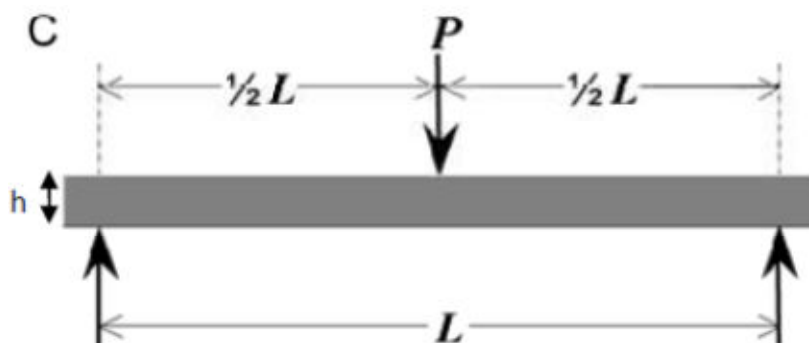


Figura 3.6. Esquema do ensaio da viga. Fonte: ASTM D198-08 (2008).

3.9 – Classificação das vigas pela NBR 15521

Tendo em vista que faixas de classificação da NBR 15521 (2007) foram adotadas considerando o modelo de regressão ajustado para o valor mínimo (limite de predição de 5% ou curva rebaixada), os valores previstos corresponderiam aos característicos. No entanto, a norma não especifica se a classificação deve ser realizada individualmente ou

utilizando um lote. Assim, a análise da classificação foi realizada das duas formas – utilizando os valores individuais das vigas e utilizando os valores característicos de lotes.

Para a classificação individualizada, de posse dos resultados de velocidade na condição saturada (V_{LLsat}) e de coeficiente de rigidez na condição de equilíbrio (C_{LL}), as vigas foram classificadas uma a uma de acordo com as faixas de classificação (Tabela 2.13) da NBR 15521 (2007).

Em função do resultado desta classificação, foi determinado coeficiente de correção médio da velocidade, tanto na condição saturada quanto na condição seca. Após a aplicação dos coeficientes de correção da velocidade para todas as vigas, nova classificação individualizada foi realizada, de acordo com as classes de rigidez (Tabela 2.13) da NBR 15521 (2007), considerando as velocidades corrigidas na condição saturada (V_{LLsat}) e os coeficientes de rigidez corrigidos na condição de equilíbrio (C_{LL}).

Para a classificação utilizando os valores característicos, foi considerado como lote todas as vigas retiradas de uma árvore. O valor característico do módulo de elasticidade (E_{Mk}) foi calculado com a expressão utilizada pela NBR 7190 (1997) para o cálculo da resistência característica, substituindo-se a resistência pelo módulo de elasticidade (Equação 3.4).

$$E_{Mk} = \left(2 \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - E_{\frac{n}{2}} \right) \times 1,1 \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde: $E_1, E_2, \dots, E_n$ são os valores ordenados da propriedade considerada e n é o número de peças ensaiadas. Conforme a NBR 7190 (1997) não se consideram valores característicos menores do que 0,7 do valor médio nem menores do que o menor valor obtido na amostra.

3.10 – Avaliação da Classificação das vigas pela NBR 15521

De posse dos resultados de classificação por ultrassom, obtidos de acordo com o especificado no item anterior, para cada viga ou cada lote foi obtido o intervalo de E_M ou E_{Mk} esperado.

Tendo em vista que as vigas foram ensaiadas em flexão estática, os resultados reais de E_M e de E_{Mk} foram comparados aos esperados pela classificação e os resultados dessa

classificação foram enquadrados em três categorias, de forma análoga ao proposto por Kretschmann & Hernandez (2006):

- *Categoria 1* – E_M previsto com valor dentro do intervalo esperado pela classificação.
- *Categoria 2* – E_M previsto com valor abaixo do intervalo esperado pela classificação.
- *Categoria 3* – E_M previsto com valor superior ao esperado pela classificação.

Tendo em vista que as faixas de classificação são adotadas em função do modelo rebaixado (quantil de 5%), resultados enquadrados nas Categorias 1 e 3 são considerados *acertos*, pois é esperado que grande parte dos valores obtidos sejam superiores aos previstos. Resultados enquadrados na Categoria 2 são considerados *erros* e são tolerados apenas para 5% dos resultados.

Com base na porcentagem de resultados nas diferentes categorias de enquadramento, avaliou-se a adequação da classificação do Eucalipto baseada na NBR 15521 (2007).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar a compreensão dos resultados, na Tabela 4.1 apresentam-se os resultados médios gerais obtidos nos ensaios das vigas de cada espécie. Posteriormente os resultados serão analisados de forma mais detalhada considerando os tópicos específicos de análise. Os resultados individuais das vigas de cada espécie são apresentados no Anexo I.

Tabela 4.1 – Valores médios, na condição de equilíbrio, de umidade (U_{eq}), de densidade aparente (ρ_{ap}), de velocidade (V_{LLeq}), de módulo de elasticidade (E_{Meq}) e de coeficiente de rigidez (C_{LLeq}) e, velocidade na condição saturada (V_{LLsat}).

Espécie	Idade	Número de vigas	U_{eq} [%]	ρ_{ap} [kg.m ⁻³]	V_{LLsat} [m.s ⁻¹]	V_{LLeq} [m.s ⁻¹]	E_{Meq} [MPa]	C_{LLeq} [MPa]
Grandis	8 anos	22	14,61 (17,59)	501 (6,47)	4136 (3,96)	5307 (2,12)	7968 (47,02)	14127 (8,68)
Grandis	34 anos	247	14,46 (4,87)	719 (15,39)	4158 (7,46)	5136 (6,07)	14841 (17,42)	18869 (14,78)
Citriodora	10 anos	15	9,90 (6,86)	727 (4,70)	4224 (6,50)	5521 (4,00)	14681 (24,85)	22250 (10,89)
Pellita	26 anos	55	11,11 (10,80)	781 (6,89)	3750 (6,31)	5096 (3,52)	11222 (38,00)	20365 (10,99)
Globulus	28 anos	35	20,45 (7,82)	728 (11,80)	3865 (5,58)	4828 (5,98)	13801 (11,45)	16880 (10,31)

*valores entre parêntesis são os coeficientes de variação (%)

4.1 – Avaliação da equação de correção da umidade

A Tabela 4.2 resume os resultados médios de velocidade e de umidade, obtidos na condição saturada e durante a secagem das vigas proveniente das árvores de cada espécie. Tendo em vista que o *E. grandis* apresentou secagem muito mais rápida que as demais espécies, o número de umidades intermediárias nas quais se obteve a velocidade foi menor.

Tabela 4.2 – Valores médios de velocidade nas vigas provenientes das árvores.

Espécie	<i>E. grandis</i>	<i>E. citriodora</i>	<i>E. pellita</i>
	n = 22	n = 15	n = 55
Condição 1 – Saturada (dezembro de 2011)			
Umidade (%)	41,7	47,3	46,2
Velocidade (m.s ⁻¹)	4129	4193	3727
Condição 2 (janeiro de 2012)			
Umidade (%)	20,3	33,9	34,5
Velocidade (m.s ⁻¹)	4491	4486	4026
Condição 3 (fevereiro de 2012)			
Umidade (%)	15,7	26,4	29,0
Velocidade (m.s ⁻¹)	4609	4554	4107
Condição 4 (março de 2012)			
Umidade (%)	12,5	19,5	23,9
Velocidade (m.s ⁻¹)	5255	5241	4782
Condição 5 (maio de 2012)			
Umidade (%)	12,0	18,7	22,6
Velocidade (m.s ⁻¹)	5265	5301	4825
Condição 6 (agosto de 2012)			
Umidade (%)	-	10,9	12,6
Velocidade (m.s ⁻¹)	-	5543	5101

n = número de vigas

A análise da normalidade dos dados, que deve anteceder o tratamento estatístico, foi realizada utilizando-se as estatísticas de assimetria e de curtose. Para essas estatísticas a normalidade dos dados é aceita se os valores estiverem no intervalo -2 a +2. Os resultados destas análises estatísticas são apresentados no Anexo 2.

Como os conjuntos de dados apresentaram valores de assimetria e de curtose dentro do intervalo [-2, 2], sua distribuição é considerada normal, ao nível de significância de 95%, e as análises podem ser feitas utilizando os métodos clássicos da estatística (paramétricos).

A comparação entre as velocidades na condição saturada, obtidas no ensaio e calculada pela equação de correção da velocidade (Equação 2.4) da NBR 15521 (2007), foi realizada para cada espécie de eucalipto (Tabela 4.3). O teste retorna um intervalo de

confiança para a diferença entre as médias, e, se este intervalo contiver o valor zero, então os dados analisados são considerados estatisticamente equivalentes.

Tabela 4.3 – Intervalo de confiança para a diferença de médias entre a velocidade saturada obtida nos ensaios e obtida utilizando a equação de correção da velocidade da NBR 15521 (2007).

Comparação entre Médias	
Espécie	Intervalo de Confiança
<i>E. Grandis</i>	[-266,701; -13,4216]
<i>E. Citriodora</i>	[-733,331; -324,244]
<i>E. Pellita</i>	[-709,628; -554,018]

Os valores da tabela 4.3 indicam que para nenhuma das espécies os valores de velocidade na condição saturada, obtida nos ensaios e calculada pela equação da norma, foram estatisticamente equivalentes. A princípio este resultado indica que o uso da equação da NBR 15521 (2007) para corrigir a velocidade em função da umidade pode fazer com que sejam cometidos erros de classificação do eucalipto, já que a velocidade prevista pela equação da norma é diferente da velocidade real obtida no ensaio. Para avaliar se, apesar dos valores de velocidade saturada obtida nos ensaios e utilizando a norma não serem estatisticamente equivalentes, existe correlação significativa entre eles, foram realizadas regressões lineares (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Modelos e parâmetros de correlação das regressões lineares entre a velocidade saturada obtida no ensaio das vigas e a velocidade saturada obtida por meio da equação de correção da velocidade da NBR 15521 (2007).

Espécie	Modelo	R ²	R	P-Valor
<i>E. grandis</i>	$-466 + 1,06 \cdot V_{\text{norma}}$	79,6%	0,89	0,0000
<i>E. citriodora</i>	$634 + 0,75 \cdot V_{\text{norma}}$	82,3%	0,91	0,0000
<i>E. pellita</i>	$228 + 0,80 \cdot V_{\text{norma}}$	83,0%	0,91	0,0000
Todas	$-21,5 + 0,90 \cdot V_{\text{norma}}$	36,9%	0,61	0,0000

Os resultados apresentados na Tabela 4.4 indicam que, para as espécies tomadas de forma individual, todos os modelos de regressão foram estatisticamente significativos ($P\text{-valor} < 0,05$) e que as correlações entre os dois parâmetros são fortes, já que o menor valor de R foi 0,89 para a espécie *E. grandis*. Esse resultado indica que numericamente as velocidades saturadas, obtidas pelo ensaio e pela norma, não são iguais, mas são correlacionáveis. A equação de correlação poderia ser utilizada para, por exemplo, corrigir para espécies de eucalipto o valor previsto pela norma para espécies tropicais. No entanto, os modelos de correlação foram diferentes para as espécies, o que dificulta a aplicação em problemas práticos, já que seria necessário ter a equação de correlação para todas as espécies de eucalipto a serem classificadas utilizando a NBR 15521 (2007). O modelo de correlação obtido para todas as espécies juntas foi estatisticamente significativo, mas os coeficientes de correlação e de determinação foram baixos.

Os valores de velocidade previstos pela norma foram, em geral, superiores aos valores reais obtidos nos ensaios (13% em média). Esse resultado indica que a classificação utilizando essa velocidade corrigida indicaria, pelo menos, uma classe superior, estando, portanto contra a segurança (Categoria 2 de enquadramento na classificação). A aplicação do modelo de correlação obtido para o conjunto das espécies, para corrigir o valor previsto pela norma, apesar de ter correlação fraca, rebaixaria, em média 2%, os valores da velocidade saturada. Assim, em muitos casos a classificação seria correta (Categorias 1 e 3), principalmente nas classes inferiores da norma para as quais as mudanças de faixas de classificação são realizadas para variações de velocidade de 4 a 7%. Considerando o texto de Kretschmann & Hernandez (2006) o coeficiente de correlação obtido para todas as espécies de eucalipto ensaiadas ($R = 0,61$) estaria dentro da faixa normalmente obtida para as correlações de propriedades da madeira, as quais são utilizadas para a elaboração de classes de resistência em várias normas internacionais.

