



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
Campus Experimental de Itapeva

**MAURI PEDROSO DE LIMA JUNIOR**

**USO DA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO (TEI) PARA  
CARACTERIZAÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA DE *EUCALYPTUS*  
*GRANDIS* DE 10 ANOS DA REGIÃO DE ITAPEVA/SP**

Itapeva - SP  
2016

**MAURI PEDROSO DE LIMA JUNIOR**

**USO DA TÉCNICA DE EXCITAÇÃO POR IMPULSO (TEI) PARA  
CARACTERIZAÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA DE *EUCALYPTUS*  
*GRANDIS* DE 10 ANOS DA REGIÃO DE ITAPEVA/SP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus Experimental de Itapeva, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia

Orientador: Prof. Dra. Elen Aparecida Martines  
Morales

Itapeva - SP  
2016

L732u Lima Junior, Mauri Pedroso de.  
    Usu da técnica de excitação por impulso (TEI) para caracterização da rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* de 10 anos da região de Itapeva/SP / Mauri Pedroso de Lima Junior. -- Itapeva, SP, 2016  
    44 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva, 2016

Orientadora: Elen Aparecida Martines Morales

Banca examinadora: Cristiane Inácio de Campos, Carlos de Oliveira Affonso

Bibliografia

1. Madeira. 2. Rigidez. 3. Eucalipto. I. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva. II. Título.

CDD 620.112

Dedico este trabalho com muito amor à uma pessoa que eu sinto muita saudade e que eu amo muito, minha querida e amada Mãe Adriana Alves Ferreira Lima, uma vencedora, que me ensinou a lutar e dar o meu melhor durante a minha vida, e que é um exemplo pra mim eternamente. Eu sei que está no céu junto à Deus, mas aproveito para agradecer por tudo que fez por mim, por me amar tanto e cuidar de mim com tanto carinho e amor. Te amo mamãe.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por dar a possibilidade de realizar esta faculdade, e me dar a dádiva de acordar todos os dias para correr atrás dos meus sonhos.

Agradeço aos meus pais Mauri Pedroso de Lima e Carla Rierica Camargo Pedroso de Lima por me proporcionarem a estrutura e me apoiarem sempre durante toda a minha faculdade, me ajudando durante os momentos difíceis e vibrando nos momentos felizes, e também por me proporcionarem a alegria de realizar um sonho de concluir minha faculdade.

Agradeço à minha namorada Polyana Ferreira Salles, a qual eu amo muito e desejo me casar e passar o resto da minha vida à seu lado, e agradeço por ter sido uma pessoa mais que especial em minha vida, me ajudando muito neste trabalho, me enchendo de amor e alegria a cada dia que passa, e durante toda a faculdade sempre me apoiando em todas as minhas decisões, nunca deixando de me ajudar.

Agradeço a toda minha família por fazer parte da minha formação, sempre me apoiando e incentivando a dar o meu melhor.

Agradeço a meu grande amigo e mentor Paulo Salomão, por todos os ensinamentos e apoios durante minha graduação, e por ser um grande exemplo pra mim.

Agradeço minha orientadora Elen Aparecida Martines Morales, por todo o conhecimento que me passou, e por me orientar e ajudar durante todos os trabalhos realizados juntos.

Agradeço a Jorge Martins, Rafaele Almeida Munis, João Carlos Biazzon, Anderson Diego da Fé, Vitor Neves e Juliano Rodrigo de Brito por me ajudarem e colaborarem neste trabalho.

Agradeço a todos meus amigos, por me ajudarem durante toda a graduação e por sempre estarem ao meu lado, seja estudando para as provas e fazendo trabalhos ou fazendo torneios de vídeo games.

Agradeço aos meus professores com os quais pude aprender e colher o máximo de conhecimento possível.

“Algumas pessoas querem que algo aconteça, outras desejam que aconteça, outras fazem acontecer”

Michael Jordan

## RESUMO

A madeira é um material natural que apresenta grande variabilidade em suas propriedades mecânicas e seu aproveitamento é adequado quando a mesma é classificada corretamente. O objetivo principal deste trabalho foi analisar a eficácia da técnica de excitação por impulso (TEI) para caracterização da rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* de 10 anos de idade, em três alturas diferentes, da região de Itapeva/SP. Para caracterização foram utilizados os métodos de ensaio não destrutivo de Excitação por Impulso, através da utilização do equipamento Sonelastic® Tecnologia PC Based e destrutivo de flexão estática. O valor médio encontrado para o módulo de elasticidade na flexão estática foi de 16,4 GPa e dinâmica de 16,6 GPa. Os valores médios encontrados para módulo de elasticidade na flexão estática foram iguais a 14,8 GPa na altura A, 17,9 GPa na altura B e 17,0 GPa na altura C (3, 6 e 9 m), a partir da base, onde conclui-se que quanto maior a altura da árvore maior o módulo de elasticidade correspondente. A equação de correlação entre  $E_M$  e  $E_d$  encontrada foi  $E_M = 0,743E_d + 4,0983$ , com respectivo coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,85$ . Conclui-se que a Técnica de Excitação por Impulso é eficaz para a caracterização de rigidez, demonstrando ótimo custo/benefício e rapidez para classificação de peças e um incremento do valor agregado à madeira serrada.

**Palavras-chave:** Madeira. Rigidez. Técnica de Excitação por Impulso.

## ABSTRACT

Wood is a natural material which has great variability in their mechanical properties and their use is appropriate when it is sorted correctly. The main objective of this study was to analyze the effectiveness of the impulse excitation technique (TEI) to characterize the stiffness of *Eucalyptus grandis* 10 years old, in three different heights, the Itapeva / SP region. For characterization were used for non-destructive testing methods Excitation Impulse, using equipment Sonelastic® PC Based Technology and destructive flexure. The mean value for the modulus of elasticity in bending was 16.4 GPa and 16.6 GPa dynamics. The average values for modulus of elasticity in static bending were equal to 14.8 GPa at the time A, 17, 9 GPa at the time B and the time C 17.0 GPa (3, 6 and 9 meters) from the bottom, where it follows that the greater the height of the largest tree corresponding modulus of elasticity. The equation of correlation between MS and Ed found was  $0,743E_d MS = + 4.0983$ , with its coefficient of determination  $R^2 = 0.85$ . It is concluded that the Excitation Technique Impulse is effective for characterizing rigidity, demonstrating great cost / benefit and speed parts classification and an increase in the value of lumber.

**Keywords:** Wood. Rigidity. Impulse Excitation Technician.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de carregamento para o ensaio de flexão.....	15
Figura 2 – Corpo de prova de flexão .....	15
Figura 3 – Método de vibração transversal .....	17
Figura 4 – Método das ondas de tensão .....	17
Figura 5 – Método da propagação de ondas de ultrassom .....	17
Figura 6 – Equipamento Sonelastic® Tecnologia PC Based .....	18
Figura 7 – Pranchas em processo de secagem ao ar livre .....	21
Figura 8 – Medidor de umidade por resistência Lgnomat, modelo MiniLigno DX/C ..	21
Figura 9 – Comprimento diferenciados das peças obtidas das pranchas iniciais.....	22
Figura 10 – Entrada do Sonelastic® Tecnologia PC Based .....	23
Figura 11 – Saída do Sonelastic® Tecnologia PC Based .....	23
Figura 12 – Realização de ensaio não destrutivo em uma peça de madeira .....	24
Figura 13 – Realização do ensaio de um corpo de prova de flexão estática .....	25
Figura 14 – Gráfico da correlação entre a densidade e altura .....	27
Figura 15 – Gráfico da correlação entre MOE e altura - Peças.....	30
Figura 16 – Gráfico da correlação entre a frequência e altura - Peças .....	31
Figura 17 – Gráfico da correlação entre o MOE e altura – Flexão estática .....	33
Figura 18 – Gráfico da correlação entre a frequência e altura – Flexão estática .....	34
Figura 19 – Gráfico da correlação entre $E_m$ e $E_d$ – Altura A. ....	36
Figura 20 – Gráfico da correlação entre $E_m$ e $E_d$ – Altura B .....	37
Figura 21 – Gráfico de correlação entre $E_m$ e $E_d$ – Altura C .....	38
Figura 22 – Gráfico de correlação entre $E_m$ e $E_d$ para as três alturas.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade da madeira nas alturas A, B e C para as 4 toras .....	26
Tabela 2 – Frequências e módulos de elasticidade dinâmicos longitudinais para as peças – Altura A .....	28
Tabela 3 – Frequências e módulos de elasticidade dinâmicos longitudinais para as peças – Altura B .....	28
Tabela 4 – Frequências e módulos de elasticidade dinâmicos longitudinais para as peças – Altura C .....	29
Tabela 5 – Frequências e módulos de elasticidade dinâmicos longitudinais para as peças .....	29
Tabela 6 – Valores de F e $E_d$ encontrados pela aplicação de TEI .....	32
Tabela 7 – Valores de MOE obtidos no ensaio de flexão estática .....	35

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$E_d$	Módulo de elasticidade longitudinal dinâmico
$E_M$	Módulo de elasticidade na flexão estática
F	Frequência
MOE	Módulo de elasticidade
NBR	Norma Brasileira
TEI	Técnica de excitação por impulso

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	11
<b>2.1 Objetivo geral</b> .....	11
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	11
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	12
<b>3.1 Anatomia da madeira</b> .....	12
<b>3.2 Madeira de <i>Eucalyptus grandis</i></b> .....	12
<b>3.3 Propriedades físico-mecânicas da madeira</b> .....	13
<b>3.4 Métodos de ensaios não destrutivos</b> .....	16
3.4.1 Técnica de excitação por impulso .....	18
<b>3.5 Pesquisas sobre caracterização de madeiras com técnicas de ensaios não destrutivos</b> .....	19
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	21
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	26
<b>5.1 Ensaios físicos</b> .....	26
<b>5.2 Ensaios não destrutivos</b> .....	28
5.2.1 Peças .....	28
5.2.2 Corpos-de-prova de flexão estática .....	31
<b>5.3 Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático</b> .....	35
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	40
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	41

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material natural que apresenta grande variabilidade em suas propriedades mecânicas e seu aproveitamento é adequado quando a mesma é classificada corretamente.

Devido a escassez de florestas nativas e a demanda de madeira cada vez mais elevada, faz-se necessário também o estudo de madeiras provenientes de plantios de reflorestamento, pois a madeira é uma matéria prima renovável, de baixo impacto ambiental e o Brasil é um dos países de maior área de reflorestamento do mundo.

A madeira de *Eucalyptus grandis* é vastamente utilizada desde a produção de celulose, indústria moveleira à construção civil, o que exige o estudo, avaliação e classificação de suas propriedades mecânicas, que são de basal importância para que se possa alcançar melhor utilização desse material frente a outros.

Distintos métodos são empregados para a classificação das propriedades mecânicas da madeira, com enfoque na rigidez da madeira, que é realizado através do cálculo do módulo de elasticidade longitudinal, através da utilização de ensaios não destrutivos, tais como os métodos de vibração transversal, de ondas de tensão e de ondas de ultrassom. Entre esses métodos está a técnica de excitação por impulso (TEI), que utiliza a frequência de vibração natural do material.

Métodos não destrutivos possuem vantagens de aplicação quando comparados aos métodos destrutivos, uma vez que não exigem a extração de corpo de prova, a avaliação é feita na própria peça ou estrutura, têm custo/benefício favorável e, em especial, possibilitam a caracterização eficaz da madeira, promovendo melhor escolha e utilização do material.