Para verificar se os valores obtidos nos ensaios das vigas, na condição saturada e seca, apresentariam modelo de correlação semelhante ao proposto pela NBR 15521(2007), foram realizadas regressões múltiplas (Tabela 4.5), nas quais a variável dependente foi a velocidade saturada obtida no ensaio e as variáveis independentes foram a velocidade na condição seca obtida no ensaio (entre 12 e 30%), a umidade (%) e a densidade da viga (kg.m^{-3}), seguindo o modelo da norma.

Tabela 4.5 – Modelos e parâmetros de correlação das regressões múltiplas considerando a velocidade saturada (V_{sat}) e seca (V_{seca}), a Umidade (U) e a densidade (ρ).

Espécie Analisada	Modelo	R ² (%)	P-valor
<i>E. Grandis</i>	$V_{sat} = -2041 + 1,23 \cdot V_{seca} - 23 \cdot U + 0,12 \cdot \rho$	89	0,0000
<i>E. Citriodora</i>	$V_{sat} = -845 + 0,78 \cdot V_{seca} + 31 \cdot U + 0,51 \cdot \rho$	83	0,0001
<i>E. Pellita</i>	$V_{saturada} = -1404 + 0,84 \cdot V_{seca} + 11 \cdot U + 0,92 \cdot \rho$	83	0,0000
Todos	$V_{saturada} = -2544 + 1,24 \cdot V_{seca} + 17 \cdot U + 0,33 \cdot \rho$	90	0,0000
Equação da NBR 7190: $V_{saturada} = -1745 + 1,00 \cdot V_{seca} + 16 \cdot U + 1,00 \cdot \rho$			

Por meio da Tabela 4.5 verifica-se que utilizando os dados experimentais dos ensaios das vigas das 3 espécies de eucalipto estudadas no projeto e os parâmetros propostos na NBR 15521 (2007), a equação múltipla se ajusta adequadamente aos dados, sendo significativa (P-valor < 0,05) e explicando 90% da variabilidade da velocidade saturada. No entanto, os coeficientes da regressão não são iguais aos da NBR 15521 (2007), obtidos para espécies tropicais.

Logo, considerando as três espécies de eucalipto estudadas, *E. grandis*, *E. citriodora* e *E. pellita*, com idades de 8, 10 e 26 anos, respectivamente, conclui-se que não é adequado utilizar, diretamente, a equação de determinação da velocidade na condição saturada proposta pela NBR 15521 (2007) para espécies tropicais. Devem ser elaborados estudos adicionais com outras amostragens de eucalipto para confirmar o modelo de previsão da velocidade saturada obtido nesta pesquisa.

4.2 – Correções do Coeficiente de Rigidez (C_{LL}) e do Módulo de Elasticidade (E_M) para a condição padrão de umidade (12%)

O coeficiente de rigidez (C_{LL}) e o módulo de elasticidade (E_M) devem estar na condição de umidade de 12%, que é o valor de referência, para uso nas classes de rigidez da NBR 15521 (2007).

Portanto, para o cálculo de C_{LL} a densidade e a velocidade devem ser mensuradas com as peças a 12% de umidade. Infelizmente, embora a secagem das vigas tenha sido realizada, não foi possível, na maioria dos casos, a obtenção de umidades finais dentro da faixa de 11% a 13% (Tabela 4.6), sendo necessário realizar correções.

É esperado que as velocidades na condição saturada e seca estejam adequadamente correlacionadas (COSTA, 2005). Além disso, acima do ponto de saturação a variação da velocidade é pequena, de forma que pode ser considerada praticamente constante (COSTA, 2005). Tendo em vista que as peças apresentavam variação de umidade na condição seca (Tabela 4.6), a correlação direta da velocidade na condição saturada (na qual variações de umidade não interferem significativamente) com a velocidade na condição seca poderia estar prejudicada. Adicionalmente, mesmo procedendo a secagem de forma lenta e controlada, conforme detalhado no item relativo a metodologia, foi impossível evitar totalmente os defeitos de secagem, que podem influenciar (reduzir) a velocidade na condição seca. Interferências na velocidade obtida na condição seca afetarão o cálculo do C_{LL} .

Pela Tabela 4.6 verifica-se que o coeficiente de correlação mínimo foi de 0,75 (*E. grandis*) e máximo foi de 0,92 (*E. citriodora*), indicando que no caso do *E. grandis* apenas 56% da variabilidade da velocidade na condição seca foi explicada pela velocidade na condição saturada. Portanto, para essa espécie houve outros parâmetros que interferiram na velocidade na condição seca. COSTA (2005) obteve $R = 0,90$ para o *Eucalyptus citriodora* avaliado.

Tabela 4.6 – Umidades médias, valores máximos e mínimos das umidades das vigas durante a medição da velocidade na condição seca e modelos de regressão da velocidade seca em função da velocidade saturada.

Espécie/idade	Umidade média [%]	Valores mínimos e máximos [%]	Modelo de Regressão	R
<i>E. grandis</i> 8 anos n = 22 vigas	14,6 (17,6)	10,8 a 18,9	$V_{LL\text{ seca}} = 0,58 V_{LL\text{ sat}} + 2919$	0,87
<i>E. grandis</i> 34 anos n = 247 vigas	14,3 (10,3)	10,7 a 15,7	$V_{LL\text{ seca}} = 0,75 V_{LL\text{ sat}} + 1999$	0,75
<i>E. citriodora</i> 10 anos n = 15 vigas	9,9 (6,9)	8,6 a 10,7	$V_{LL\text{ seca}} = 0,74 V_{LL\text{ sat}} + 2408$	0,92
<i>E. pellita</i> 26 anos n = 55 vigas	11,1 (10,8)	9,1 a 17,0	$V_{LL\text{ seca}} = 0,77 V_{LL\text{ sat}} + 2212$	0,89
<i>E. globulus</i> 28 anos n = 35 vigas	20,5 (7,8)	15,0 a 23,7	$V_{LL\text{ seca}} = 1,14 V_{LL\text{ sat}} + 436$	0,85

*valores entre parêntesis são os coeficientes de variação (%)

Sandoz (2006) e Costa (2005) apresentaram propostas de correção da velocidade em uma umidade “U” para a velocidade com 12% de umidade (Equações 2.5 e 2.7). O modelo de Sandoz (2006) é geral enquanto o modelo de Costa (2005) foi elaborado por espécie. A espécie de Eucalipto utilizada por Costa (2005) em sua pesquisa foi o *citriodora*. O ajuste obtido utilizando a equação de Costa (2005), avaliado por meio de regressão linear entre a velocidade medida na condição saturada ($V_{LL\text{ sat}}$) e a velocidade seca corrigida para 12%, se mostrou mais adequado para as correções (Tabela 4.9).

A utilização das velocidades corrigidas para 12% de umidade (V_{LL12}), em geral, mantiveram o coeficiente de correlação da regressão obtida entre a velocidade seca (com umidades variando $V_{LL\text{ seca}}$) e a velocidade saturada (Tabela 4.6). A única espécie que teve a correlação prejudicada pela aplicação da equação foi o *E. grandis* (Tabelas 4.6 e 4.7), indicando que os modelos de correção de Costa (2005) e Sandoz (2006) foram menos adequados para essa espécie.

Tabela 4.7– Correlações entre velocidades corrigidas para 12% (V_{LL12}) utilizando os modelos de Sandoz (2006) e Costa (2005) e velocidades saturadas obtidas nos ensaios (V_{LLsat}).

Espécie/idade	Modelo de correção	Modelo de regressão	P-valor	R
<i>E. grandis</i> 8 anos	Sandoz (2006)	$V_{LL12} = 0,46 V_{LLsat} + 3522$	0,0106	0,53
n = 22 vigas	Costa (2005)	$V_{LL12} = 0,52 V_{LLsat} + 3217$	0,0002	0,71
<i>E. grandis</i> 34 anos	Sandoz (2006)	$V_{LL12} = 0,75 V_{LLsat} + 2083$	0,0000	0,75
n = 247 vigas	Costa (2005)	$V_{LL12} = 0,75 V_{LLsat} + 2018$	0,0000	0,75
<i>E. citriodora</i> 10 anos	Sandoz (2006)	$V_{LL12} = 0,74 V_{LLsat} + 2317$	0,0000	0,90
n = 15 vigas	Costa (2005)	$V_{LL12} = 0,73 V_{LLsat} + 2379$	0,0000	0,92
<i>E. pellita</i> 26 anos	Sandoz (2006)	$V_{LL12} = 0,66 V_{LLsat} + 1891$	0,0000	0,89
n = 55 vigas	Costa (2005)	$V_{LL12} = 0,60 V_{LLsat} + 1715$	0,0000	0,89
<i>E. globulus</i> 28 anos	Sandoz (2006)	$V_{LL12} = 1,18 V_{LLsat} + 532$	0,0000	0,84
n = 35 vigas	Costa (2005)	$V_{LL12} = 1,19 V_{LLsat} + 366$	0,0000	0,85

Da mesma forma que C_{LL} , o E_M também foi corrigido para a condição de referência de 12% de umidade. Para essa correção foi utilizada equação (Equação 4.1) da NBR 7190 (2007).

$$E_{12} = E_U \left[1 + \frac{2(U-12)}{100} \right] \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde E_{12} = módulo de elasticidade a 12% de umidade; E_U = módulo de elasticidade obtido a U% de umidade; U = umidade (%).

Tendo em vista que o *E. Globulus* foi ensaiado em flexão na Espanha, e que os resultados do módulo de elasticidade em flexão foram encaminhados já corrigidos para 12% de umidade, para essa espécie a expressão de correção utilizada foi a da norma Europeia EN 408 (2010) (Equação 4.2). A análise realizada com o uso das duas equações, nas espécies que foram ensaiadas no Brasil, mostrou que as diferenças médias de resultados foram muito pequenas ($E_{12,norma\ europeia}/E_{12,norma\ brasileira} \cong 0,98$), provavelmente porque a faixa de variação da umidade era pequena.

$$E_{12} = E_U \left[1 + \frac{1(U-12)}{100} \right] \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde E_{12} = módulo de elasticidade a 12% de umidade; E_U = módulo de elasticidade obtido a U% de umidade; U = umidade (%).

4.3 – Categorias de Classificação

Para visualizar, de forma geral, o comportamento da classificação do Eucalipto segundo a NBR 15521 (2007), foram utilizados os valores médios (por espécie e por idade) de velocidade na condição saturada (V_{LLsat}) e de coeficiente de rigidez na condição de equilíbrio (C_{LL12}). Verifica-se (Tabela 4.8) que o valor previsto para o módulo de elasticidade em flexão estática (E_M) foi superestimado para as espécies mais jovens (*E. grandis* de 8 anos e *E. citriodora* de 10 anos) – Categoria 2. Para as espécies mais velhas o valor de E_M foi estimado na faixa exata para duas das espécies (Categoria 1) e subestimado (uma faixa de classificação abaixo – Categoria 3) para uma delas.

Tabela 4.8 – Valores médios de velocidade na condição saturada (V_{LLsat}), classificação média das vigas (NBR 15521, 2007) com base na V_{LLsat} , densidade aparente corrigida (ρ), coeficiente de rigidez na direção longitudinal corrigida (C_{LL}) e módulo de elasticidade em flexão estática corrigida (E_M) a 12% de umidade.

Espécie/idade	V_{LLsat} [m.s ⁻¹]	$\rho_{12\%}$ [%]	$C_{LL\ 12\%}$ [MPa]	$E_M\ 12\%$ [MPa]
<i>E. grandis</i> 8 anos n = 22 vigas	4136 (3,96) UD 35	495 (7,10)	14196 (8,55) UD 30	8266 (44,95) UD 20
<i>E. grandis</i> 34 anos n = 247 vigas	4158 (7,46) UD 40	711 (15,31)	19231 (14,83) UD 40	15540 (17,74) UD 40
<i>E. citriodora</i> 10 anos n = 15 vigas	4224 (6,50) UD 55	734 (4,76)	21872 (10,89) UD 45	14051 (24,34) UD 35
<i>E. pellita</i> 26 anos n = 55 vigas	3750 (6,31) UD 30	785 (6,92)	12332 (16,46) UD 25	10985 (37,18) UD 30
<i>E. globulus</i> 28 anos n = 35 vigas	3865 (5,58) UD 30	697 (11,90)	17108 (10,31) UD 35	13801 (11,45) UD 35

*valores entre parêntesis são os coeficientes de variação (%)

Considerando os valores individualizados obtidos nas vigas observam-se comportamentos semelhantes aos identificados na avaliação geral utilizando as médias (Tabela 4.9 e Figuras 4.1 e 4.2). Nas espécies com menor idade a classe de resistência foi superestimada (Categoria 2) de forma significativa tanto para V_{LL} quanto para C_{LL} como estimadores (Tabela 4.9 e Figuras 4.1 e 4.2). Nas espécies de maior idade, embora as porcentagens de enquadramento da classificação na Categoria 2 tenham sido menores quando comparadas com as espécies mais jovens, os valores foram bem superiores aos admitidos neste tipo de classificação (5%). Tendo em vista que as faixas de classificação são elaboradas a partir de modelos de regressão rebaixados (percentil de 5%), o enquadramento de grande parte da classificação na Categoria 3 é esperado.

Tabela 4.9 – Categorias de estimação do módulo de elasticidade (E_M) considerando as faixas da NBR 15521 (2007) e os estimadores velocidade saturada (V_{LLsat}) e coeficiente de rigidez a 12% de umidade ($C_{LL12\%}$).

Espécie/idade	Classificação por V_{LLsat}			Classificação por $C_{LL12\%}$		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
<i>E. grandis</i> 8 anos	0,0%	95%	5%	9%	73%	18%
<i>E. grandis</i> 34 anos	22%	28%	50%	41%	24%	35%
<i>E. citriodora</i> 10 anos	34%	53%	13%	0,0%	93%	7%
<i>E. pellita</i> 26 anos	27%	33%	40%	29%	20%	51%
<i>E. globulus</i> 28 anos	26%	3%	71%	69%	25%	6%

C1 = Categoria 1: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL12\%}$ igual a classe real de $E_M12\%$

C2 = Categoria 2: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL12\%}$ superior a classe real de $E_M12\%$

C3 = Categoria 3: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL12\%}$ inferior a classe real de $E_M12\%$

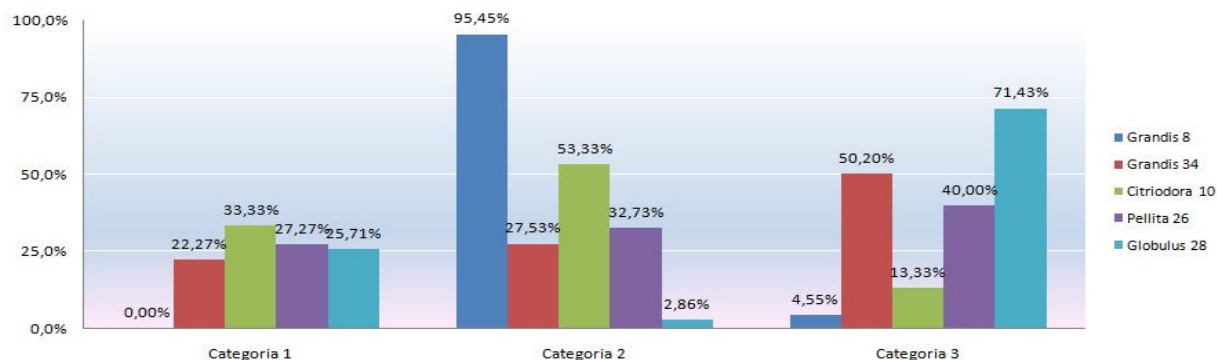


Figura 4.1. Categorias de classificação por rigidez (E_{M12}) das peças de eucalipto utilizando os valores individualizados de velocidade na condição saturada (V_{LLsat}).

C1 = Categoria 1: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL\ 12\%}$ igual a classe real de $E_{M\ 12\%}$

C2 = Categoria 2: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL\ 12\%}$ superior a classe real de $E_{M\ 12\%}$

C3 = Categoria 3: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL\ 12\%}$ inferior a classe real de $E_{M\ 12\%}$

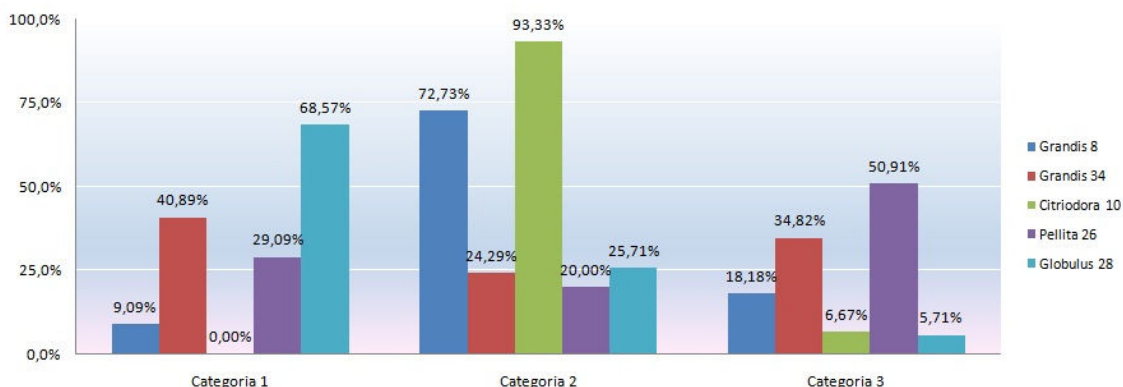


Figura 4.2. Categorias de classificação por rigidez (E_{M12}) das peças de eucalipto utilizando os valores individualizados de coeficiente de rigidez a 12% de umidade (C_{LL12}).

C1 = Categoria 1: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL\ 12\%}$ igual a classe real de $E_{M\ 12\%}$

C2 = Categoria 2: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL\ 12\%}$ superior a classe real de $E_{M\ 12\%}$

C3 = Categoria 3: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL\ 12\%}$ inferior a classe real de $E_{M\ 12\%}$

Tendo em vista a ocorrência de porcentagem elevada de peças com enquadramento na Categoria 2, exceto para o *E. globulus* quando o parâmetro de entrada na classificação é V_{LLsat} (Tabela 4.9 e Figuras 4.1 e 4.2), verificou-se a possibilidade de ser aplicado coeficiente de correção da velocidade, tanto na condição saturada quanto na condição seca, para que as faixas de classificação da NBR 15521 (2007) pudessem ser utilizada para o Eucalipto. Para determinar esse coeficiente de correção os valores médios de E_M , obtidos nas vigas de cada espécie, foram utilizados para determinar a classe de enquadramento na

NBR 15521 (2007). O valor da velocidade saturada estimada ($V_{LLsat,est.}$) foi tomado como sendo a velocidade mínima da faixa de enquadramento do módulo de elasticidade médio e, utilizando-se esse valor de velocidade foi calculada a relação entre o V_{LLsat} médio obtido nos ensaios para a espécie (Tabela 4.8) e o $V_{LLsat,est.}$ (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 – Relação entre velocidade saturada estimada ($V_{Lsat,est}$) em função do enquadramento de E_M nas classes da NBR 15521 (2007) e velocidade saturada média ($V_{LLsat,médio}$) do grupo de vigas de cada espécie.

Espécie/idade	E_M 12% [MPa]	$V_{LLsat,est}$ [m.s⁻¹]	$V_{LLsat, médio}$ [m.s⁻¹]	Relação
<i>E. grandis</i> 8 anos n = 22 vigas	8034 (3512)	<3040	4116	1,35
<i>E. grandis</i> 34 anos n = 247 vigas	15549 (2715)	3690	4158	1,13
<i>E. citriodora</i> 10 anos n = 15 vigas	14724 (2293)	3690	4187	1,13
<i>E. pellita</i> 26 anos n = 55 vigas	11133 (3970)	3040	3754	1,23
<i>E. globulus</i> 28 anos n = 35 vigas	13801 (1581)	3690	3865	1,05
Relação média				1,18

Valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão

Aplicando a relação média para corrigir os valores de velocidade saturada e seca, verifica-se que os enquadramentos na Categoria 2 foram sempre menores do que 5% para as espécies de maior idade, mas para as espécies de menor idade, embora essa categoria tenha sido reduzida fortemente, as porcentagens são, em geral, ainda superiores a 5% (Tabela 4.11 e Figuras 4.3 e 4.4).

Tabela 4.11 – Categorias de estimação do módulo de elasticidade (E_M) considerando as faixas da NBR 15521 (2007) e os estimadores velocidade saturada (V_{LLsat}) e coeficiente de rigidez a 12% de umidade ($C_{LL12\%}$) corrigidos.

Espécie/idade	Classificação por V_{LLsat}			Classificação por $C_{LL12\%}$		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
<i>E. grandis</i> 8 anos	32%	41%	27%	46%	9%	45%
<i>E. grandis</i> 34 anos	7%	0%	93%	2%	1%	97%
<i>E. citriodora</i> 10 anos	7%	7%	86%	34%	13%	53%
<i>E. pellita</i> 26 anos	31%	4%	65%	11%	2%	87%
<i>E. globulus</i> 28 anos	0%	0%	100%	0%	0%	100%

C1 = Categoria 1: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL12\%}$ igual a classe real de $E_M 12\%$

C2 = Categoria 2: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL12\%}$ superior a classe real de $E_M 12\%$

C3 = Categoria 3: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL12\%}$ inferior a classe real de $E_M 12\%$

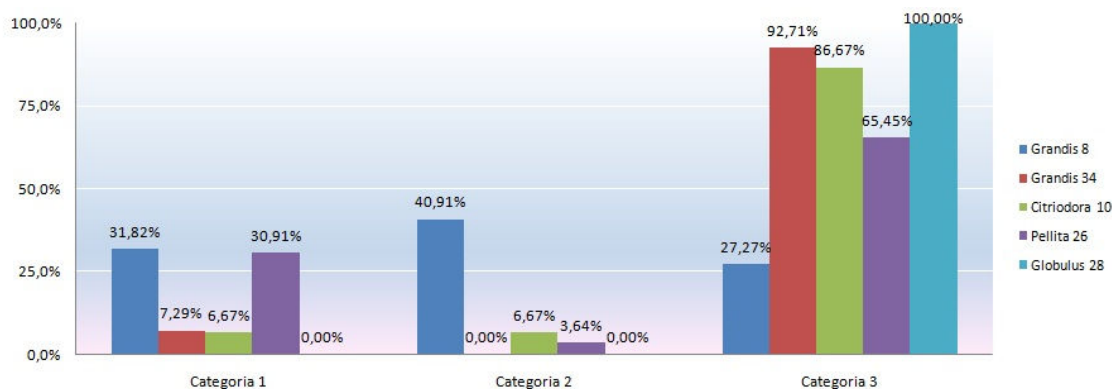


Figura 4.3. Distribuição das categorias de classificação das vigas de Eucalipto utilizando a Velocidade na condição saturada corrigida pelo fator 1,18 como parâmetro de classificação.