O município de Itapeva pertence à região que constitui o maior polo madeireiro do Estado de São Paulo (Brasil), com extensas florestas de reflorestamento de Eucalipto. A localização do Campus Experimental da UNESP de Itapeva/SP é facilitadora para a realização de estudo das propriedades mecânicas da madeira *Eucalyptus grandis*, especificamente para utilização em estruturas.

O objetivo deste trabalho é analisar a eficácia da técnica de excitação por impulso para caracterização da rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* de 10 anos da região de Itapeva/SP.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

Analisar a eficácia da técnica de excitação por impulso (TEI) para caracterização da rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* de 10 anos da região de Itapeva/SP.

### 2.2. Objetivos específicos

- Realizar a caracterização de módulo de elasticidade na flexão estática da madeira de *Eucalyptus grandis* proveniente da região de Itapeva/SP, de árvores com cerca de 10 anos de idade;
- Realizar a caracterização de módulo de elasticidade longitudinal dinâmico da madeira de *Eucalyptus grandis* de 10 anos de idade proveniente da região de Itapeva/SP, através da aplicação da TEI;
- Avaliar a variação do módulo de elasticidade na flexão estática da madeira de *Eucalyptus grandis* proveniente da região de Itapeva/SP em 3 alturas (3, 6 e 9 m), a partir da base;
- Estudar a correlação entre o módulo de elasticidade na flexão estática, obtido no ensaio destrutivo, com o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico, obtido na TEI, da madeira de *Eucalyptus grandis* proveniente da região de Itapeva/SP;
- Contribuir para a classificação da madeira de *Eucalyptus grandis* com dados científicos sobre a rigidez, para o incentivo de utilização dessa espécie com menores idades possível, em estruturas, na região de Itapeva/SP.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Anatomia da madeira

Costa (2001) descreve a madeira como um material heterogêneo natural que têm diferentes tipos celulares adaptados para o desempenho específico de diversas funções. As células são dispostas no sentido radial, tangencial e longitudinal, unidas pela lignina, formando assim, o tecido lenhoso. Existe grande variação química, física e anatômica a depender da espécie da madeira, podendo ocorrer variações também entre mesma espécie, relacionadas à idade, fatores genéticos e ambientais, diferenças de cerne e alburno, madeira de início e fim de crescimento.

A finalidade do estudo da anatomia do lenho tem como objetivo principal o reconhecimento microscópico da madeira, que favorece o comércio e a indústria madeireira, assim, exame anatômico da madeira representa um meio seguro de identificação das mesmas.

Bessa (2009) destaca que para a viabilização do material, precisa-se que suas propriedades atinjam determinados valores de referência, e tais propriedades estão relacionadas à composição de sua estrutura interna.

#### 3.2 Madeira de *Eucalyptus grandis*

O gênero *Eucalyptus* corresponde a maior área de reflorestamento mundial, com sua diversidade de espécies dentro do gênero, a plasticidade ecológica e excelente produção se tornou matéria-prima de grande número de indústrias florestais, o que possibilitou avanço tecnológico de muitas espécies. Os *Eucalyptus* são capazes de regeneração após corte, o que é um atrativo para que sejam utilizadas no reflorestamento (FINGER *et al.*, 1993).

A madeira de *Eucalyptus grandis* tem as seguintes características: cerne distinto do alburno de coloração rosa (classificado pela escala Munsell como 10 R 5/4); o alburno é cinza-rosado (10 YR 7/2). As camadas de crescimento são distintas, a grã é direita e a textura é média, apresenta figura tangencial em linhas vasculares pouco destacadas, de brilho moderado e inodoro (LPF IBAMA, 1998).

A madeira de *Eucalyptus* destacou-se na indústria de produtos sólidos partindo da última década como fonte de matéria-prima de uso diversificado, e, em diversos países vem sendo utilizada como madeira serrada, enquanto no Brasil o

uso para esse fim é rudimentar. Ainda que essa madeira seja uma boa alternativa para a indústria madeireira, tal matéria-prima possui limitações intrínsecas e extrínsecas oriundas de florestas de crescimento rápido, acrescentando-se a falta de conhecimentos tecnológicos aos fatores. A falta de informações técnicas existentes até algum tempo, sobre madeiras do gênero, tornava inviável que sua utilização como peça acabada, sendo seus problemas principais eram rachaduras e deformações. Até então, quase toda a madeira utilizada para os usos nobres, era proveniente de plantios voltados para a produção de celulose e carvão, sem as técnicas especiais disponíveis atualmente. Hoje, dentre as aplicações da madeira de *Eucalyptus* no Brasil, a indústria moveleira e a construção civil são as que possuem o grande número de sua utilização, com as melhores perspectivas (GONÇALEZ *et al.*, 2006).

Andrade (1961) afirma que exemplos de uso da madeira de *Eucalyptus* em marcenária e movelaria existem desde longa data, em diferentes regiões do mundo. Mangieri e Dimitri (1958) citam que, desde a década de 1950, na Austrália, África do Sul e Argentina, são utilizadas a madeira de *Eucalyptus* para a construção civil, sendo seus atrativos a fácil trabalhabilidade manual e mecânica e boas características para tratamentos superficiais.

Mendonza (1995) escreve que a madeira de *Eucalyptus* é utilizada a tempos na construção civil e indústria moveleira. Já Oliveira (1999) afirma que todos os protótipos construídos com madeira de *Eucalyptus grandis* apresentam excelentes resultados, mas encontram restrições quanto a disponibilidade de madeira de qualidade, assim como uma continuidade de suprimento.

O conhecimento tecnológico sobre madeiras com potencial para utilização na indústria, como a madeira de *Eucalyptus*, favorece a introdução da espécie no mercado. O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira traz contribuições significativas sob o ponto de vista de utilização da espécie para um fim específico (GONÇALEZ, 2006).

### **3.3 Propriedades físico-mecânicas da madeira**

O comportamento mecânico da madeira está associado a sua estrutura celular. A madeira é um produto do tecido xilemático localizado no tronco e galhos

das árvores, com células especializadas na sustentação e condução de seiva (COSTA, 2001).

As propriedades físicas e mecânicas da madeira devem ser avaliadas para que se definam adequadamente os fins para os quais serão destinadas. Juntamente a outros fatores como resistência à degradação natural, estética e valores de mercado, as propriedades permitem que as madeiras sejam seguramente classificadas a usos apropriados, tal como peças estruturais. (ARAÚJO, 2007).

No Brasil a classificação de lotes de madeira para uso estrutural é dada pelo documento normativo ABNT:NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira, considerando-se dois quesitos, as classes de resistência da madeira associadas unicamente à aptidão estrutural do material à classificação mecânica da madeira, e categorias, integradas à qualidade, presença ou ausência de defeitos e homogeneidade das peças de madeira do lote. Através desses dois quesitos é realizada a classificação estrutural e estabelecida a resistência de cálculo da madeira do lote considerado. (CALIL JUNIOR, *et al.*, 2006).

A resistência tem como base valores obtidos em ensaios de caracterização de espécies realizados em laboratórios, ou valores fornecidos pela norma brasileira de estrutura de madeira, que possui propriedades de diversas espécies. Os valores são determinados pela máxima tensão que pode ser aplicada em corpos de prova normalizados e isentos de defeitos. (CALIL JUNIOR, *et al.*, 2006).

A ABNT:NBR 7190/1997 estabelece que a rigidez da madeira à flexão estática é calculada através do módulo de elasticidade ( $E_M$ ), que deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga x deslocamento no meio do vão (Figura 1), definida pelos pontos ( $F_{10\%}$ ;  $v_{10\%}$ ) e ( $F_{50\%}$ ;  $v_{50\%}$ ) correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da carga máxima de ensaio estimada por meio de um corpo de prova idêntico a outro, dado pela Equação 1 a seguir:

$$E_M = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%}) 4bh^3} \quad (1)$$

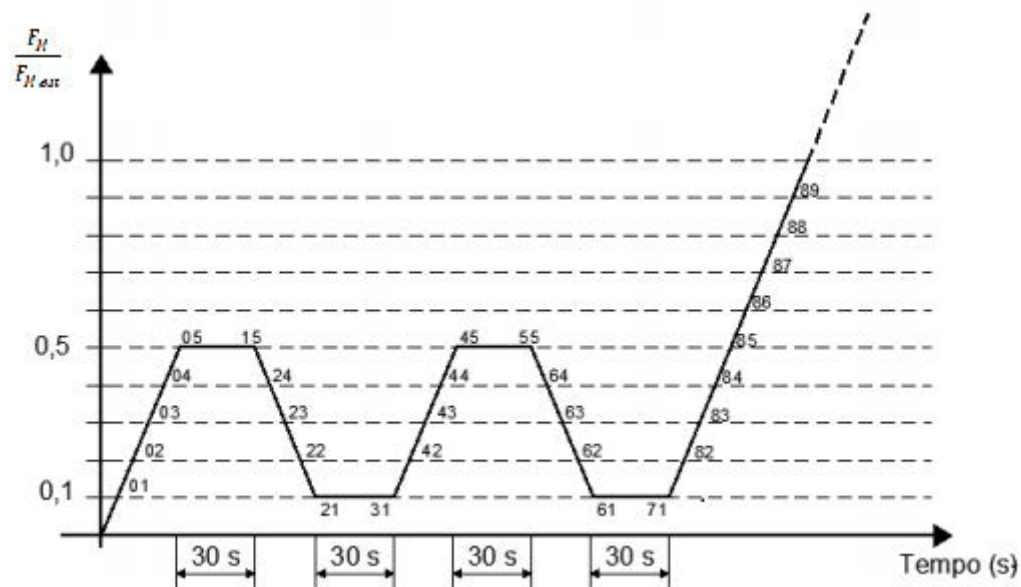
Onde:

$F_{M, 10\%}$  e  $50\%$  são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada, aplicada ao corpo de prova em Newtons;

$V_{10\%}$  e  $V_{50\%}$  são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada da  $F_{M,est}$ , em metros;

$b$  e  $h$  correspondem, respectivamente, à largura e à altura da seção transversal do corpo de prova, em metros.

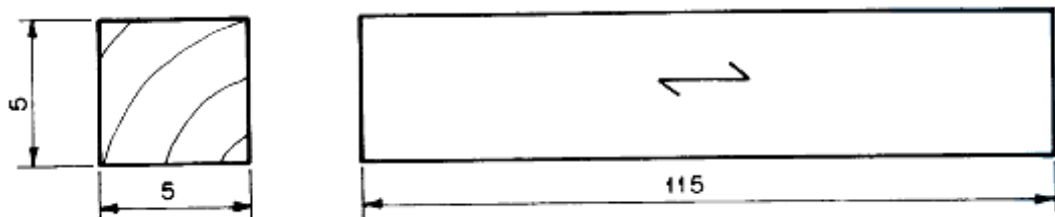
Figura 1- Diagrama de carregamento para o ensaio de flexão.



Fonte: ABNT:NBR 7190/1997.

Os corpos de prova devem possuir o formato prismático, com seção transversal quadrada de 5,0cm de lado e comprimento, na direção paralela às fibras, de 115cm, e devem ser confeccionados de preferência com o plano de flexão perpendicular à direção radial da madeira (Figura 2).