C1 = Categoria 1: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL12\%}$ igual a classe real de $E_M 12\%$

C2 = Categoria 2: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL12\%}$ superior a classe real de $E_M 12\%$

C3 = Categoria 3: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL12\%}$ inferior a classe real de $E_M 12\%$

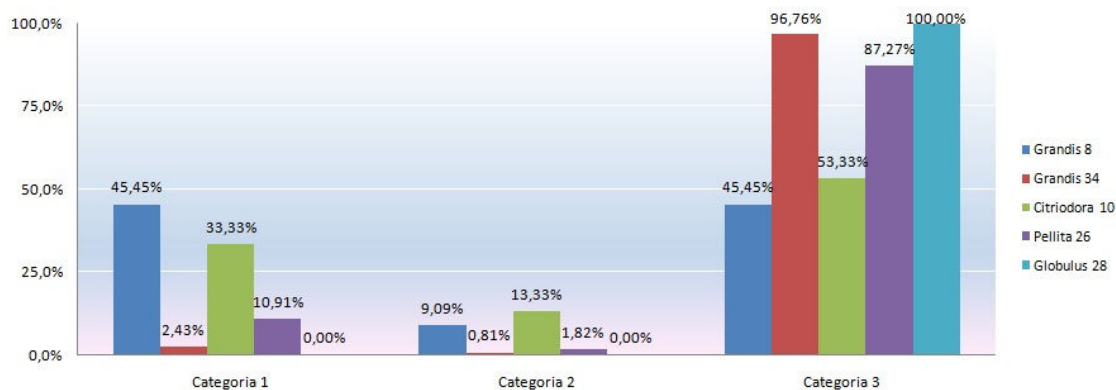


Figura 4.4. Distribuição das categorias de classificação das vigas de Eucalipto utilizando o coeficiente de rigidez obtido com a velocidade na condição seca corrigida pelo fator 1,18 como parâmetro de classificação

C1 = Categoria 1: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL\ 12\%}$ igual a classe real de $E_M\ 12\%$

C2 = Categoria 2: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL\ 12\%}$ superior a classe real de $E_M\ 12\%$

C3 = Categoria 3: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL\ 12\%}$ inferior a classe real de $E_M\ 12\%$

Considerando-se esses resultados verifica-se que, para as peças obtidas das árvores mais velhas (26, 28 e 34 anos) foi viável a aplicação de coeficiente de correção fixo (1,18) para que as faixas de classificação da NBR 15521 (2007) fossem aplicáveis para o Eucalipto. Para as peças provenientes de árvores mais jovens (8 e 10 anos) o coeficiente médio não foi suficiente para promover o ajuste.

Para verificar a possibilidade de propor, a exemplo do que foi feito com espécies nativas tropicais na NBR 15521 (2007), faixas de classificação da madeira de *Eucalyptus*, foram analisadas as correlações entre os parâmetros de classificação (velocidade e coeficiente de rigidez) e o módulo de elasticidade na flexão estática.

As correlações obtidas para as espécies de forma isolada (Tabela 4.12) mostram que em alguns casos o resultado não foi o esperado, pois normalmente a relação direta com a velocidade apresenta coeficientes de correlação mais baixos do que a relação com o coeficiente de rigidez, que envolve a densidade e a velocidade. No entanto, é importante ressaltar que tanto a densidade quanto a velocidade na condição seca tiveram que ser corrigidas para 12% de umidade utilizando equações de correção, aspecto este que embuti erros. Além disso, o eucalipto tem, normalmente, problemas de secagem, o que pode também influenciar as correlações, pois a influência dos defeitos no ensaio de flexão

depende da posição dos mesmos na peça enquanto a velocidade é um valor global. Esse aspecto foi discutido por Arriaga et al (2006) e Sandoz (1990).

Tabela 4.12 – Modelos de Regressão entre Módulo de Elasticidade (E_M) e Velocidade longitudinal saturada (V_{LLsat}).

Espécie	Modelo	P-valor	R
<i>E. grandis</i> 8 anos	$E_M = 14,2 V_{LLsat} - 50726$	0,0004	0,71
	$E_M = 2,6 C_{LL} - 29473$	0,0016	0,72
<i>E. grandis</i> 34 anos	$E_M = 5,7 V_{LLsat} - 8135$	0,0000	0,67
	$E_M = 0,88 C_{LL} - 1113$	0,0000	0,90
<i>E. citriodora</i> 10 anos	$E_M = 6,9 V_{LLsat} - 14190$	0,0009	0,81
	$E_M = 0,75 C_{LL} - 1758$	0,0011	0,78
<i>E. pellita</i> 26 anos	$E_M = 10,9 V_{LLsat} - 29730$	0,0000	0,55
	$E_M = 1,14 C_{LL} - 2885$	0,0000	0,54
<i>E. globulus</i> 28 anos	$E_M = 5,91 V_{LLsat} - 9022$	0,0000	0,81
	$E_M = 0,73 C_{LL} + 1335$	0,0000	0,81

Regressões foram realizadas com os resultados do *E. grandis* de 8 anos e de 34 anos em bloco, visando analisar a influência da idade. Na regressão entre E_M e V_{LL} verificou-se que todos os dados provenientes do *E. grandis* de 8 anos ficaram fora do limite de predição do modelo (linha preta na Figura 4.4). Esse comportamento confirma os resultados obtidos por Bertoldo (2011) e Massak (2010), que demonstraram que em espécies mais jovens, nas quais o lenho é formado praticamente apenas de madeira juvenil, as velocidades são muito mais elevadas do que na madeira adulta, para um determinado nível de valor de módulos de elasticidade.

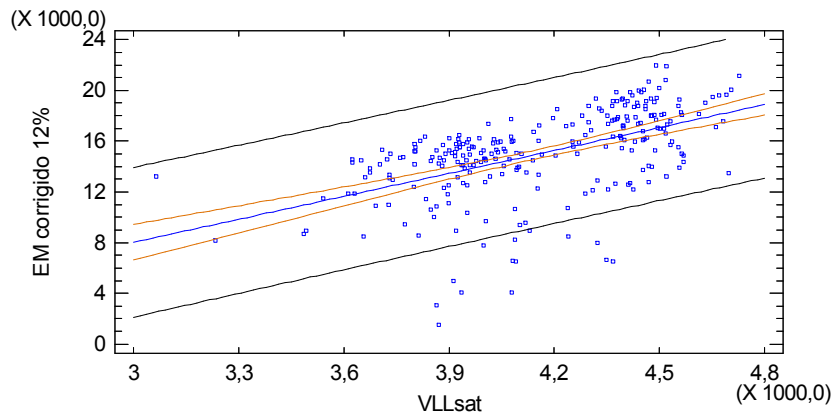


Figura 4.4. Modelo de regressão entre velocidade saturada (V_{LLsat} [$m.s^{-1}$]) e módulo de elasticidade a 12% de umidade ($E_{M12\%}$ [MPa]) para o *E. grandis* de 8 e 34 anos.

Aplicando os modelos de correlação da Tabela 4.12 verifica-se que, para velocidade de $4000 m.s^{-1}$ o E_M esperado para o *E. grandis* de 8 anos é de 6074 MPa enquanto para essa mesma velocidade o E_M esperado para o *E. grandis* de 34 anos é de 14665 MPa. Outra comparação que pode ser feita para verificar esse comportamento é utilizar os valores médios. O valor médio da velocidade saturada das vigas de *E. grandis* de 8 anos foi de $4136 m.s^{-1}$ e o $E_{M12\%}$ médio de 8266 MPa. Para o *E. grandis* de 34 anos a velocidade saturada média das vigas foi de $4158 m.s^{-1}$, praticamente igual à velocidade nas vigas de 8 anos, enquanto o $E_{M12\%}$ médio de 15540 MPa, 88% superior. Embora nesta pesquisa não se tenha realizado análise anatômica das peças ensaiadas, a provável explicação para esse comportamento deve estar ligada à estrutura anatômica diferenciada da madeira proveniente das árvores de 8 anos, que provavelmente contém somente madeira juvenil, e das peças provenientes das árvores de 34 anos que contém tanto madeira juvenil quanto adulta.

Para a regressão entre E_M e C_{LL} (Figura 4.5) utilizando o *E. grandis* de 8 e 34 anos, verifica-se que apenas 5 pontos estão abaixo do limite de predição. Comparando esse resultado com o apresentado na Figura 4.4 é possível concluir que a densidade atuou como fator de correção, homogeneizando, parcialmente, o comportamento do *E. grandis* nas diferentes idades. A densidade média do *E. grandis* de 34 anos foi de $711 kg.m^{-3}$, 44%

superior a do eucalipto *E. grandis* de 8 anos, enquanto a velocidade média a 12% de umidade equivalente à obtida na espécie mais velha. Tendo em vista que a velocidade é elevada ao quadrado no cálculo do coeficiente de rigidez, a densidade permite apenas reduzir o impacto do comportamento da madeira juvenil em aplicações de propagação de ondas visando a classificação da madeira, mas não eliminá-la.

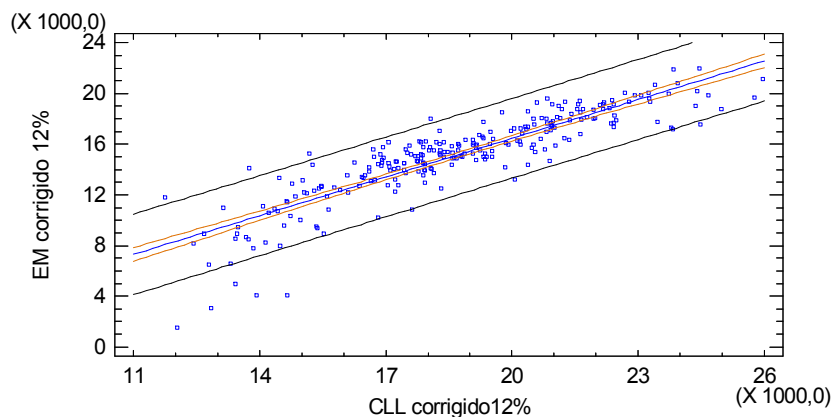


Figura 4.5. Modelo de regressão entre o coeficiente de rigidez ($C_{LL12\%}$ [MPa]) e o módulo de elasticidade ($E_{M12\%}$ [MPa]), ambos corrigidos para 12% de umidade, para o *E. grandis* de 8 e 34 anos.

Analisando o comportamento dos dois eucaliptos mais jovens (*E. grandis* 8 anos e *E. citriodora* 10 anos), verifica-se que apesar do modelo ser estatisticamente significativo (P-valor 0,0000) a correlação foi inferior à obtida para as espécies separadamente (Equação 4.3 e Tabela 4.12). Sabe-se que a variabilidade da amostra é importante para a obtenção de modelos com melhores coeficientes de correlação. No caso da velocidade saturada o coeficiente de variação do conjunto (*E. grandis* 8 anos e *E. citriodora*) foi de 5,31%, superior ao do *E. grandis* de 8 anos (3,96%), mas inferior ao do *E. citriodora* de 10 anos (6,49%). Por outro lado, considerando a regressão com C_{LL} (Equação 4.4), verifica-se que o modelo foi significativo (P-valor = 0,0000) e que a correlação foi superior para o agrupamento das duas espécies do que para as espécies separadas (Tabela 4.12). Nesse caso o coeficiente de variação do conjunto foi de 24,5%, superior às duas espécies quando

consideradas de forma isolada (8,55% para o *E. grandis* de 8 anos e 10,9% para o *E. citriodora* de 10 anos).

$$E_{M12\%} = 6,02 V_{LLsat} - 10039 \text{ com } R = 0,53 \quad \text{Equação 4.3}$$

$$E_{M12\%} = 1,02 C_{LL} - 3874 \text{ com } R = 0,89 \quad \text{Equação 4.4}$$

Na análise estatística, os 5 pontos que ficaram fora do limite de predição do modelo de correlação entre $E_{M12\%}$ e $C_{LL12\%}$ (Figura 4.5) são correspondentes a valores do *E. grandis*. Na análise estatística estes pontos foram considerados como resíduos não usuais. Retirando-se esses pontos o modelo passa a ser o da Equação 4.5, cujo coeficiente de correlação é praticamente o mesmo obtido na Equação 4.4.

$$E_{M12\%} = 0,94 C_{LL} - 2219 \text{ com } R = 0,90 \quad \text{Equação 4.5}$$

Para avaliar o comportamento dos modelos de correlação entre $E_{M12\%}$ e V_{LLsat} e entre $E_{M12\%}$ e $C_{LL12\%}$ para as espécies com mais idade, foi aplicado o teste estatístico de calibração de modelos. Esse teste avalia se o modelo linear é adequado para descrever o comportamento dos dados ou se um modelo mais complexo deveria ser utilizado. Para isso o teste realizado foi o denominado “*lackoffit*” (falta de ajuste). Nesse teste se o P-valor do ajuste (*lackoffit*) for maior ou igual a 0,05 o modelo é considerado adequado para representar o comportamento dos dados, com nível de confiança de 95%.

O modelo que foi ajustado para o conjunto das espécies adultas (*E. grandis* de 34 anos, *E. pellita* de 26 anos e o *E. globulus* de 28 anos), considerando a velocidade na condição saturada como parâmetro de estimação do modulo de elasticidade na flexão a 12% de umidade, apresentou P-valor de ajuste de 0,3214, indicando que o modelo linear é adequado (Equação 4.6).

$$E_{M12\%} = 7,0 V_{LLsat} - 13766 \text{ com } R = 0,71 \quad \text{Equação 4.6}$$

O software estatístico também realiza a comparação de modelos, em função do melhor coeficiente de correlação. A análise é realizada com 27 diferentes modelos de

correlação, mostrando se eles são ou não ajustáveis aos dados e qual o ajuste em termos de coeficiente de correlação e de determinação. Embora o teste de ajuste tenha indicado que o modelo linear é adequado para representar os dados, o modelo mais ajustado (Equação 4.7) foi o que considera a raiz quadrada da variável independente ($E_{M12\%}$). Tendo em vista que o ganho em termos de coeficiente de correlação é pequeno (0,71 para 0,72) o teste estatístico indica a adequação do modelo linear, que é sempre preferível em função da facilidade de aplicação. No entanto, quando um modelo é utilizado para a determinação de classes, em tabelas de classificação, o uso do modelo mais ajustado é preferível, pois o erro de predição é menor e o usuário não utilizará o modelo, mas sim as tabelas com faixas de classificação dele provenientes.

$$E_{M12\%} = (198956 V_{LLsat} - 5,8E8)^{0,5} \text{ com } R = 0,72 \quad \text{Equação 4.7}$$

Para o caso do $C_{LL12\%}$ como parâmetro de estimação do módulo de elasticidade em flexão a regressão linear (Equação 4,8) também apresentou ajuste adequado (P-valor do ajuste = 0,3975). Nesse caso o modelo com melhor ajuste foi o a raiz quadrada dupla (Equação 4.9).

$$E_{M12\%} = 0,78 C_{LL} + 881 \text{ com } R = 0,84 \quad \text{Equação 4.8}$$

$$E_{M12\%} = ((0,64(C_{LL})^2) + 1,98E7)^{0,5} \text{ com } R = 0,85 \quad \text{Equação 4.9}$$

Considerando o limite de predição (curva rebaixada) dos modelos com melhores ajustes (raiz quadrada da variável independente para a velocidade como estimador e raiz quadrada dupla para o coeficiente de rigidez como estimador) foram propostas faixas de classificação por ultrassom da madeira de Eucalipto adulta (com mais de 25 anos) (Tabela 4.13). Tendo em vista que não foram realizados ensaios em corpos de prova de compressão, a tabela de classificação proposta nesta pesquisa (Tabela 4.13) apresenta apenas as faixas relativas ao módulo de elasticidade na flexão estática a 12% de umidade.

Tabela 4.13 – Faixas de classificação por ultrassom da madeira de Eucalipto proveniente de árvores com idade superior a 25 anos (*E. grandis* de 34 anos, *E. pellita* de 26 anos e o *E. globulus* de 28 anos).

Classe	V_{LLsat} [m.s ⁻¹]	C_{LL12} % [MPa]	E_M 12% [MPa]
1	$V_{LLsat} < 3600$	< 11600	< 3267
2	3600–3900	11600 – 15100	3267–8407
3	3900–4200	15100 – 17600	8407– 11418
4	4200–4500	17600 – 20000	11418–13776
5	4500 - 4800	20000 - 22700	13776 - 15775
6	> 4800	> 22700	> 15775

Finalmente, foram analisados os enquadramentos da classificação, considerando como parâmetro de entrada nas classes a velocidade saturada média do lote corrigida pelo fator 1,18 (Tabela 4.10) e o coeficiente de rigidez médio do lote, também com os valores de velocidade seca corrigidos pelo fator 1,18. Para a rigidez foram considerados os valores característicos de módulo de elasticidade obtidos em flexão estática (Tabela 4.14), de forma a considerar a curva rebaixada. Para os cálculos consideraram-se como lotes as vigas procedentes de cada árvore.

Tabela 4.14 – Valores de velocidade na condição saturada corrigidos ($V_{LLsat,corrigido}$), de coeficientes de rigidez corrigidos ($C_{LL12,corrigido}$) e de módulos de elasticidade característicos ($E_{M12,k}$).

Lote	n	$V_{LLsat,corrigido}$ [m.s ⁻¹]	$C_{LL12,corrigido}$ [MPa]	$E_{M12,k}$ [MPa]
<i>E. grandis</i> 8	10	3487	9685	6689
(2 árvores)	12	3362	9619	5034
	22	3587	12833	10520
<i>E. grandis</i> 34	25	3498	12619	10988
(5 árvores)	43	3196	13845	10947
	41	3386	11451	11309
	116	3502	13254	13736
<i>E. citriodora</i> 10	8	3671	16268	13476
(2 árvores)	7	3285	13973	9707
<i>E. pellita</i> 26	36	3173	8558	8601
(2 árvores)	19	2959	7511	5962
<i>E. globulus</i> 28	25	3218	11009	11069
(2 árvores)	10	3133	11125	11659

n = número de vigas do lote

$V_{LLsat,corrigido}$ corresponde à média dos valores de velocidade saturada do lote, divididos pelo fator de correção de 1,18

$C_{LL12,corrigido}$ corresponde à média dos valores de coeficiente de rigidez do lote, obtidos utilizando a velocidade seca corrigida para 12% de umidade, dividida pelo fator de correção de 1,18

Utilizando os valores característicos (Tabela 4.14) verifica-se que, considerando o conjunto das espécies (árvores com mais idade e menos idade), o enquadramento por velocidade ainda apresenta a Categoria 2 um pouco acima de 5% (Tabela 4.15). Quando se consideram apenas as espécies mais jovens a Categoria 2 aparece com 25%. Considerando só as espécies com mais idade ou o enquadramento pelo coeficiente de rigidez a Categoria 2 não aparece e há redução significativa do enquadramento na Categoria 3 quando comparado com a classificação pelo valor médio de E_M (Tabela 4.11). Esse resultado era esperado, já que na Tabela 4.15 foi analisado o enquadramento do módulo de elasticidade característico e não individual.

Tabela 4.15 – Categorias de estimação do módulo de elasticidade ($E_{M,k}$) considerando as faixas da NBR 15521 (2007) e os estimadores velocidade saturada corrigida ($V_{LLsat, corrigido}$) e coeficiente de rigidez a 12% de umidade corrigido ($C_{LL12, corrigido}$).

Espécie/idade	Classificação por $V_{LLsat, corrigido}$			Classificação por $C_{LL12, corrigido}$		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
<i>Todas</i>	62%	8%	31%	62%	0%	38%
Idades superiores	67%	0%	33%	44%	0%	56%
Idades inferiores	50%	25%	25%	100%	0%	0%

C1 = Categoria 1: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL 12\%}$ igual a classe real de $E_{M 12\%}$

C2 = Categoria 2: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL 12\%}$ superior a classe real de $E_{M 12\%}$

C3 = Categoria 3: Classe indicada por V_{LLsat} ou por $C_{LL 12\%}$ inferior a classe real de $E_{M 12\%}$

$V_{LLsat, corrigido}$ e $C_{LL12, corrigido}$ obtidos utilizando V_{LLsat} e V_{LL12} corrigidos pelo fator 1,18

Idades superiores: *E. grandis* 34 anos; *E. pellita* 36 anos e *E. globulus* 28 anos

Idades inferiores: *E. grandis* 8 anos e *E. citriodora* 10 anos

5 – CONCLUSÕES

A utilização da velocidade saturada ou do coeficiente de rigidez para classificar a madeira de Eucalipto segundo as faixas de classificação da NBR 15521 (2007) não foi adequada, nem para as espécies mais jovens nem para as com maior idade, pois a porcentagem de vigas com módulo de elasticidade superestimado (Categoria 2 de classificação) foi superior a 5%.

A redução da velocidade (saturada e seca) obtida nas vigas com idade superior a 10 anos, utilizando coeficiente de redução de 1,18 permitiu adequar as faixas de classificação da NBR 15521 (2007) para o eucalipto, fazendo com que a classificação apresentasse porcentagem de vigas com módulo de elasticidade superestimado (Categoria 2 de classificação) inferior a 5%, tanto com o uso da velocidade saturada quanto com o uso do coeficiente de rigidez como parâmetros de entrada nas faixas de classificação. Para as espécies de menor idade (8 e 10 anos) as porcentagens continuaram superiores a 5% mesmo com a correção das velocidades.

Os modelos de correlação entre o módulo de elasticidade das vigas, obtidos em ensaio estático de flexão e corrigidos para a umidade de equilíbrio ($E_{M12\%}$), e a velocidade na condição saturada (V_{LLsat}) e entre $E_{M12\%}$ e o coeficiente de rigidez na condição de equilíbrio ($C_{LL12\%}$), para as espécies com mais idade, foram estatisticamente significativos com nível de confiança de 95% e $R = 0,72$ e $0,85$, respectivamente. Utilizando o modelo de predição (curva rebaixada para que apenas 5% dos valores estejam abaixo dela) foi possível propor faixas de classificação específicas para a madeira de Eucalipto. Essas faixas foram propostas com base em resultados obtidos em peças retiradas de árvores adultas (*E. grandis* de 34 anos, *E. pellita* de 26 anos e o *E. globulus* de 28 anos).

A utilização da velocidade saturada média corrigida (coeficiente de redução de 1,18) para classificar, segundo as faixas de classificação da NBR 15521 (2007), a rigidez característica ($E_{M12,k}$) de um lote de madeira de Eucalipto (nesse trabalho considerado como

sendo as vigas retiradas de uma árvore), foi adequada para as espécies de maior idade, não ocorrendo nenhum lote enquadrado na Categoria 2. Como esperado, a utilização do valor característico da propriedade a ser estimada reduziu o enquadramento na Categoria 3 e aumentou os enquadramentos na Categoria 1 (faixa exata).

A utilização do coeficiente de rigidez médio corrigido (determinado com a velocidade seca corrigida pelo coeficiente de redução de 1,18) para classificar, segundo as faixas de classificação da NBR 15521 (2007), a rigidez característica ($E_{M12,k}$) de um lote de madeira de eucalipto (nesse trabalho considerado como sendo as vigas retiradas de uma árvore), foi adequada para todas as espécies e idades, não ocorrendo nenhum lote enquadrado na Categoria 2. Como esperado, a utilização do valor característico da propriedade a ser estimada reduziu o enquadramento na Categoria 3 e aumentou os enquadramentos na Categoria 1 (faixa exata).

6 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar, utilizando nova amostragem de eucalipto, o modelo proposto nesta pesquisa para a determinação da velocidade na condição saturada à partir da velocidade em condições de umidade entre o equilíbrio (11% a 13%) e a saturação (28% a 30%).

Avaliar, utilizando nova amostragem de eucalipto, se o coeficiente de redução da velocidade (1,18) obtido neste trabalho continua sendo válido para adequar o uso das faixas de classificação da NBR 15521 (2007).

Avaliar, utilizando nova amostragem de eucalipto, se o uso das novas faixas de classificação do Eucalipto, proposto neste trabalho, é mais adequado do que o uso do coeficiente de redução da velocidade (1,18) e as faixas de classificação da NBR 15521 (2007).

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AUSTRALIAN STANDARD. AS 2878-1986. **Timber - Classification into strength groups**. Sydney, Australia, 2008.

ACOSTA, M. S. TECNOLOGIA DE LA MADERA DE EUCALIPTO EN EL MERCOSUR Y OTROS PAISES. XIV **Jornada Forestales de Entre Rios**. Concordia – Argentina, 1999. p. 1 – 32.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15521**: Ensaio não destrutivo — Ultra-som — Classificação mecânica de madeira Serrada de dicotiledôneas. Rio de Janeiro, 2007. 8 p.