Figura 2 - Corpo de Prova de flexão.



Fonte: NBR 7190:1997- Adaptado.

No ensaio, o corpo de prova deve ser vinculado a dois apoios articulados móveis, com vão livre entre apoios de  $21h$ , sendo o equilíbrio do sistema garantido

pelo atrito com o atuador. O carregamento consiste em uma carga concentrada, aplicada por meio de um cutelo acoplado ao atuador.

### 3.4 Métodos de ensaios não destrutivos

As propriedades tecnológicas da madeira são comumente avaliadas através de métodos destrutivos, onde o resultado dá-se de uma estimativa de valores, em razão de tratar-se de ensaios realizados por meio de amostras e não da peça inteira. No Brasil os métodos não destrutivos para caracterização de outros materiais começaram a ser estudados ao fim da década de 1980 (STANGERLIN, 2010).

Ensaio não destrutivo não exige a extração de corpo de prova, a avaliação é feita na própria peça ou estrutura, de tal forma que verificam a existência ou não de defeitos sem alterar as características físicas e mecânicas da madeira, não afetando sua capacidade de uso posterior (CALIL JUNIOR e MINÁ, 2003). A escolha da madeira apropriada, considerando aplicações específicas, depende de uma avaliação particular, sendo que o método não destrutivo contribui nessa escolha (MORALES, 2006).

Calil Junior e Miná (2003) afirmam que, é amplamente conhecida a relação entre o módulo de elasticidade e a frequência de vibração longitudinal, e são citadas quatro: Método de Excitação por Impulso (*Impulse Excitation Technique*) - o corpo de prova sofre um impacto de curta duração que o induz a uma resposta acústica composta por uma ou mais frequências naturais de vibração, a partir delas o módulo de elasticidade pode ser calculado; Método de vibração transversal (Figura 3) ou técnica de ressonância (*Transverse Vibration Technique or Resonance Technique*) - a vibração de uma amostra de madeira é analisada obtendo, assim, o módulo de elasticidade a partir da análise das principais frequências de vibração; Método das ondas de tensão (*Stress Wave Method* - Figura 4) - aplica-se um impacto na madeira de curta duração, ele gera uma onda de tensão, ela é analisada. Método da propagação de ondas de ultrassom - consiste na análise de ondas acústicas (*Acoustic Emission - AE* - Figura 5) e ultrassônicas (*Acousto-Ultrasonic Emission - AU*).

Figura 3 – Método de vibração transversal.



Fonte: Disponível em <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijme.20160603.06.html>.

Figura 4 – Método das ondas de tensão.



Fonte: Disponível em [http://madeira.set.eesc.usp.br/article/viewFile/91/pdf\\_84](http://madeira.set.eesc.usp.br/article/viewFile/91/pdf_84).

Figura 5 – Método da propagação de ondas de ultrassom.



Fonte: Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v25n1/24867.pdf>.

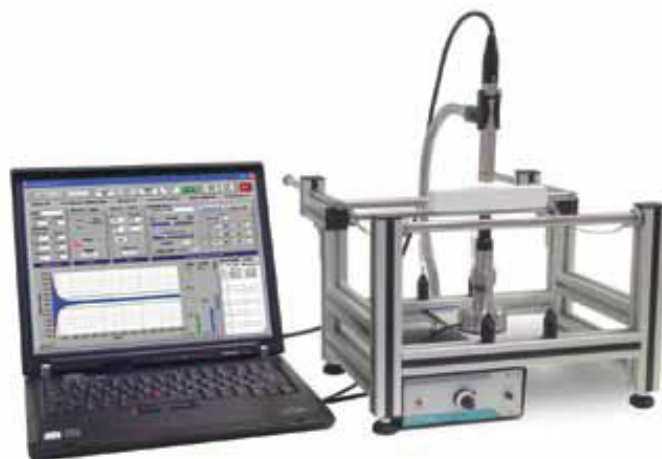
Na vibração de uma espécie de madeira a força elástica restaurada é proporcional ao deslocamento e a força dissipativa é proporcional à velocidade. Quando a força é aplicada com curta duração, o material se comporta como um sólido elástico. Quando a força é aplicada com longa duração o comportamento é igual ao de um líquido viscoso (OLIVEIRA, 2003).

O conhecimento do comportamento mecânico da madeira permite que sejam estabelecidos coeficientes de segurança regulamentados por meio de normas de dimensionamento de estruturas. A norma de cálculo e dimensionamento de estruturas de madeira, o documento normativo NBR 7190 (ABNT, 1981), que utilizava o método das tensões admissíveis, fora revista em 1997, adotando a metodologia dos estados limites no dimensionamento de estruturas de madeira, e é aceita atualmente (MELO, 2013).

#### 3.4.1 Técnica de excitação por impulso

A Técnica de Excitação por Impulso (TEI) consiste em através de uma pancada em uma das extremidades de um corpo de prova, captar o som com um microfone na sua outra extremidade para, à partir das frequências naturais de vibração do material determinar o seu Módulo de Elasticidade Longitudinal.

Figura 6 - Equipamento Sonelastic® Tecnologia PC Based com suporte ajustável para barras, de cilindros.



Fonte: Sonelastic® (2011).

O módulo de elasticidade longitudinal dinâmico é calculado através da Equação (2), fornecida pela ASTM E 1876.

$$E_d = 4mf_1^2 \left[ \frac{L}{\pi R^2 K} \right] \quad (2)$$

Onde:

L = comprimento da peça (mm);

m = massa da peça (g);

f<sub>1</sub> = frequência fundamental longitudinal (Hz);

K = Fator de correção para o módulo longitudinal levando em conta a relação finita do diâmetro – comprimento e o coeficiente de Poisson:

$$K = 1 - \left[ \frac{\pi^2 \mu^2 D_e^2}{8L^2} \right] \quad (3)$$

Onde:

μ = coeficiente de Poisson;

D<sub>e</sub> = diâmetro efetivo da peça (mm), que para uma seção transversal retangular da peça:

$$D_e^2 = \frac{2(b^2 + t^2)}{3} \quad (4)$$

Onde:

b = largura da peça (mm);

t = espessura da peça (mm).

### 3.5 Pesquisas sobre caracterização de madeiras com técnicas de ensaios não destrutivas

Cossolino e Pereira (2009) utilizaram 30 vigas de *Pinnus oocarpa* com dimensões nominais de 4 x 24 x 200 cm e outras 30 com dimensões nominais de 4 x 24 x 300 cm que foram caracterizadas pela Técnica de Excitação por Impulso, utilizando-se o equipamento Sonelastic® Stand Alone. Os quesitos avaliados foram: tipo de apoio onde foi encontrada a frequência média de 968,8 Hz, com desvio padrão de 0,15%; variações das posições dos apoios das amostras onde foi encontrada a frequência média de 968,4 Hz, com desvio padrão de 0,1%; e reprodutibilidade dos ensaios, onde foram realizadas 10 medições sem que o apoio e as condições mecânicas se alterassem, obtendo-se a frequência média de 968,5 Hz, com desvio padrão de 0,02%. Não foram encontradas diferenças estatísticas significativas nos resultados desses quesitos e encontraram R<sup>2</sup> = 0,89 ao estudarem a correlação entre os módulos de elasticidade estática e dinâmica.

No trabalho realizado por Ballarin e Palma (2009) foi caracterizada a madeira de *Eucalyptus grandis*, utilizando 24 árvores com 21 anos de idade e destas 57 corpos de prova com dimensões nominais de 2 cm x 2 cm x 46 cm. O equipamento utilizado para a análise e mensuração das frequências de vibração transversal foi o BING (Beam Identification by Nondestructive Grading), produzido pelo CIRAD-Forest. Obtiveram para o módulo de elasticidade dinâmico o valor médio de 16990 MPa e para o módulo de elasticidade estático na flexão valor médio 15306 MPa. Os coeficientes de correlação encontrados para a análise de regressão entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático foi  $R^2 = 0,87$ .

Iwakiri *et al* (2013) estudaram o módulo de elasticidade dinâmico nas diferentes posições do tronco da espécie *Tectona grandis* com 18 anos de idade utilizando método de ondas acústicas. Utilizaram 5 árvores, e de cada uma foram seccionadas três toras com 3,0m de comprimento, identificadas como base, meio e topo. Foi constatado o aumento nos valores médios de módulo de elasticidade nos sentidos longitudinal (base, meio e topo) e no sentido radial (medula a casca) das árvores.

Segundinho *et al.* (2012) relata que os métodos de ensaio não destrutivos de vibração transversal e de frequência longitudinal estão se tornando cada vez mais relevantes, pois são capazes de oferecer respostas rápidas e correlações lineares elevadas ( $R^2$  igual a 0,8), e o custo dos equipamentos necessários aos ensaios vem reduzindo ao longo dos anos. Em seu trabalho avaliaram 24 vigas de *Eucalyptus sp.* com dimensões nominais 4 x 6 x 200 cm e 14 vigas de *Pinus oocarpa* com dimensões nominais 4,5 x 9 x 230 cm, ambas sem tratamento, mais 30 pranchas com dimensões nominais 4 x 24 x 201 cm e 30 pranchas com dimensões nominais 4 x 24 x 305 cm, ambas de *Pinus oocarpa*, com tratamento à base de Arseniato de Cobre Cromatado – CCA. O trabalho foi baseado nas normas ASTM E 1876 e ASTM C215 (2008). As madeiras foram caracterizadas pela Técnica de Excitação por Impulso utilizando o equipamento Sonelastic® Stand Alone e através de flexão estática. As análises verificaram que os valores obtidos dos coeficientes angulares das retas de regressão linear indicam um ajuste médio de 0,91 obtidos através do ensaio de vibração longitudinal na avaliação não destrutiva de peças de madeira com a destrutiva.

#### 4. METODOLOGIA

Foram utilizadas peças das alturas 3, 6 e 9 metros (alturas A, B e C) à partir da base, de quatro árvores de *Eucalyptus grandis* de dez anos, com diâmetro máximo de 40 cm, provenientes da Fazenda Ribeirão do Sul (Itapeva/SP), doadas pela empresa SUDOESTE Paulista.

Inicialmente as pranchas foram entablicadas em um pátio coberto para a secagem ao ar livre, já que a espécie em questão apresenta problemas de rachaduras durante esse processo, onde permaneceram por cerca de 2 meses para chegarem a umidade de equilíbrio com o meio ambiente (Figura 7).

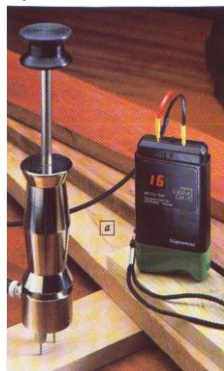
Figura 7 - Pranchas em processo de secagem ao ar livre.



Fonte: Autoria própria.

A umidade foi conferida em cada prancha pelo menos duas vezes por semana através de um medidor de umidade por resistência da marca Lignomat, modelo MiniLigno DX/C, mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Medidor de umidade por resistência Lignomat, modelo MiniLigno DX/C.



Fonte: Catálogo Mini C\_DX C (Xylema)

A Figura 9 mostra como, devido a rachaduras ou diâmetro das toras, os comprimentos das peças finais foram diferenciados para algumas peças.

Figura 9 - Comprimentos diferenciados das peças obtidas das pranchas iniciais.



Fonte: Autoria própria.

Em relação aos corpos de prova de flexão estática (Figura 2), devido às dimensões das suas seções transversais, foram retirados dois corpos de prova de cada lado da região da medula sendo um próximo à casca e outro próximo à medula designados, respectivamente por C e M.

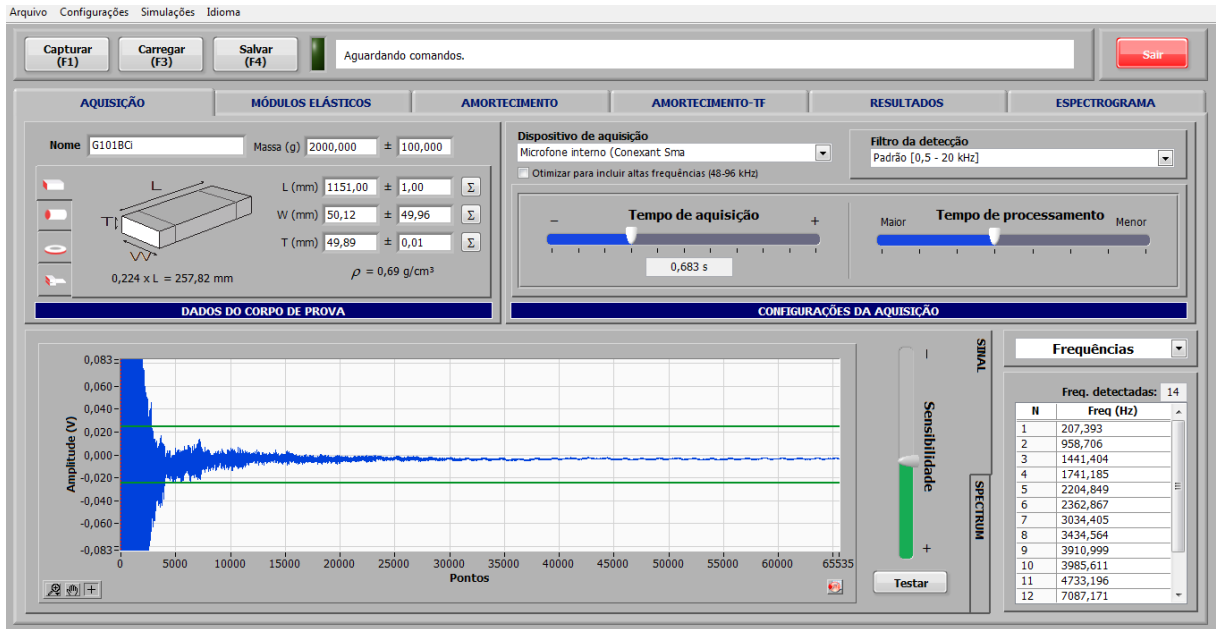
Antes da retirada dos corpos de prova para os ensaios físico-mecânicos de densidade e flexão estática, cada uma das peças mencionadas foi submetida ao método de ensaio não destrutivo de Excitação por Impulso, através da utilização do equipamento Sonelastic® Tecnologia PC Based (Figura 6) para as peças da altura A, B e C.

Depois das peças serem avaliadas pela TEI, foram usinados 40 corpos-de-prova de flexão estática que foram ensaiados previamente sem que ocorresse ruptura, antes do limite de proporcionalidade, para uma estimativa do módulo de elasticidade de cerca de 13,0 GPa, necessário como parâmetro para verificar a faixa de frequência no equipamento não destrutivo, visto que os mesmos não são comumente utilizados no estudo de madeiras e esse valor ainda não está disponível para a espécie estudada.

A seguir, esses corpos de prova foram submetidos a TEI, de acordo com as prescrições do documento normativo ASTM E-1876, para a determinação do valor da frequência de vibração e do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico da

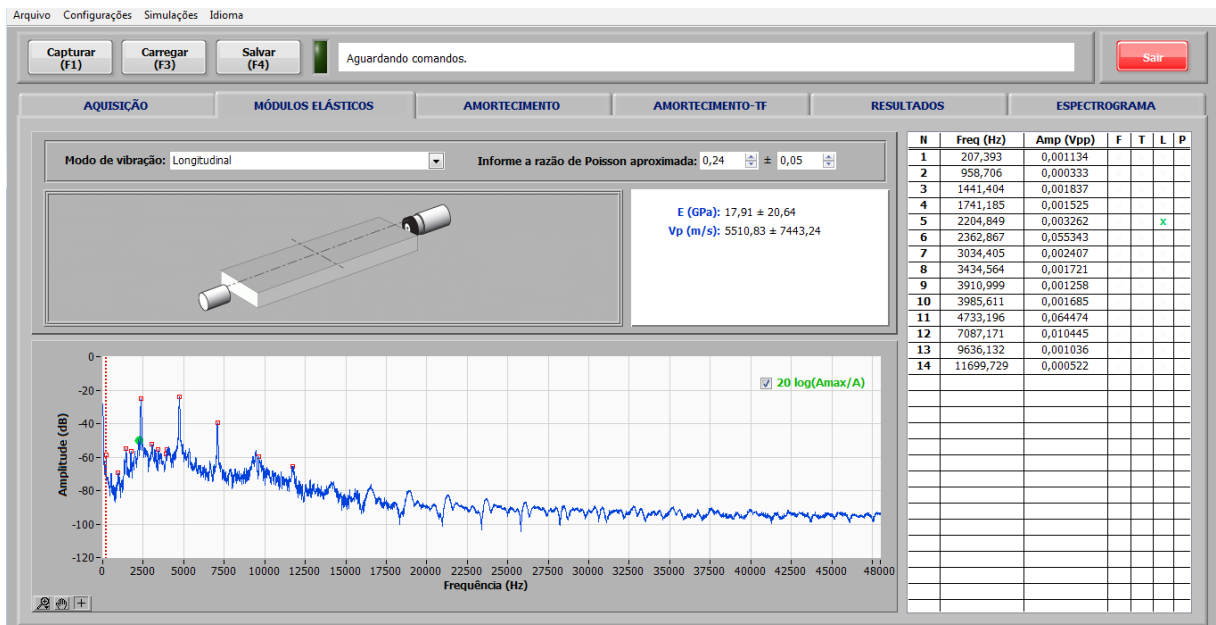
espécie de madeira *Eucalyptus grandis*. As Figuras 10 e 11 demonstram respectivamente a entrada e a saída do software.

Figura 10 - Entrada do Sonelastic® Tecnologia PC Based.



Fonte: Autoria própria.

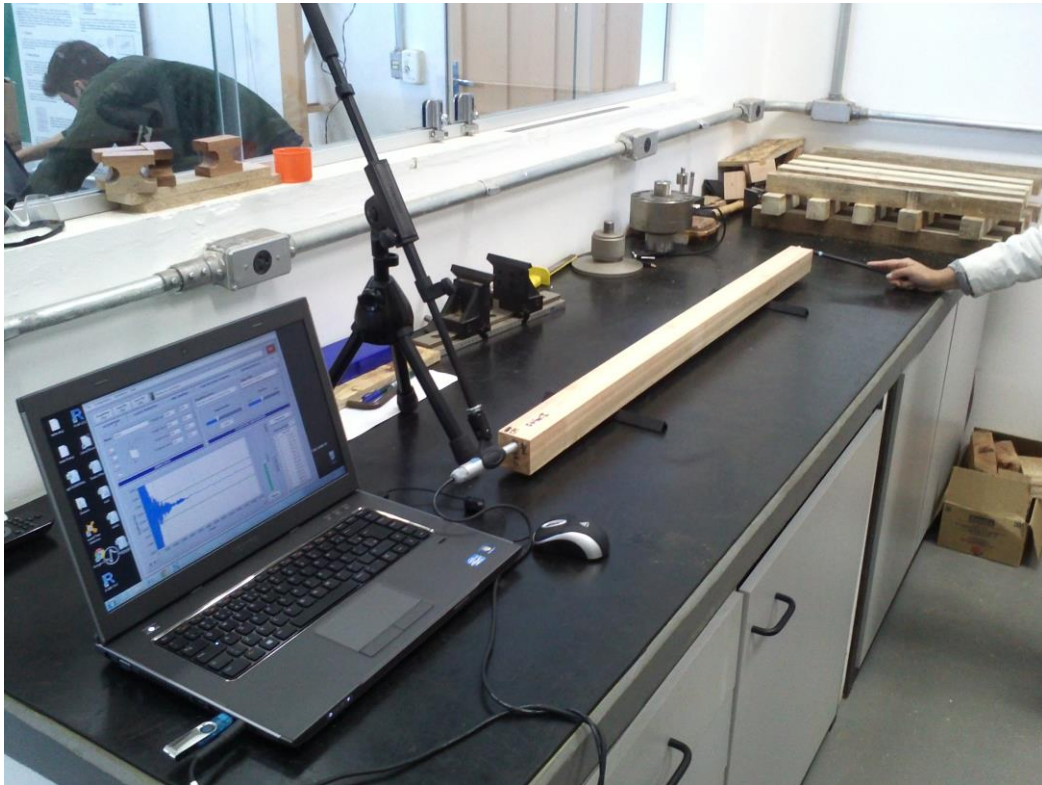
Figura 11 - Saída do Sonelastic® Tecnologia PC Based.



Fonte: Autoria própria.

O procedimento ocorreu em sala climatizada, em superfície emborrachada, excitando-se cinco vezes as peças iniciais (vigas) e corpos de prova de flexão estática anotando-se as frequências obtidas. A Figura 12 mostra a realização da realização do ensaio.

Figura 12 - Realização de ensaio não destrutivo em uma peça de madeira.



Fonte: Autoria própria.

Em prosseguimento foi conduzido o ensaio de flexão estática nos corpos de prova, de acordo com as prescrições do documento normativo ABNT:NBR 7190/1997, na Máquina Universal de Ensaios EMIC DL – 30 ton do Laboratório de Propriedades dos Materiais, do Campus de Itapeva da UNESP.

Dependendo da largura de cada peça foram obtidos menos corpos de prova de flexão estática do que planejado inicialmente. A Figura 13 mostra a realização de um ensaio de flexão estática.

Figura 13 - Realização do ensaio de um corpo de prova de flexão estática.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados encontrados foram processados em relação a dados descritivos bem como alguns gráficos de regressão, através do software estatístico R e do programa Microsoft Excel, para valores encontrados nos ensaios destrutivos de flexão estática e não destrutivos pela TEI.

Para a realização das análises estatísticas primeiramente foram estudadas a normalidade e homogeneidade (Teste de Shapiro-Wilk) dos dados para poder ser realizada a análise de regressão, para determinar se as variáveis estudadas são correlacionáveis e suas respectivas equações de correlação.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de densidade, flexão estática e não destrutivo pela técnica de TEI para a madeira de *Eucalyptus grandis*, seguidos da análise estatística para cada variável estudada.

### 5.1. Ensaio físicos

Para os ensaios de densidade foram obtidos três corpos de prova de cada um dos lados da medula, de diferentes regiões da tora em relação ao seu diâmetro.

A Tabela 1 mostra os valores de densidade em g/cm<sup>3</sup> obtidos das 3 alturas (A, B e C), para as quatro toras, juntamente aos valores das médias (M), desvios padrões (DP) e coeficientes de variação (CV) relacionados a esses dados, a um teor de umidade médio de 12%.