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

ARRIAGA, F; ÍÑIGUEZ, G; ESTEBAN, M; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I. Structural Tali timber (*Erythrophleum ivorense* A. Chev., *Erythrophleum suaveolens* Brenan.): assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods. **Holz Als Roh-Werkstoff** v. 64, p. 357–362, 2006.

BAILLERES, H.; HOPEWELL, G. P.; MCGAVIN, R. L. Evaluation of wood characteristics of tropical post-mid rotation plantation *Eucalyptus cloeziana* and *E. pellita*: Part (c) Wood quality and structural properties. **Forest and Wood Products Australia**. Melbourne, 2008. Disponível em: <www.fwpa.com.au/sites/default/files/FWPA_PN07.3022_Part%20C_0.pdf> Acesso em 01/12/2012.

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, 2006. p. 1-9.

BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som**. 2001. 105f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000235879>>. Acesso em: 14 abr 2011.

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

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. Springer – Verlag, Berlin, Germany. P. 219-234, 2006.

COSTA, A. L. C. **VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ULTRA-SOM NA MADEIRA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE**. 2005. 103 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

EUROPEAN STANDARDS. **EN 338**. Structural timber. Strength classes. Áustria, 1995.

EUROPEAN STANDARDS. **EN 408**. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties, 2010.

GONÇALVES, R.; COSTA, O. L. Influence of Moisture Content on Longitudinal, Radial and Tangential Ultrasonic Velocity for two Brazilian wood Species. **Wood and Fiber Science**, 40 (4), pp.580-586, 2008.

HAYGREEN, J. G.; BOWYER, J. L. **Forest Products and wood science. An introduction**. Iowa State University: Ames. 2a ed. 1995. 500p.

KRETSCHMANN, D.; HERNANDEZ, R. Grading timber and glued structural members. Primary wood processing: principles and practice. Dordrecht, Springer, 2006. Pages 339-390.

LOGSDON, N. B. (1992). Estudo comparativo sobre a maneira de obter a densidade aparente a 12% de umidade. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, São Carlos, SP. 1992. **Anais**. São Carlos, LaMEM/EESC/USP. v. 4, p. 31-42.

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

OLIVEIRA, J. T. S.; FILHO, M. T.; FIEDLER, N.C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v.34, n.5, p.929-936, 2010.

PUCCINI, Carlos Teixeira. **Avaliação de Aspectos de Qualidade da Madeira utilizando Ultrassom**. 2002. 74 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

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

SANDOZ, J.L. Triage et fiabilité des bois de construction. 186p. Thèse (Doctorat en Sciences Techniques) - Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica Federal de Lausanne, Lausanne, Suíça, 1990.

SANDOZ, J.L.; BENOIT, Y. Acousto-ultrasonic nondestructive evaluation of historical wooden structures. In: Seminário sobre a Aplicação de Ensaios Não Destrutivos na Madeira e Materiais a Base de Madeira. Itatiba, 2006.

SANDOZ, J. L.; Yann, B. Timber grading machine using multivariate parameters based on ultrasonic and density measurement. In: COST E 53 The First Conference, 2007. Warsaw, Poland. **Quality Control for Wood and Wood Products**. Warsaw, Poland: Faculty of Wood Technology Warsaw University of Life Sciences, 2007. p. 167 – 173.

STEIGER, R. **Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M/N Beanspruchung**. 168p. Doktorarbeit in Technischen Wissenschaften – Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich, Schweiz, 1996.

SHAFER, M. E. Ultrasound for defect detection and grading in wood and lumber. In: 2000 IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, 2000. San Juan, Puerto Rico. **An International Symposium Sponsored by the ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL SOCIETY**. New Jersey, USA: IEEE, 2000, v. 1, p. 771 – 778. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/dynhome.jsp>> Acesso em 14 abr 2011.

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

WAUBKE, N. V. Einsatz der Ultraschall- Impulslaufzeitmessungen für die Sortierung Von Bauhölzern. **Holzbauforschung**. Deutschland, p.152-154, 1988.

XAVIER, R. B. L. AVALIAÇÃO DA DUREZA JANKA, DENSIDADE E ESTABILIDADE DE QUATRO ESPÉCIES DE *Eucalyptus* IMPLANTADAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. 2008. 31 f. Monografia – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ANEXO I

Tabela A1.1 – Dados coletados das vigas de eucalipto grandis de 8 anos.

#	T _u [μs]	T _s [μs]	U [%]	L _i [m]	L _f [m]	ρ [kg.m ⁻³]	V _{LL.seca} [m.s ⁻¹]	C _{LL.12%} [MPa]	V _{LL.sat} [m.s ⁻¹]	E _{M.12%} [MPa]
1	532,0	412,0	11,68%	2,525	2,525	546,68	4.407	10.615	3.413	9.010
2	533,0	412,3	16,29%	2,500	2,500	474,31	4.360	9.015	3.372	6.063
3	537,0	415,7	16,67%	2,525	2,525	453,80	4.367	8.656	3.381	5.948
4	534,0	423,0	11,98%	2,510	2,510	530,64	4.266	9.659	3.380	8.261
5	500,0	396,4	15,62%	2,500	2,500	549,78	4.535	11.305	3.595	6.173
6	532,0	415,0	12,91%	2,500	2,500	456,89	4.331	8.572	3.379	10.462
7	505,0	421,0	13,69%	2,490	2,490	485,05	4.253	8.772	3.545	11.462
8	490,0	184,6	11,10%	2,490	1,150	517,64	4.478	10.382	3.654	15.506
9	503,0	185,7	10,75%	2,500	1,150	509,68	4.453	10.109	3.574	13.237
10	503,0	400,0	18,91%	2,500	2,500	483,65	4.494	9.767	3.574	7.032
11	557,0	423,9	15,53%	2,520	2,520	517,36	4.274	9.452	3.253	3.803
12	531,0	408,3	16,55%	2,490	2,490	515,95	4.385	9.920	3.372	3.730
13	565,0	422,3	16,42%	2,510	2,510	476,22	4.274	8.697	3.194	2.791
14	546,0	418,0	11,88%	2,510	2,510	507,44	4.317	9.459	3.305	7.812
15	558,0	418,2	16,82%	2,510	2,510	487,92	4.315	9.086	3.234	4.560
16	564,0	418,4	18,37%	2,510	2,510	436,46	4.313	8.120	3.200	1.357
17	526,0	405,0	11,62%	2,490	2,490	510,04	4.421	9.967	3.404	9.664
18	511,0	398,0	12,63%	2,490	2,490	486,20	4.498	9.838	3.504	10.604
19	526,0	412,0	12,08%	2,480	2,480	560,35	4.328	10.496	3.390	9.378
20	528,0	408,1	16,68%	2,480	2,480	482,77	4.369	9.217	3.377	14.709
21	513,0	396,0	16,50%	2,500	2,500	536,99	4.539	11.064	3.504	7.783
22	496,0	396,6	16,66%	2,490	2,490	496,24	4.514	10.112	3.610	5.956

Onde: T_u = tempo de propagação da onda ultrassônica na condição saturada (umidade acima de 30%); T_s = tempo de propagação da onda ultrassônica na condição de equilíbrio (umidade em torno de 12%); U = teor de umidade no dia do ensaio de flexão; L_i = comprimento inicial da viga; L_f = comprimento final da viga; ρ = densidade da viga; V_{LL.seca} = velocidade da onda ultrassônica na condição de equilíbrio; C_{LL.12%} = coeficiente de rigidez na condição de equilíbrio; V_{LL.sat} = velocidade da onda ultrassônica na condição saturada; E_{M.12%} = módulo de elasticidade na condição de equilíbrio.

Tabela A1.2 – Dados coletados das vigas de eucalipto grandis de 34 anos.

#	U [%]	ρ [kg.m ⁻³]	V _{LL seca} [ms ⁻¹]	C _{LL 12%} [MPa]	V _{LL sat} [m.s ⁻¹]	E _{M 12%} [MPa]
1	14,33	772,64	4.800	17.804	3.918	14.484
2	13,00	888,84	4.804	20.509	3.957	15.067
3	15,00	582,55	4.783	13.330	3.950	13.659
4	14,33	584,27	4.841	13.692	3.960	13.500
5	15,00	784,38	4.828	18.283	3.923	14.545
6	15,00	794,60	4.772	18.094	3.926	15.232
7	17,33	739,73	4.916	17.878	3.970	12.771
8	16,00	739,02	4.893	17.693	3.940	13.776
9	14,67	788,83	4.690	17.350	3.885	13.734
10	14,00	812,55	4.659	17.635	3.907	14.485
11	14,33	710,56	5.064	18.218	4.041	14.465
12	14,33	633,66	5.259	17.525	4.061	14.520
13	14,33	678,11	5.106	17.681	4.034	13.977
14	14,67	754,23	5.211	20.483	4.005	9.183
15	14,33	800,77	4.768	18.203	3.999	14.607
16	13,33	812,27	4.797	18.693	3.952	15.457
17	13,67	766,30	4.817	17.783	3.957	15.648
18	13,67	777,36	4.808	17.968	3.931	15.001
19	14,67	818,05	4.653	17.709	3.902	15.412
20	13,33	724,09	4.973	17.910	3.986	15.782
21	14,67	698,72	5.115	18.278	4.029	15.353
22	14,00	788,16	4.741	17.714	3.946	13.342
23	14,33	640,08	5.103	16.666	3.925	12.583
24	14,33	661,90	5.047	16.861	3.920	15.088
25	14,33	731,27	5.030	18.499	4.036	14.639
26	14,33	774,92	4.794	17.809	4.006	13.847
27	15,67	793,68	4.764	18.010	3.971	14.465
28	13,67	789,01	4.754	17.834	3.940	15.288
29	13,00	760,69	4.851	17.897	3.978	14.144
30	15,00	773,90	4.737	17.363	3.967	14.688
31	14,00	708,44	5.155	18.823	4.077	15.718
32	14,00	733,58	5.101	19.092	4.047	15.361
33	14,00	783,09	4.868	18.556	3.959	14.380
34	14,67	629,90	5.221	17.172	4.002	13.877
35	15,33	666,64	5.117	17.455	4.040	14.908
36	15,33	751,19	4.944	18.362	4.057	14.453
37	14,67	812,18	4.797	18.691	3.992	14.290
38	15,00	762,77	4.940	18.611	4.085	15.098
39	14,67	792,23	4.914	19.130	4.141	15.906

40	15,00	720,35	5.184	19.358	4.155	15.129
41	15,33	721,03	5.127	18.951	4.080	14.970
42	14,33	631,25	5.313	17.818	4.073	13.935
43	15,00	636,73	5.288	17.808	4.100	13.206
44	14,33	510,12	5.405	14.904	3.857	9.563
45	14,00	514,57	5.433	15.191	3.925	13.792
46	14,00	464,56	5.373	13.412	3.919	8.578
47	13,33	485,21	5.406	14.183	3.848	10.348
48	13,67	490,65	5.470	14.682	3.951	10.023
49	13,67	498,14	5.415	14.604	3.835	11.048
50	14,33	434,57	5.186	11.690	3.897	11.299
51	13,67	562,96	5.223	15.354	3.900	12.102
52	15,00	786,35	5.238	21.571	4.299	17.693
53	14,33	812,98	5.117	21.287	4.382	17.082
54	14,00	771,89	5.283	21.546	4.453	16.130
55	14,33	811,93	5.233	22.230	4.404	18.002
56	15,00	783,86	5.392	22.788	4.377	18.755
57	15,67	777,51	5.357	22.315	4.432	16.650
58	14,00	742,01	5.432	21.895	4.486	17.363
59	15,00	796,60	5.112	20.819	4.300	16.513
60	15,67	726,26	5.257	20.067	4.398	16.054
61	14,33	767,68	5.158	20.426	4.353	17.221
62	16,00	751,86	5.244	20.675	4.367	16.320
63	14,00	671,98	5.427	19.789	4.453	15.486
64	14,33	672,30	5.438	19.878	4.398	16.260
65	13,33	557,94	5.259	15.431	4.376	12.311
66	14,33	741,42	5.225	20.241	4.234	16.401
67	15,00	738,80	5.238	20.267	4.329	17.503
68	15,67	772,13	5.220	21.039	4.367	17.475
69	14,67	707,25	5.382	20.490	4.393	18.324
70	14,00	719,76	5.386	20.883	4.410	18.423
71	16,00	633,57	5.469	18.949	4.400	14.904
72	14,00	645,49	5.574	20.053	4.465	15.632
73	14,67	722,14	5.300	20.285	4.441	16.510
74	14,33	795,23	5.241	21.846	4.429	17.847
75	14,33	807,55	5.257	22.313	4.464	18.305
76	14,00	807,25	5.262	22.348	4.562	17.565
77	14,33	819,29	5.263	22.692	4.477	18.483
78	14,33	694,52	5.565	21.511	4.493	18.551
79	14,33	718,24	5.548	22.110	4.470	13.410
80	14,00	546,33	5.577	16.990	4.459	15.519
81	13,00	596,25	5.649	19.026	4.488	14.930