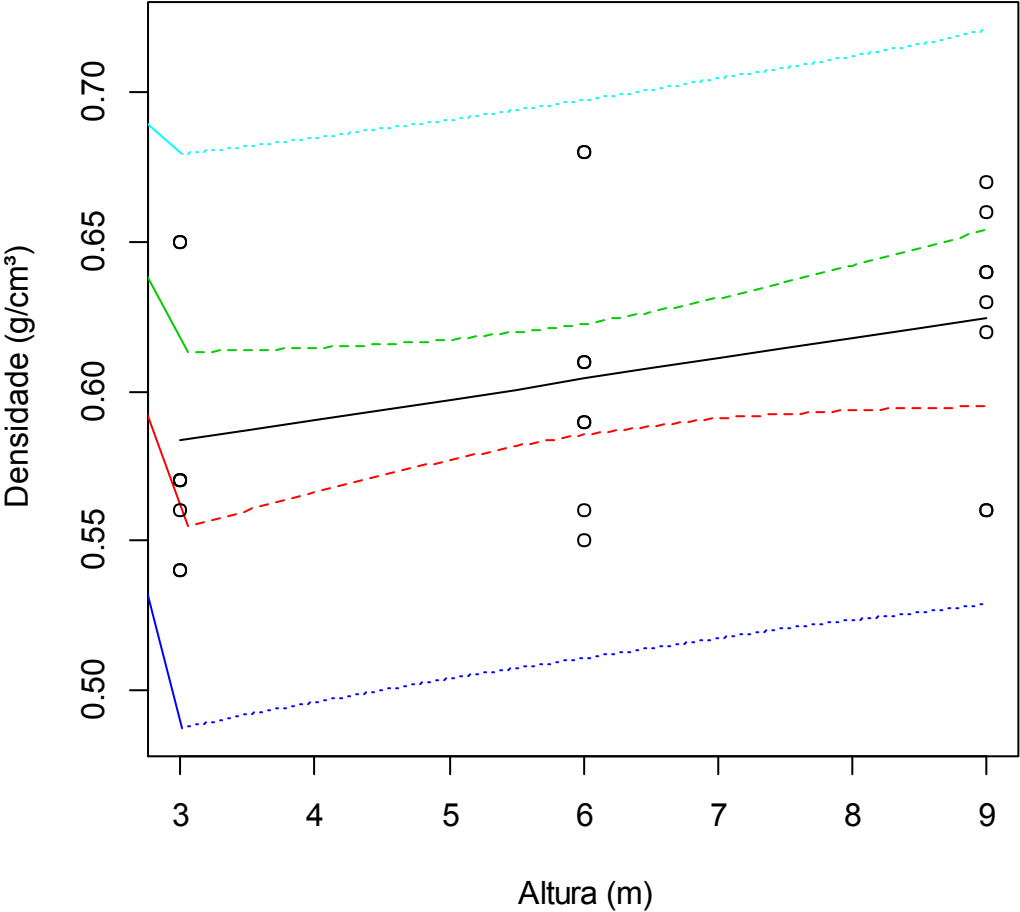
Tabela 1: Densidade da madeira nas alturas A, B e C para as 4 toras.

Peça	Altura			4 toras
	A	B	C	
<b>CP1</b>	0,57	0,61	0,62	0,60
<b>CP2</b>	0,56	0,61	0,63	
<b>CP3</b>	0,57	0,56	0,56	0,56
<b>CP4</b>	0,54	0,59	0,56	
<b>CP5</b>	0,65	0,55	0,64	0,60
<b>CP6</b>	0,54	0,59	0,64	
<b>CP7</b>	0,65	0,68	0,66	0,65
<b>CP8</b>	0,57	0,68	0,67	
<b>M</b>	0,58	0,61	0,62	0,60
<b>DP</b>	0,04	0,05	0,04	0,04
<b>CV (%)</b>	7,61	8,02	6,69	6,12

Através da análise de regressão pode ser determinado se a densidade pode ser dada em função das alturas A, B e C, que possuem medidas respectivamente 3, 6 e 9m. Obteve-se *p-value* igual a 0,07471, aceitando a hipótese de que as duas variáveis não são dependentes, concluindo que a densidade não

depende e não pode ser dada em função da altura. A figura 14 ilustra a correlação entre densidade e altura.

Figura 14 - Gráfico da correlação entre densidade e altura.



Onde:

- - - = intervalo de confiança superior;
- - - = intervalo de confiança inferior;
- ..... = intervalo de predição superior;
- ..... = intervalo de predição inferior.

## 5.2. Ensaio não destrutivo

### 5.2.1. Peças

As Tabelas 2, 3 e 4 mostram as frequências (F) e módulos de elasticidade ( $E_d$ ) obtidos na avaliação das peças através da TEI com a utilização do equipamento Sonelastic® PC Based para as alturas A, B e C.

Tabela 2 - Frequências e módulos de elasticidade dinâmicos longitudinais para as peças – Altura A.

<b>Altura A</b>				
<b>CP</b>	<b>L(m)</b>	<b><math>\rho</math>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>F (Hz)</b>	<b><math>E_d</math> (GPa)</b>
1	1440	0,69	1831	13,0
2	2030	0,59	1235	13,0
3	1780	0,64	1405	6,7
4	2005	0,63	1344	13,8
5	2405	0,57	1096	11,0
6	2303	0,73	1155	15,1
7	2293	0,69	1170	13,8
<b>M</b>	2037	0,65	1319	12,3
<b>DP</b>	255	0,05	250	2,8
<b>CV (%)</b>	12	7	19	23

Tabela 3 - Frequências e módulos de elasticidade dinâmicos longitudinais para as peças – Altura B.

<b>Altura B</b>				
<b>CP</b>	<b>L(m)</b>	<b><math>\rho</math>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>F (Hz)</b>	<b><math>E_d</math> (GPa)</b>
1	2013	0,64	1370	12,4
2	2110	0,60	1386	14,3
3	2165	0,54	1303	15,0
4	2165	0,57	1280	12,3
5	2734	0,54	1059	12,5
6	2730	0,59	883	12,0
7	2371	0,69	1183	15,6
8	2653	0,73	862	13,9
<b>M</b>	2368	0,61	1166	13,5
<b>DP</b>	254	0,06	209	1,4
<b>CV (%)</b>	11	9	18	10

Tabela 4 - Frequências e módulos de elasticidade dinâmicos longitudinais para as peças – Altura C.

<b>Altura C</b>				
<b>CP</b>	<b>L(m)</b>	<b><math>\rho</math>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>F (Hz)</b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>
1	2031	0,63	1367	16,3
2	1517	0,89	1648	17,2
3	2337	0,59	1237	14,7
4	2195	0,58	1264	12,1
5	2042	0,60	1379	14,1
6	2042	0,58	1419	14,5
7	2555	0,65	941	14,3
8	2160	0,70	1166	18,9
<b>M</b>	2110	0,65	1303	15,0
<b>DP</b>	202	0,07	206	1,6
<b>CV (%)</b>	10	11	16	11

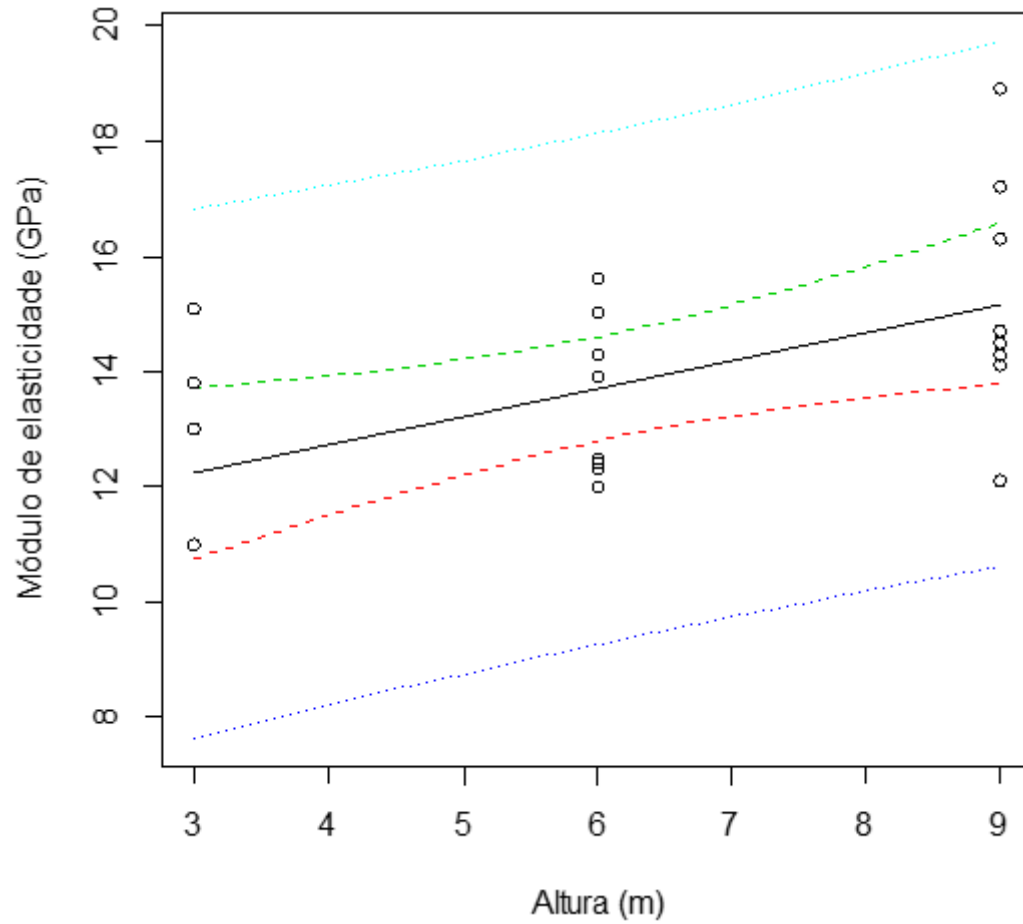
Tabela 5 - Frequências e módulos de elasticidade dinâmicos longitudinais para as peças.

	<b>Altura A</b>		<b>Altura B</b>		<b>Altura C</b>	
<b>CP</b>	<b>F (Hz)</b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>	<b>F (Hz)</b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>	<b>F (Hz)</b>	<b>E<sub>d</sub> (GPa)</b>
<b>M</b>	1319	12,3	1166	13,5	1303	15,0
<b>DP</b>	250	2,8	209	1,4	206	1,6
<b>CV (%)</b>	19	23	18	10	16	11

Nos dados das alturas B e C observa-se que os coeficientes de variação foram no máximo de 18%, valores esses aceitáveis para estudos de propriedades da madeira, mostrando que os valores de frequências e de E<sub>d</sub> são homogêneos, diferentemente do que aconteceu com as peças da altura A, o que pode ter acontecido pela influência da rachadura na região da medula para a árvore 2, nessa altura.

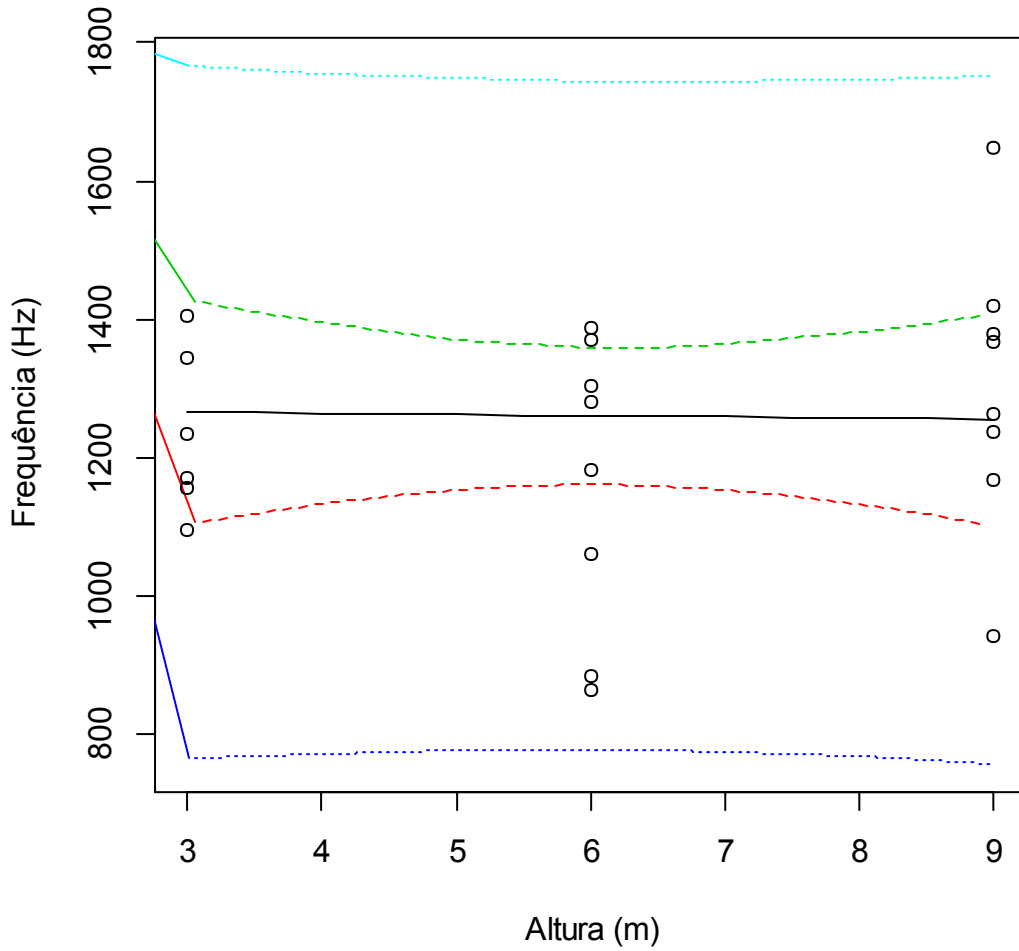
Foi realizada a análise de regressão para determinar se o E<sub>d</sub> das peças pode ser dado em função das alturas A, B e C. Obteve-se *p-value* igual a 0,0129, rejeitando a hipótese de que os dois não são dependentes, ou seja, indicando que o E<sub>d</sub> depende e pode ser dado em função da altura. A Figura 15 demonstra a correlação entre MOE e altura.

Figura 15 - Gráfico da correlação entre MOE e altura - Peças.



Foi realizada a análise de regressão para determinar se a frequência das peças pode ser dada em função das alturas A, B e C. Obteve-se *p-value* igual a 0,9329, aceitando a hipótese de que os dois não são dependentes, concluindo que a frequência não depende e não pode ser dada em função da altura. A Figura 16 demonstra a correlação entre a frequência e altura.

Figura 16 - Gráfico da correlação entre a frequência e altura – Peças.



### 5.2.2. Corpos-de-prova de flexão estática

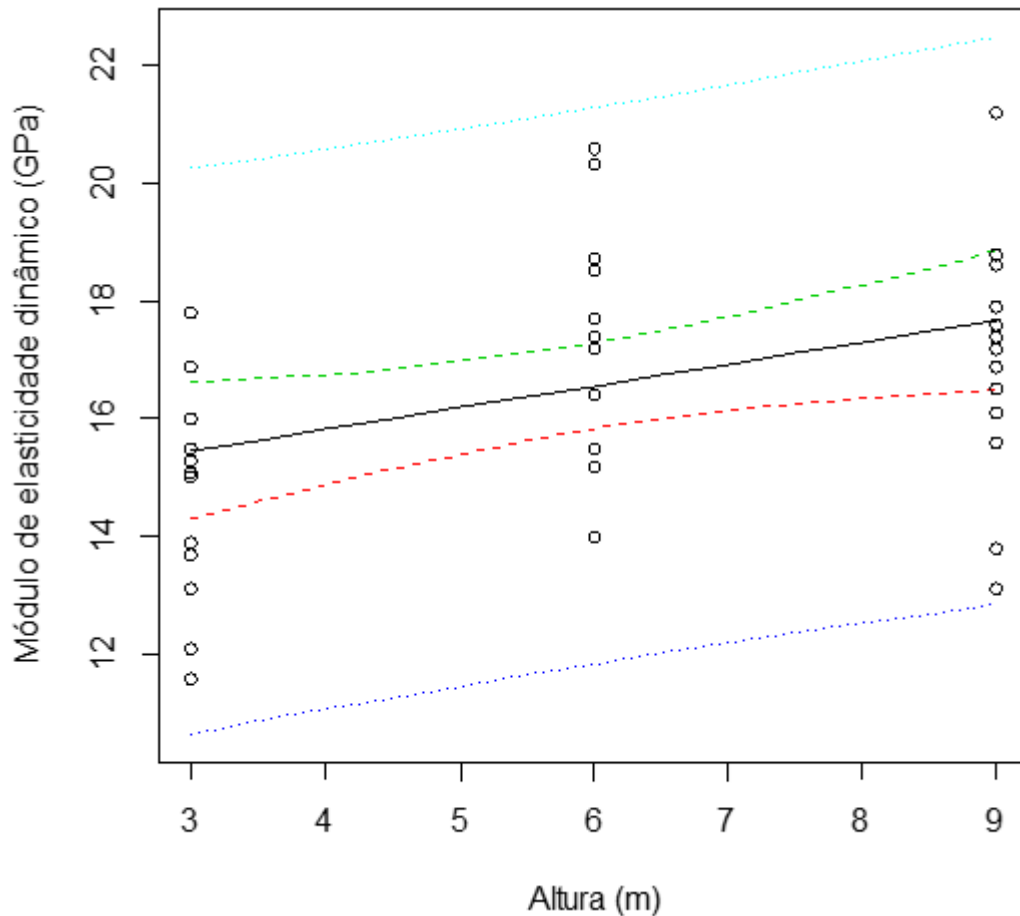
A Tabela 6 mostra os valores de frequências e módulos de elasticidade longitudinais dinâmicos obtidos em medições nos corpos de prova de flexão estática utilizando-se o equipamento *PC Based*.

Tabela 6 - Valores de F e E<sub>d</sub> encontrados pela aplicação da TEI

CP	Altura A		Altura B		Altura C	
	F (Hz)	E <sub>d</sub> (GPa)	F (Hz)	E <sub>d</sub> (GPa)	F (Hz)	E <sub>d</sub> (GPa)
1	1185	13,7	2241	18,5	2161	17,2
2	1651	15,5	2113	16,4	2262	17,9
3	1406	16,0	2246	15,5	2295	17,4
4	1311	13,1	2417	17,2	2367	18,6
5	2090	13,9	2382	17,7	2208	16,5
6	2111	15,1	2353	20,6	2188	13,8
7	950	11,6	2250	14,0	2180	13,1
8	1063	12,1	2367	18,7	2273	17,6
9	2301	16,0	2293	18,5	2296	16,9
10	2128	15,5	2419	15,2	2284	15,6
11	3181	15,0	2216	20,3	2299	16,1
12	1043	15,3	2435	23,1	2360	18,8
13	2227	16,9	2284	17,4	2335	21,2
14	2223	17,8	-	-	-	-
M	1776	14,8	2309	17,9	2270	17,0
DP	647	1,8	95,8	2,5	67,5	2,1
CV (%)	36	12	4,2	14	3,0	12,4

Foi realizada a análise de regressão para determinar se o E<sub>d</sub> pode ser dado em função das alturas A, B e C. Obteve-se *p-value* igual a 0,01764, concluindo-se que E<sub>d</sub> depende e pode ser dado em função da altura, assim como encontrado nas peças. A Figura 17 demonstra a correlação entre E<sub>d</sub> e altura.

Figura 17 - Gráfico da correlação entre  $E_d$  e altura – Flexão estática.

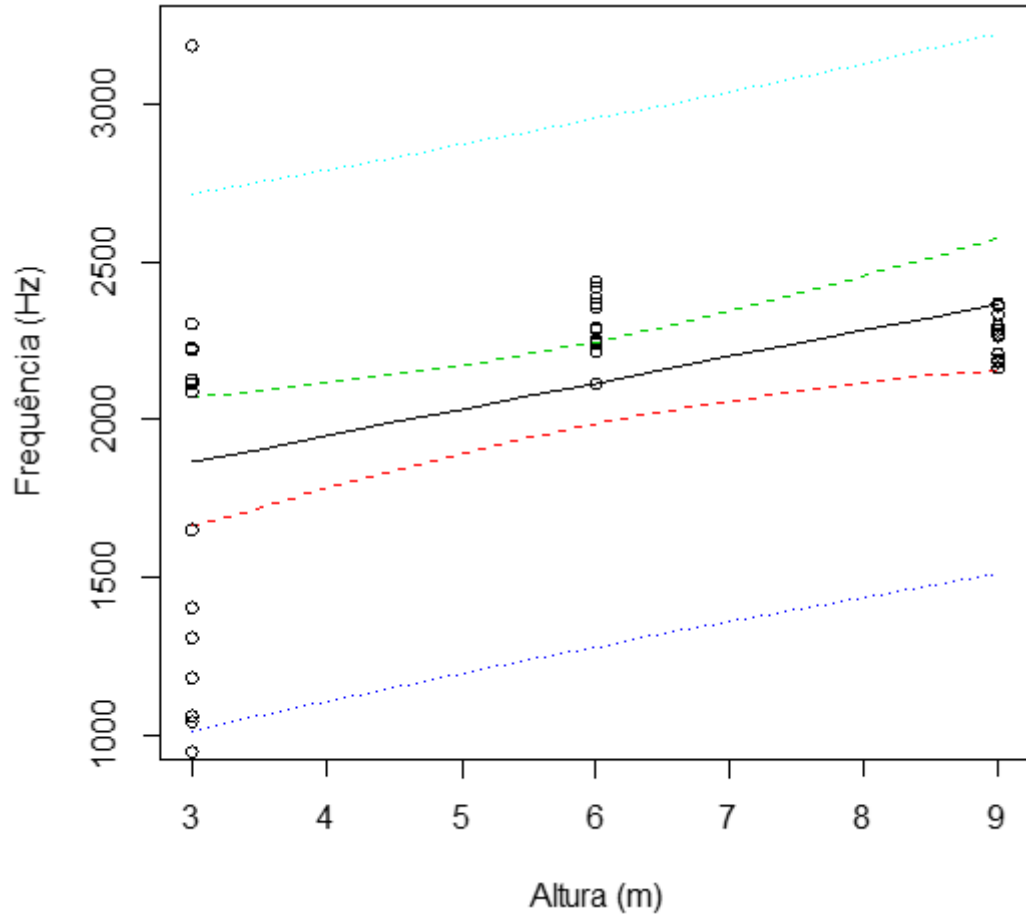


Foi também realizada a análise de regressão para determinar se a frequência pode ser dada em função das alturas A, B e C. Obteve-se  $p$ -value igual a 0,002873, rejeitando a hipótese de que os dois não são dependentes, concluindo que a frequência depende e pode ser dada em função da altura, diferentemente do que foi encontrado na análise das peças originais.