82	13,67	502,59	5.517	15.299	4.288	9.214
83		562,45	5.531	17.208	4.345	13.470
84	15,33	486,06	5.560	15.024	4.310	11.343
85	13,33	561,21	5.572	17.426	4.453	13.356
86	14,67	608,52	5.468	18.191	4.495	16.187
87	13,67	563,61	5.551	17.367	4.479	13.518
88	15,00	866,75	5.188	23.326	4.379	16.764
89	10,67	763,12	5.213	20.734	4.390	16.885
90	14,33	776,18	5.203	21.009	4.438	18.184
91	15,00	735,91	5.335	20.946	4.514	17.089
92	15,00	755,69	5.196	20.405	4.430	15.075
93	14,00	789,75	5.279	22.012	4.487	18.369
94	13,67	665,13	5.404	19.422	4.515	16.440
95	14,67	725,36	5.330	20.605	4.507	17.170
96	16,33	762,56	5.259	21.091	4.397	17.827
97	14,00	772,01	5.200	20.876	4.448	16.745
98	14,67	706,05	5.417	20.720	4.479	17.067
99	14,00	735,20	5.353	21.070	4.564	17.396
100	14,00	719,93	5.286	20.115	4.391	15.586
101	14,67	760,34	5.310	21.441	4.460	17.828
102	13,33	725,67	5.472	21.726	4.614	17.669
103	13,67	828,34	5.483	24.899	4.555	18.160
104	14,33	818,49	5.104	21.321	4.337	17.540
105	14,67	797,23	5.260	22.060	4.368	18.193
106	14,67	813,37	5.182	21.838	4.477	17.109
107	14,00	780,25	5.323	22.110	4.558	18.519
108	14,67	667,73	5.364	19.211	4.518	15.752
109	14,00	700,53	5.360	20.126	4.537	15.344
110	15,00	604,52	5.496	18.263	4.566	14.162
111	14,00	592,61	5.393	17.236	4.470	12.286
112	14,33	570,33	5.300	16.021	4.425	11.618
113	13,33	602,74	5.447	17.883	4.557	13.557
114	14,33	634,47	5.495	19.158	4.556	14.849
115	14,33	616,63	5.474	18.480	4.569	13.731
116	14,33	807,94	5.156	21.477	4.379	18.282
117	14,67	742,24	5.167	19.815	4.252	15.147
118	14,33	665,70	5.281	18.564	4.202	8.261
119	14,33	778,08	5.088	20.146	4.306	16.130
120	14,33	571,51	5.349	16.355	4.052	12.812
121	15,00	666,27	5.371	19.217	4.267	14.162
122	14,33	740,12	5.287	20.689	4.256	14.905
123	14,00	716,86	5.240	19.684	4.209	17.822

124	14,67	516,77	5.455	15.379	3.940	12.062
125	15,00	472,98	5.325	13.410	3.774	8.927
126	14,00	467,33	5.351	13.380	3.813	8.216
127	14,67	672,09	5.515	20.439	4.533	16.648
128	14,33	634,62	5.716	20.732	4.503	16.212
129	13,33	677,69	5.740	22.326	4.652	18.997
130	14,33	676,00	5.645	21.538	4.460	17.662
131	14,00	469,41	5.653	15.002	4.354	11.725
132	14,67	471,74	5.769	15.698	4.413	11.961
133	14,67	669,77	5.564	20.733	4.672	18.611
134	14,67	710,24	5.558	21.941	4.699	12.765
135	14,67	696,33	5.468	20.816	4.663	16.274
136	14,67	725,16	5.579	22.575	4.706	19.065
137	15,67	521,95	5.579	16.249	4.417	11.864
138	15,00	574,03	5.378	16.605	4.347	14.699
139	14,33	966,11	4.173	16.821	3.624	13.677
140	16,00	840,98	5.022	21.206	3.940	13.082
141	15,33	801,85	5.026	20.257	3.992	13.454
142	13,67	954,12	4.626	20.419	3.882	15.193
143	15,00	831,62	5.016	20.922	3.929	14.984
144	14,33	682,44	5.339	19.452	4.022	14.354
145	14,33	861,99	4.788	19.758	3.802	13.519
146	14,33	898,45	4.813	20.813	3.874	14.000
147	14,33	594,13	5.344	16.968	4.002	12.189
148	15,00	516,52	5.027	13.055	3.727	10.368
149	14,00	579,60	5.184	15.576	3.863	10.460
150	13,67	829,89	5.288	23.210	4.320	18.705
151	15,00	849,46	5.282	23.700	4.395	16.220
152	14,33	773,61	4.903	18.597	4.570	14.202
153	15,33	879,70	5.250	24.248	4.500	18.915
154	14,33	825,06	5.357	23.680	4.524	16.547
155	15,67	619,03	5.597	19.390	4.393	14.411
156	13,67	571,62	5.543	17.560	4.382	10.528
157	15,00	613,08	5.571	19.027	4.532	14.816
158	14,33	855,93	5.325	24.266	4.631	18.172
159	14,33	824,68	5.578	25.660	4.693	18.819
160	14,33	846,32	5.527	25.855	4.729	20.183
161	14,33	824,23	5.438	24.370	4.682	16.789
162	14,00	622,00	5.378	17.993	4.281	17.320
163	13,67	628,95	5.640	20.008	4.520	12.796
164	14,00	879,84	4.443	17.369	3.650	13.928
165	14,33	853,41	4.441	16.834	3.623	13.928

166	14,67	601,19	5.185	16.164	3.722	13.816
167	16,00	804,60	4.703	17.796	3.740	11.970
168	14,67	699,16	4.711	15.517	3.612	11.285
169	15,00	782,35	4.593	16.504	3.702	13.369
170	14,67	862,93	4.492	17.410	3.709	14.533
171	14,67	711,34	4.825	16.559	3.730	12.395
172	14,33	728,02	5.003	18.223	3.803	14.841
173	16,33	834,17	4.442	16.461	3.675	12.771
174	14,67	834,69	4.593	17.608	3.727	19.308
175	14,33	822,79	4.674	17.973	3.801	15.096
176	14,33	836,88	4.593	17.654	3.759	14.008
177	15,33	819,37	4.504	16.620	3.733	14.051
178	15,00	633,71	4.854	14.930	3.660	12.392
179	14,67	709,31	4.871	16.831	3.769	13.995
180	15,00	590,18	5.003	14.773	3.630	11.201
181	15,00	532,15	4.591	11.216	3.065	12.447
182	14,67	532,20	4.867	12.606	3.491	8.473
183	14,33	588,60	4.947	14.407	3.729	12.725
184	14,33	576,63	4.977	14.282	3.691	10.415
185		569,51	4.968	14.055	3.656	11.171
186	14,67	786,70	4.867	18.634	3.932	14.752
187	13,00	772,09	5.384	22.379	4.012	17.031
188	14,00	825,49	4.544	17.045	4.096	13.373
189	14,33	706,50	4.926	17.145	4.017	12.650
190	13,67	705,15	5.127	18.533	4.203	14.393
191	15,00	579,04	5.318	16.377	4.156	12.594
192	15,00	753,93	5.259	20.852	4.197	16.798
193	14,67	769,39	5.092	19.948	4.158	16.346
194	14,33	630,88	5.172	16.874	4.165	14.248
195	15,00	727,50	4.980	18.044	4.092	12.957
196	14,00	737,27	5.118	19.314	4.107	14.398
197	14,33	583,31	5.239	16.009	4.122	12.908
198	14,67	555,92	5.020	14.012	3.900	10.566
199	15,00	748,45	4.858	17.664	4.093	14.240
200	13,00	716,14	5.167	19.118	4.271	15.580
201	14,33	670,55	5.034	16.995	4.139	13.840
202	15,00	737,38	4.822	17.142	4.001	13.805
203	14,33	815,38	4.760	18.478	4.026	15.118
204	14,33	804,77	4.888	19.224	4.077	16.986
205	14,00	787,26	4.757	17.818	3.960	13.013
206	14,67	643,41	4.864	15.219	3.884	11.695
207	14,33	914,76	4.460	18.199	3.819	15.324

208	15,33	837,27	4.793	19.234	3.918	13.870
209	15,00	694,74	4.944	16.982	3.872	13.411
210	15,00	861,33	4.726	19.241	3.902	14.377
211	15,00	920,50	4.389	17.735	3.801	14.326
212	14,00	858,99	4.673	18.755	3.890	14.407
213	14,67	902,03	4.615	19.214	3.929	15.635
214	15,00	686,76	4.934	16.719	3.847	13.587
215	14,67	734,61	4.841	17.215	3.935	13.369
216	14,67	896,83	4.279	16.422	3.674	12.855
217	15,00	868,94	4.671	18.956	3.832	15.390
218	14,67	842,84	4.753	19.042	3.852	14.004
219	14,33	637,06	4.985	15.830	3.799	11.836
220	13,33	751,92	4.897	18.035	3.881	13.706
221	15,33	850,25	4.697	18.757	3.863	14.278
222	14,33	661,02	5.041	16.799	3.805	14.491
223	14,33	588,07	4.810	13.605	3.486	8.309
224	14,33	556,54	4.713	12.363	3.232	7.819
225	14,00	622,07	4.842	14.584	3.540	11.016
226	14,33	895,97	5.236	24.567	4.449	18.955
227	15,00	820,56	5.183	22.041	4.439	17.724
228	15,00	733,66	5.326	20.810	4.374	16.679
229	15,67	770,17	5.283	21.498	4.408	16.705
230	15,33	877,38	5.198	23.702	4.520	20.511
231	14,00	697,16	5.389	20.247	4.355	16.683
232	14,00	825,76	5.299	23.184	4.423	18.848
233	14,00	864,44	5.175	23.153	4.456	19.273
234	12,00	753,64	5.448	22.372	4.411	17.616
235	15,00	856,61	5.330	24.333	4.490	20.714
236	14,00	701,72	5.492	21.168	4.289	15.855
237	14,33	598,71	5.347	17.116	4.055	13.401
238	14,00	619,90	5.427	18.255	3.952	12.055
239	13,67	857,09	5.253	23.648	4.442	19.369
240	14,00	871,45	5.231	23.848	4.518	20.023
241	14,00	791,52	5.185	21.281	4.368	15.721
242	14,33	774,23	5.371	22.330	4.492	16.914
243	14,33	804,44	5.099	20.916	4.252	16.530
244	14,67	861,78	5.161	22.951	4.416	18.881
245	15,33	820,08	5.325	23.250	4.471	19.403
246	14,67	713,10	5.224	19.459	4.389	15.561
247	14,67	634,16	5.198	17.132	4.154	11.630

Tabela A1.3 – Dados coletados das vigas de eucalipto citriodora de 10 anos.

#	T _U [μs]	T _S [μs]	U [%]	L _i [m]	L _f [m]	ρ [kg.m ⁻³]	V _{LL seca} [m.s ⁻¹]	C _{LL 12%} [MPa]	V _{LL sat} [m.s ⁻¹]	E _{M 12%} [MPa]
1	497,0	380,0	9,75%	2,500	2,500	766,48	4.730	17.151	3.617	4.836
2	484,0	374,0	10,54%	2,510	2,510	749,19	4.825	17.445	3.729	16.464
3	478,0	172,4	8,73%	2,510	1,150	775,22	4.796	17.833	3.776	20.862
4	480,0	387,0	10,72%	2,515	2,515	708,09	4.673	15.460	3.767	13.831
5	474,0	374,0	10,42%	2,495	2,495	751,53	4.797	17.291	3.785	17.073
6	514,0	386,0	10,20%	2,490	2,490	706,83	4.638	15.206	3.483	15.718
7	503,0	184,4	8,59%	2,490	1,150	724,98	4.484	14.580	3.559	17.461
8	492,0	386,0	10,21%	2,500	2,500	700,15	4.657	15.183	3.653	15.458
9	532,0	396,0	10,49%	2,490	2,490	751,984	4.521	15.370	3.365	15.383
10	581,0	414,0	9,55%	2,495	2,495	645,742	4.333	12.125	3.088	13.082
11	550,0	402,0	10,00%	2,490	2,490	691,163	4.454	13.709	3.255	14.628
12	534,0	402,0	10,39%	2,490	2,490	710,536	4.454	14.093	3.353	14.510
13	544,0	412,0	9,85%	2,500	2,500	733,799	4.363	13.968	3.304	13.563
14	523,0	184,6	8,88%	2,490	1,150	756,135	4.478	15.165	3.423	17.270
15	557,0	421,0	10,12%	2,485	2,485	742,796	4.244	13.379	3.208	10.085

Tabela A1.4 – Dados coletados das vigas de eucalipto pellita de 26 anos.

#	T _U [μs]	T _S [μs]	U [%]	L _i [m]	L _f [m]	ρ [kg.m ⁻³]	V _{LL seca} [m.s ⁻¹]	C _{LL 12%} [MPa]	V _{LL sat} [m.s ⁻¹]	E _{M 12%} [MPa]
1	585,0	430,5	11,54%	2,490	2,490	820,53	5.032	20.777	3.060	8.938
2	575,0	419,0	12,18%	2,490	2,490	778,92	5.170	20.821	3.114	17.689
3	576,0	416,5	10,93%	2,490	2,490	805,87	5.201	21.801	3.108	18.378
4	575,0	201,4	9,23%	2,490	1,150	823,50	4.969	20.329	3.114	17.294
5	568,0	422,8	10,92%	2,485	2,485	825,36	5.113	21.581	3.146	9.642
6	564,0	425,3	10,81%	2,490	2,490	777,86	5.094	20.181	3.174	7.917
7	560,0	412,1	11,22%	2,480	2,480	825,23	5.236	22.621	3.184	8.959
8	554,0	199,5	9,63%	2,480	1,150	838,52	5.016	21.096	3.219	13.628
9	569,0	415,0	10,86%	2,460	2,460	813,53	5.157	21.636	3.109	12.568
10	557,0	409,6	11,26%	2,480	2,480	808,16	5.268	22.424	3.201	9.772
11	566,0	417,5	11,76%	2,480	2,480	808,10	5.168	21.582	3.150	11.197
12	576,0	417,8	11,06%	2,490	2,490	806,27	5.185	21.676	3.108	8.194
13	568,0	413,0	11,04%	2,492	2,492	804,20	5.249	22.161	3.155	13.461
14	632,0	423,0	10,04%	2,500	2,500	658,01	5.142	17.397	2.844	8.066
15	607,0	424,2	10,16%	2,500	2,500	687,58	5.127	18.076	2.961	5.239
16	538,0	194,8	9,32%	2,480	1,150	830,27	5.136	21.905	3.314	21.381
17	550,0	411,0	11,57%	2,490	2,490	814,18	5.271	22.619	3.255	17.016
18	544,0	403,0	11,56%	2,490	2,490	796,88	5.375	23.026	3.291	16.645
19	555,0	409,5	11,26%	2,490	2,490	831,02	5.290	23.256	3.226	10.017
20	561,0	409,0	11,03%	2,500	2,500	754,05	5.318	21.324	3.204	13.045
21	545,0	408,0	11,43%	2,490	2,490	824,64	5.310	23.248	3.285	17.253
22	552,0	409,3	11,26%	2,490	2,490	845,95	5.293	23.697	3.243	10.880
23	548,0	405,0	11,50%	2,470	2,470	808,70	5.306	22.767	3.241	12.797
24	563,0	192,9	9,11%	2,490	1,150	731,14	5.186	19.665	3.180	15.240
25	541,0	193,4	9,78%	2,480	1,150	838,76	5.173	22.447	3.296	18.622
26	591,0	421,7	12,04%	2,490	2,490	737,31	5.137	19.457	3.029	5.988
27	550,0	409,0	11,12%	2,480	2,480	833,54	5.275	23.196	3.242	13.407
28	555,0	417,4	11,36%	2,510	2,510	813,92	5.232	22.277	3.252	13.928
29	565,0	421,5	9,65%	2,510	2,510	787,32	5.181	21.132	3.194	8.158
30	556,0	414,6	9,89%	2,500	2,500	745,76	5.246	20.524	3.233	7.123
31	592,0	429,0	11,34%	2,510	2,510	749,84	5.090	19.429	3.048	11.247
32	558,0	414,0	10,92%	2,510	2,510	736,97	5.275	20.504	3.234	14.259
33	589,0	425,0	11,87%	2,510	2,510	736,97	5.138	19.456	3.064	13.828
34	570,0	417,0	10,64%	2,520	2,520	791,11	5.258	21.868	3.179	9.014
35	560,0	416,0	11,98%	2,517	2,517	802,10	5.264	22.225	3.232	12.782
36	538,0	191,7	9,26%	2,500	1,150	828,19	5.220	22.571	3.341	19.681
37	627,0	448,0	11,67%	2,497	2,497	784,43	4.849	18.445	2.863	9.257
38	612,0	438,0	11,20%	2,485	2,485	776,18	4.936	18.911	2.920	10.213
39	620,0	445,0	12,04%	2,490	2,490	776,21	4.868	18.395	2.888	11.258

40	619,0	436,6	11,66%	2,490	2,490	726,82	4.962	17.894	2.892	6.648
41	634,0	460,9	12,22%	2,490	2,490	795,98	4.700	17.584	2.824	6.447
42	671,0	449,0	10,23%	2,500	2,500	686,21	4.844	16.102	2.679	8.461
43	731,0	485,0	17,00%	2,490	2,490	580,41	4.467	11.579	2.449	6.491
44	625,0	442,0	11,72%	2,510	2,510	708,06	4.940	17.283	2.888	7.381
45	629,0	208,3	9,53%	2,520	1,150	773,70	4.804	17.855	2.881	14.112
46	600,0	435,0	11,38%	2,490	2,490	825,83	4.980	20.481	2.984	12.298
47	605,0	445,0	11,65%	2,490	2,490	849,20	4.868	20.125	2.959	3.143
48	507,0	435,0	11,32%	2,500	2,500	841,10	5.000	21.028	3.545	12.671
49	589,0	417,0	10,95%	2,490	2,490	757,69	5.195	20.448	3.040	11.550
50	501,0	434,0	12,60%	2,490	2,490	740,67	4.991	18.454	3.574	2.937
51	611,0	201,1	9,25%	2,490	1,150	705,06	4.975	17.452	2.930	12.262
52	595,0	433,0	11,09%	2,470	2,470	772,71	4.963	19.032	2.985	9.798
53	608,0	437,0	11,13%	2,480	2,480	860,33	4.937	20.972	2.933	4.707
54	588,0	436,4	11,36%	2,480	2,480	770,00	4.944	18.822	3.033	7.586
55	601,0	432,8	12,27%	2,470	2,470	749,34	4.965	18.473	2.955	6.772

Tabela A1.5 – Dados coletados das vigas de eucalipto globulus de 28 anos.

#	U [%]	L _f [mm]	ρ [kg.m ⁻³]	V _{LL seça} [m.s ⁻¹]	C _{LL 12%} [MPa]	V _{LL sat} [m.s ⁻¹]	E _{M 12%} [MPa]
1	19,85	3045	686,07	4998,40	17141	4020	15736
2	19,84	3035	650,10	5029,43	16444	3959	14911
3	21,20	3030	563,62	4976,90	13961	3692	10770
4	22,58	3149	556,69	5089,10	14418	3763	11092
5	21,46	3107	614,14	5061,97	15737	3908	13109
6	21,79	3025	660,99	4978,09	16380	3960	13732
7	19,92	3070	701,60	5133,06	18486	4124	15161
8	20,41	3065	660,79	4935,01	16093	3988	14636
9	23,68	3065	652,09	4922,86	15803	3964	13738
10	21,60	3075	758,81	4878,88	18062	4047	15780
11	19,93	2987	703,33	5003,90	17611	3996	15446
12	20,15	2997	752,39	4861,51	17782	3941	14627
13	19,80	3000	744,44	4949,43	18237	3884	15554
14	22,19	3080	671,00	4986,85	16687	3861	13342
15	19,85	2992	735,37	5199,15	19878	4267	16613
16	21,33	2995	858,71	4259,92	15583	3523	12065
17	22,35	3109	863,48	4215,32	15343	3504	10857
18	19,58	3064	754,14	5216,59	20522	4172	14726
19	20,62	3149	705,69	5033,00	17876	4103	13836
20	20,94	3157	637,54	4957,74	15670	3861	13405
21	21,33	3185	838,51	4236,93	15053	3454	12331
22	19,80	3035	780,37	4901,83	18751	3912	14729
23	18,58	3065	674,28	4781,62	15417	3745	12980
24	21,94	3130	677,06	5080,41	17475	4028	14041
25	20,92	3125	858,46	4464,29	17109	3671	14171
26	21,19	3120	860,44	4731,67	19264	3893	13567
27	22,36	3118	796,56	4647,62	17206	3805	13636
28	19,38	3002	781,14	4625,28	16711	3794	13931
29	18,79	2950	781,60	4788,25	17920	3912	13325
30	20,11	3102	813,30	4538,24	16750	3700	14077
31	17,20	2980	781,91	4325,81	14632	3515	12284
32	20,15	3100	759,83	4833,33	17751	4007	15544
33	19,20	3030	573,46	4970,65	14169	3653	11366
34	20,76	3090	790,81	5091,48	20500	4209	16576
35	15,06	2953	784,92	4281,85	14391	3425	11356

ANEXO II

Tabela A2.1 – Valores de assimetria e de curtose para os dados obtidos nas vigas de *E. grandis*.

Variável	Coefficiente de Variação	Assimetria	Curtose
Velocidade Saturada [m.s ⁻¹]	4,17%	-0,0182751	-0,822552
Velocidade Seca [m.s ⁻¹]	2,28%	0,5957050	-1,156090
Velocidade Norma [m.s ⁻¹]	7,62%	-1,1977800	0,614056
Densidade [kg.m ⁻³]	5,35%	0,7254410	-0,035725
Umidade [%]	22,48%	-0,8393750	-1,462800

Tabela A2.2 – Valores de assimetria e de curtose para os dados obtidos nas vigas de *E. citriodora*.

Variável	Coefficiente de Variação	Assimetria	Curtose
Velocidade Saturada [m.s ⁻¹]	5,89%	0,119499	-0,705689
Velocidade Seca [m.s ⁻¹]	4,99%	1,06549	0,190987
Velocidade Norma [m.s ⁻¹]	6,30%	0,872108	0,0388235
Densidade [kg.m ⁻³]	7,55%	1,28216	1,29161
Umidade [%]	11,69%	1,16778	-0,195426

Tabela A2.3 – Valores de assimetria e de curtose para os dados obtidos nas vigas de *E. pellita*.

Variável	Coefficiente de Variação	Assimetria	Curtose
Velocidade Saturada [m.s ⁻¹]	5,05%	-1,14485	-0,990977
Velocidade Seca [m.s ⁻¹]	3,10%	-1,44348	-1,12922
Velocidade Norma [m.s ⁻¹]	4,98%	-0,683368	-0,603616
Densidade [kg.m ⁻³]	7,65%	-1,98328	0,471903
Umidade [%]	14,40%	0,25712	-1,23371