Essa diferença pode ter ocorrido, possivelmente, pela diferença de comprimentos das peças, o que interfere no valor das frequências (maiores comprimentos implicam em maiores valores de frequências). Isso não ocorre nas medições realizadas nos corpos de prova, que possuem o mesmo comprimento de 115 cm. A figura 18 demonstra a correlação entre a frequência e a altura.

Observou-se que quanto maior a altura da árvore maior foi o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico, assim como encontrado por Iwakiri *et al* (2013) para espécie *Tectona grandis*, através do método não destrutivo de ondas acústicas.

Figura 18 - Gráfico da correlação entre frequência e altura – Flexão estática.



### 5.3 Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e estático

A Tabela 7 apresenta os valores de módulos de elasticidade (GPa) obtidos no ensaio de flexão estática a um teor de umidade de 12%, conforme indicado pela NBR7190/97, nas três alturas, juntamente aos valores das médias (GPa), desvios padrões (GPa) e coeficientes de variação relacionados a esses dados.

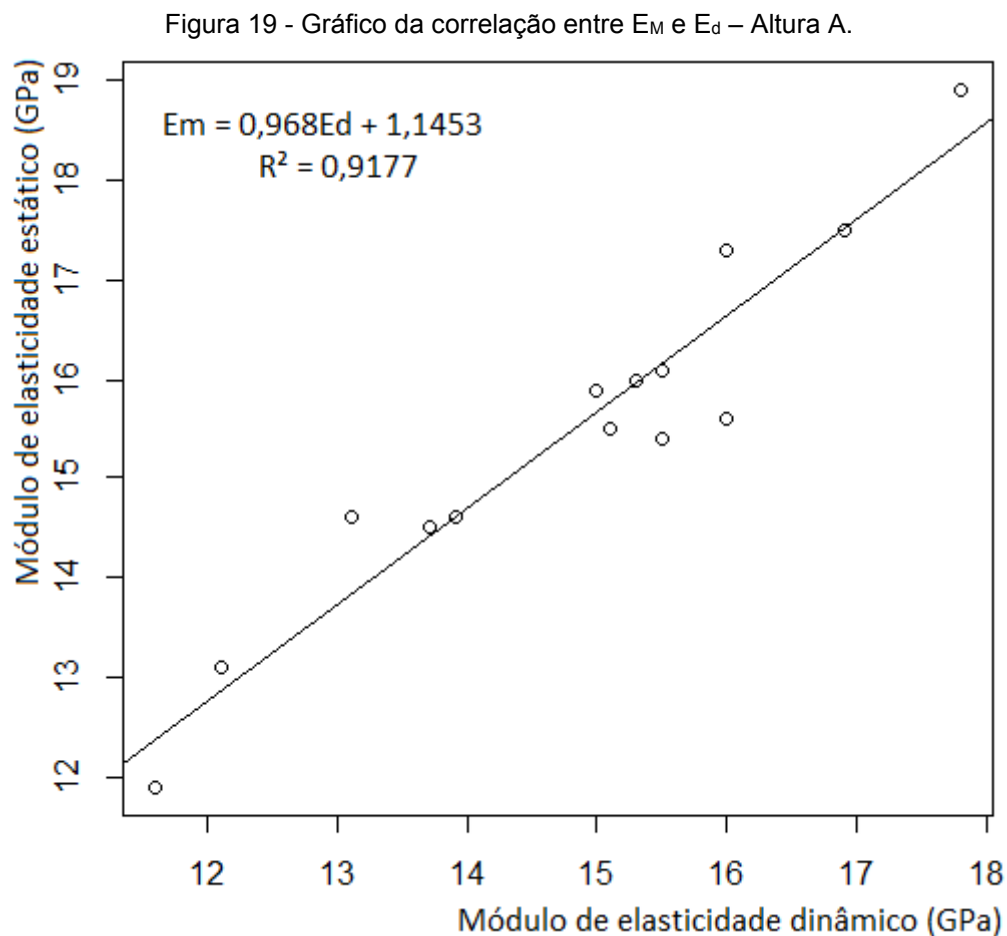
Tabela 7 - Valores de  $E_M$  obtidos no ensaio de flexão estática

CP	$E_M$		
	A	B	C
1	14,5	17,4	17,2
2	16,1	16,6	18,0
3	17,3	15,5	17,8
4	14,6	16,0	17,4
5	14,6	15,8	16,4
6	15,5	19,6	13,4
7	11,9	13,9	13,0
8	13,1	16,7	17,3
9	15,6	16,9	16,8
10	15,4	14,9	15,3
11	15,9	19,9	16,1
12	16,0	19,5	18,5
13	17,5	17,4	21,1
14	18,9	-	-
<b>M</b>	15,5	16,9	16,8
<b>DP</b>	1,27	1,41	1,50
<b>CV (%)</b>	8,2	8,3	8,9

O valor médio encontrado para o módulo de elasticidade estático para as três alturas foi de 16,4 GPa.

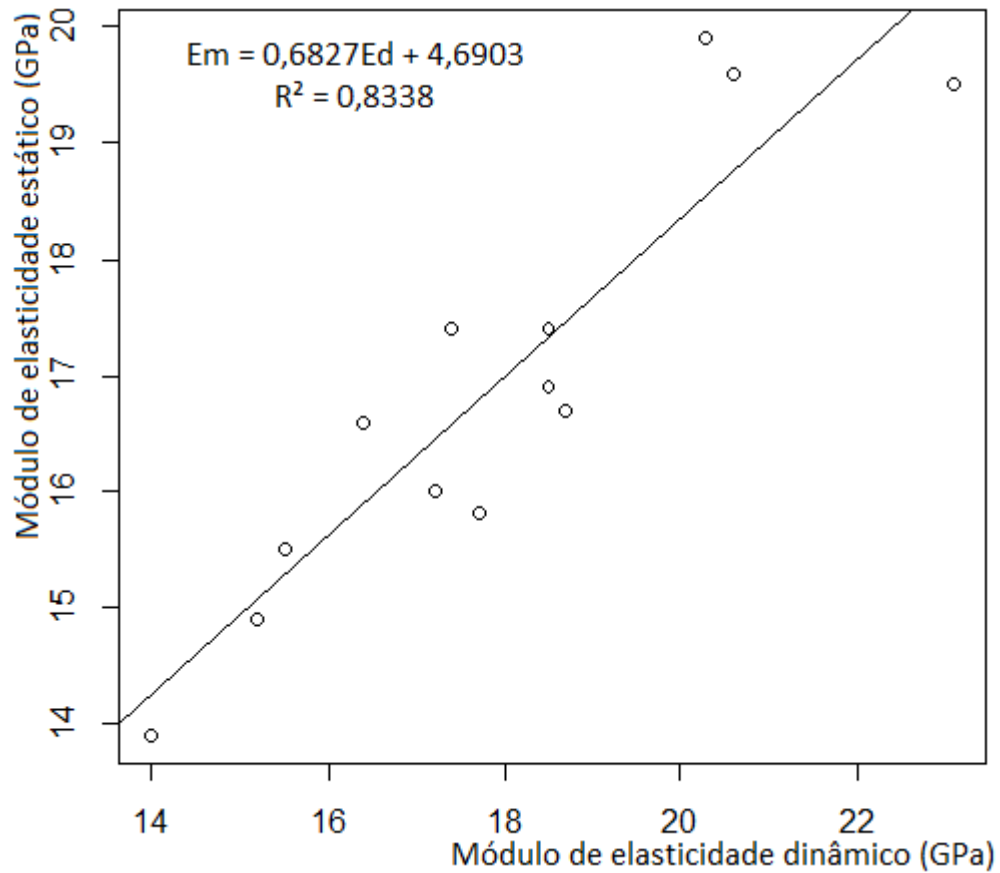
Foi realizada a análise de regressão, com nível de significância de 5%, para determinar se o módulo de elasticidade estático pode ser dado em função do módulo de elasticidade dinâmico, para cada uma das alturas.

Na análise de regressão para altura A obteve-se  $p$ -value igual a  $7,26 \times 10^{-8}$ , rejeitando a hipótese de que os dois não são dependentes, concluindo que o módulo de elasticidade estático depende e pode ser dado em função do módulo de elasticidade dinâmico. A Figura 19 demonstra a correlação.



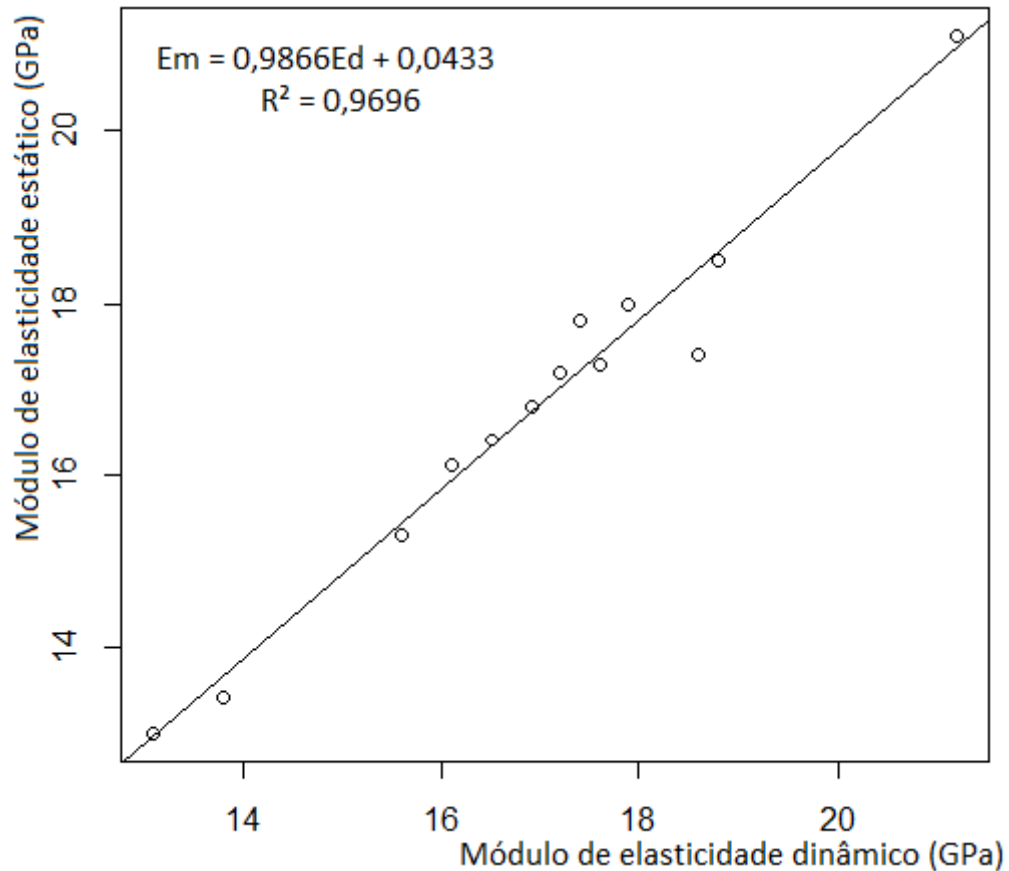
O valor de  $R^2$  de aproximadamente 0,92, e respectivo valor de  $R$  igual a 0,96, obtido entre os valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático para altura A é superior ao de 0,89 encontrado por Cossolino *et al.* (2009) para a espécie *Pinnus oocarpa*, de 0,89 encontrado por Segundinho *et al.* (2012) para *Eucalyptus sp.* e de 0,87 encontrado por Ballarin e Palma (2009) para a espécie *Eucalyptus grandis*, o que indica uma ótima correlação entre essas variáveis.

Na análise de regressão para altura B obteve-se  $p$ -value igual a  $1,31 \times 10^{-5}$ , mostrando que o módulo de elasticidade estático depende e pode ser dado em função do módulo de elasticidade dinâmico. A Figura 20 demonstra a correlação.

Figura 20 - Gráfico da correlação entre  $E_M$  e  $E_d$  – Altura B.

O valor de  $R^2$  de aproximadamente 0,83, e respectivo valor de  $R$  igual a 0,91, obtido entre os valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático para altura C é superior ao de 0,89 encontrado por Cossolino *et al.* (2009) para a espécie *Pinnus oocarpa*, de 0,89 encontrado por Segundinho *et al.* (2012) para *Eucalyptus sp.* e de 0,87 encontrado por Ballarin e Palma (2009) para a espécie *Eucalyptus grandis*. Apesar de estar abaixo dos valores encontrados por esses autores, o valor não está distante deles, está consideravelmente próximo.

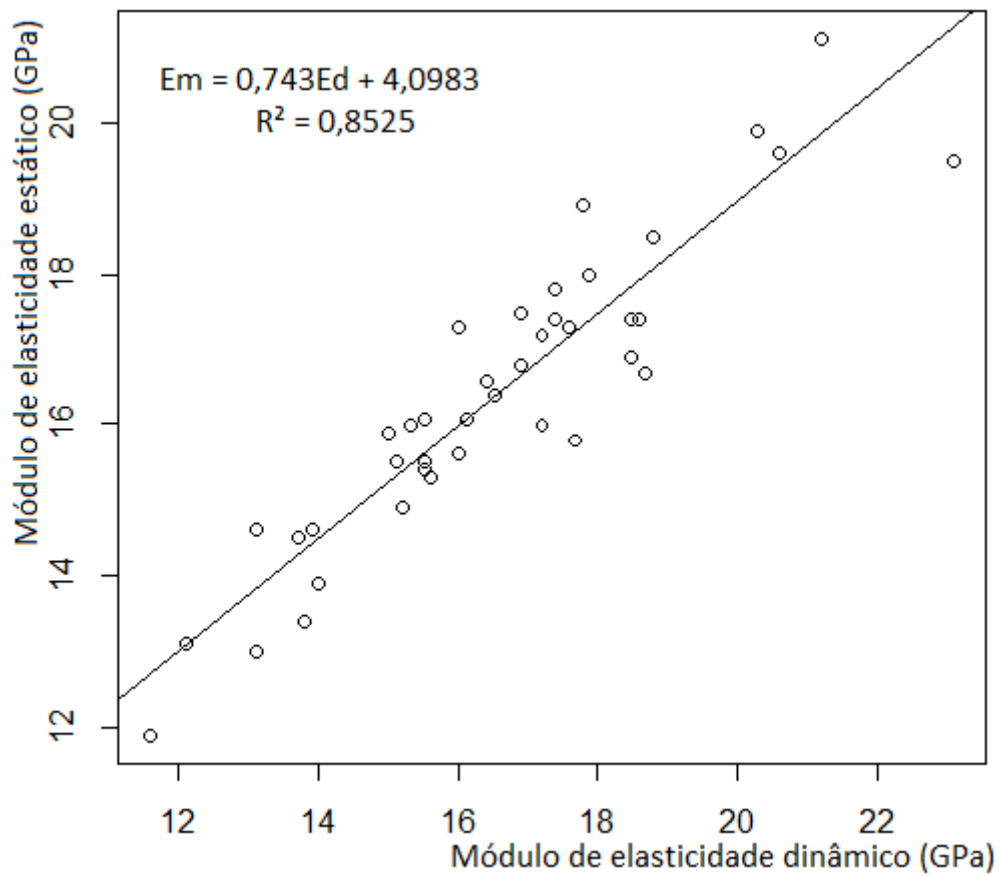
Na análise de regressão para altura C obteve-se  $p$ -value igual a  $1,08 \times 10^{-9}$ , mostrando que o módulo de elasticidade estático depende e pode ser dado em função do módulo de elasticidade dinâmico. A Figura 21 demonstra a correlação.

Figura 21 - Gráfico da correlação entre  $E_M$  e  $E_d$  – Altura C.

O valor de  $R^2$  de aproximadamente 0,97, e respectivo valor de R igual a 0,98, obtido entre os valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático para altura C foi superior ao de 0,89 encontrado por Cossolino *et al.* (2009) para a espécie *Pinnus oocarpa*, de 0,89 encontrado por Segundinho *et al.* (2012) para *Eucalyptus sp.* e de 0,87 encontrado por Ballarin e Palma (2009) para a espécie *Eucalyptus grandis*, o que indica uma ótima correlação entre essas variáveis.

Em seguida foi realizada a análise de regressão, com nível de significância de 5%, para determinar se o módulo de elasticidade estático pode ser dado em função do módulo de elasticidade dinâmico, para todas as alturas.

Na análise de regressão obteve-se *p-value* igual a  $2,2 \times 10^{-16}$ , concluindo que o módulo de elasticidade estático depende e pode ser dado em função do módulo de elasticidade dinâmico. A Figura 22 demonstra a correlação.

Figura 22 - Gráfico da correlação entre  $E_M$  e  $E_d$  para as três alturas.

O valor de  $R^2$  de aproximadamente 0,85 obtido entre a correlação dos valores dos módulos de elasticidade dinâmico e estático para todas as alturas foi próxima ao de 0,89 encontrado por Cossolino *et al.* (2009) para a espécie *Pinus oocarpa*, de 0,89 encontrado por Segundinho *et al.* (2012) para *Eucalyptus sp.* e de 0,87 encontrado por Ballarin e Palma (2009) para a espécie *Eucalyptus grandis*, o que indica uma ótima correlação entre essas variáveis.

## 6 CONCLUSÃO

O valor médio de 16,4 GPa encontrado para o módulo de elasticidade na flexão estática foram próximos aos citados em literatura para madeiras dessa espécie com mais de 10 anos, indicando que as mesmas apresentam potencial para utilização em estruturas.

O valor médio de 16,6 GPa encontrado para o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico, através da aplicação da TEI, foram próximos aos citados em literatura para madeiras dessa espécie com mais de 10 anos.

Os valores médios encontrados para módulo de elasticidade na flexão estática foram iguais a 14,8 GPa na altura A, 17,9 GPa na altura B e 17,0 GPa na altura C (3, 6 e 9 m), a partir da base, seguiram a mesma correlação estatística aos citados em literatura, onde conclui-se que existe uma tendência de aumento do módulo de elasticidade com o aumento da altura, mesmo que pequeno.

A equação de correlação entre  $E_M$  e  $E_d$  encontrada foi  $E_M = 0,743E_d + 4,0983$ , com respectivo coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,85$  valor este próximo aos citados em literatura.

Conclui-se que a Técnica de Excitação por Impulso é eficaz para a caracterização de rigidez da madeira *Eucalyptus grandis* de 10 anos, da região de Itapeva/SP, demonstrando ótimo custo/benefício e rapidez para classificação de peças e um incremento do valor agregado à madeira serrada.

Sugestões de trabalhos futuros: Realizar o estudo para madeiras de classes de resistência diferentes, madeira com variações em dimensões e diferentes espécies de madeira.

## 7 REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. N. **O eucalipto**. 2ª ed. Jundiaí: Companhia Paulista de Estradas de Ferro, 1961. p.667

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 1876/01-76**. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. United States, 1976.

ARAÚJO, H. J. B. **Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras**. Floresta, Curitiba, v.37, n. 3, set./dez. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12297**: madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento, para uso geral: medição e quantificação de defeitos. Rio de Janeiro, 1991. 6p

BALLARIN, Adriano W.; PALMA, Hernando A. L. Avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento com uso do método não destrutivo de vibração transversal. **Revista Madeira Arquitetura e Engenharia**, v.10, n.25, jul./dez. 2009. p. 5-14

BESSA, F. M. S. **Criação de uma xiloteca electrónica (e-xiloteca) tropical e sua utilização para identificação e caracterização de madeiras com fins científicos e econômicos**. Lisboa: Universidade técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, 2009. 368 p

CALIL JUNIOR, C., MINÁ, A. J. S. Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, 2003.

CALIL JUNIOR, C. *et al.* **Manual de projeto e construção de pontes de madeira**. São Carlos: LaMEM - Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira. 2006. 237p

COSSOLINO, Leiliane C.; PEREIRA, Antônio H. A.; ICIMOTO, Felipe H.; FERRO, Fabiane S.; SEGUNDINHO, Pedro G. A.; CALIL JÚNIOR, Carlito. Avaliação da coerência entre três métodos de determinação do módulo de elasticidade da madeira de *Pinnus Oocarpa*. **Revista Madeira Arquitetura e Engenharia**, v.10, n.25, jul./dez. 2009. p. 33-42

COSTA, A. **Coletâneas de anatomia da madeira**. 2001. Apostila, 42 p

FIGUEROA, M. J. M. **Coeficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura**. Florianópolis, 2012. 259 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

FINGER, C. A. G. *et al.* Produção de florestas de *Eucalyptus grandis* em segunda rotação, Conduzidas com um Broto por Touça e Submetidas a Interplântio. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.3, n.1, 1993.

GONÇALEZ, J. C. *et al.* Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. Visando ao seu Aproveitamento na Indústria Moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria v.16, n.3, 2006.

IWAKIRI, Setsuo; MATOS, Jorge L. M.; TRIANOSKI, Rosilani; PRATA, José. G.; ROCHA, Vinicus Y.; IWAKIRI, Viviane T. Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico nas diferentes posições do tronco das árvores de *Tectona grandis* utilizando método de ondas acústicas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.41, n.100, p. 523-532, dez. 2013.

LPF/IBAMA. Relatório. **Descrição anatômica de lenho de seis espécies de eucalipto**. Brasília: IBAMA, 1998. 13p.

MANGIERI, H. R.; DIMITRI, M. J. **Los eucaliptos en la silvicultura**. Buenos Aires: ACME, 1958. 213p.

MELO, J. E. **Sistemas estruturais em madeira**. Brasília: Universidade de Brasília, 158p. 2013.

MENDONZA, I. E. L. Experiência chilena em el utilization de eucalipto. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ-USP, 1995.

MORALES, E. A. M. **Técnicas de propagação de ondas na estimativa de propriedades mecânicas de painéis**. São Carlos, 2006. 94 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, F. G. R. *et al.* Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de ultrassom, PAN-AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING (PANNDT), 3., 2003, Rio de Janeiro.

SEGUNDINHO, P.G.A. *et al.* Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.6, p.1155-1161, 2012.

STANGERLIN, D. M. *et. al.* Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *peltophorum dubium*. **Revista Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 01, n. 02, 2010.