



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

VITOR AFONSO NEVES SILVA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DE
PEÇAS DE MADEIRA DE *Pinus elliottii* NA FREQUÊNCIA E
RIGIDEZ POR MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS DE ENSAIO

Itapeva – SP
2018

VITOR AFONSO NEVES SILVA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DE
PEÇAS DE MADEIRA DE *Pinus elliottii* NA FREQUÊNCIA E
RIGIDEZ POR MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS DE ENSAIO**

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 Industrial Madeireira.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elen Aparecida Martines Morales

Itapeva - SP
2018

S586a

Silva, Vitor Afonso Neves

Avaliação da influência da variação da geometria de peças de madeira de *Pinus elliottii* na frequência e rigidez por métodos não destrutivos de ensaio / Vitor Afonso Neves Silva. -- Itapeva, 2018
39 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de Itapeva, Itapeva

Orientadora: Elen Aparecida Martines Morales

1. Madeira – Propriedades mecânicas. 2. *Pinus elliottii*. 3. Testes não-destrutivos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

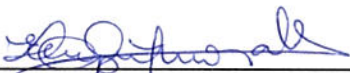
Essa ficha não pode ser modificada.

VITOR AFONSO NEVES SILVA

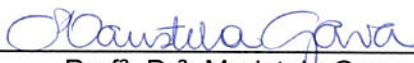
**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO NAS DIMENSÕES DE
PEÇAS DE MADEIRA DE PINUS ELLIOTTII EM PARÂMETROS DE
MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS DE ENSAIO**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: 
Profª. Drª. Elen Aparecida Martines Morales
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

2º Examinador: 
Profª. Drª. Juliana Cortez Barbosa
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

3º Examinador: 
Profª. Drª. Maristela Gava
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

Itapeva, 08 de junho de 2018.

Dedico este trabalho a minha mãe Sandra de Fatima Neves, ao meu Pai Jose da Silva Neto todo apoio e paciência que sempre demonstraram para que eu pudesse concluir essa fase importante na minha vida.

AGRADECIMENTOS

A minha Prof^a. Dr^a. Elen Aparecida Martines Morales pela orientação, amizade e apoio durante todo o planeamento e realização deste projeto.

As minhas amigas Cláudia Rodrigues de Oliveira e Iliane Rodrigues de Oliveira pela amizade, apoio e ajuda concedida durante realização deste trabalho.

Ao técnico Juliano Rodrigo de Brito, pelo suporte no laboratório durante a realização da pesquisa.

Ao Mauri Pedroso de Lima Junior, pelo intermédio na obtenção das madeiras doadas pela PS Madeiras.

A PROPe e Programa de Educação Tutorial (PET) - Prograd, pela concessão de bolsa de Iniciação Científica.

A CNPq, pelo recurso para a compra do equipamento de ensaio não destrutivo Sonelastic®.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram de forma positiva para a realização deste trabalho.

RESUMO

O estudo da caracterização mecânica da madeira é de fundamental importância para a utilização mais eficiente de espécies de reflorestamento em estruturas, frente a outros materiais cujas propriedades são largamente conhecidas, especialmente em uma época em que se processa madeira é uma prática sustentável. A Técnica de Excitação por Impulso (TEI) é um tipo de ensaio não destrutivo onde a peça sofre um impacto de curta duração que induz a uma resposta acústica composta por frequências naturais de vibração. A partir da técnica pode-se calcular o módulo de elasticidade dinâmico e tem sido usada com sucesso para a estimativa do módulo de elasticidade na flexão estática para a madeira. Este trabalho tem por objetivo geral avaliar a influência da variação nas dimensões de peças de madeira de *Pinus elliottii* em parâmetros do método não destrutivo de ensaio de excitação por impulso, para a pré-classificação das mesmas para utilização em estruturas. Concluiu-se que, para as amostras de *Pinus elliottii* utilizadas, o comprimento interfere significativamente na frequência obtida, o que não ocorre com as larguras. Para os corpos de prova de 115 x 5,0 x 5,0 cm os módulos de elasticidade dinâmicos (E_d), obtidos através do ensaio de excitação por impulso, não diferiram estatisticamente dos obtidos através do ensaio destrutivo de flexão estática (E_M), o que também ocorreu com os módulos de elasticidade dinâmicos (E_d) relacionados aos corpos de prova de 45 x 5,0 x 2,5 cm em relação aos módulos de elasticidade na tração paralela às fibras (E_{t0}), demonstrando a eficácia da TEI na avaliação das peças de *Pinus elliottii* utilizadas.

Palavras-chave: *Pinus elliottii*. Excitação por Impulso. Flexão Estática. Tração Paralela às Fibras.

ABSTRACT

The study of the mechanical characterization of wood is of fundamental importance for a more efficient use of reforestation species in structures, compared to other materials and the properties are widely known, especially in a time when wood is a sustainable practice. The Impulse Excitation Technique (TEI) is a type of non-destructive test where the impact force is induced by an acoustic sequence through natural frequencies of vibration, from which the dynamic modulus of elasticity can be constructed the handheld to success in the modula of elasticity in the static bending to the wood. This work has the general objective of evaluating the influence of the variation in the dimensions of pieces of wood of *Pinus elliottii* in parameters of the non destructive method of impulse excitation test, for the pre-classification of the same ones for use in structures. It was concluded that, for the samples of *Pinus elliottii* used, the length interferes significantly in the frequency obtained, which does not occur with the widths. For the test specimens of 115 x 5.0 x 5.0 cm the dynamic elastic moduli (E_d), obtained by the impulse excitation test, did not differ statistically from those obtained by the destructive static bending test (E_M), which also occurred with the dynamic elastic moduli (E_d) related to the test specimens of 45 x 5.0 x 2.5 cm in relation to the modulus of elasticity in the traction parallel to the fibers (E_{t0}), demonstrating the effectiveness of TEI in evaluation of the pieces of *Pinus elliottii* used.

Keywords: *Pinus elliottii*. Impulse Excitation. Static Bending. Traction Parallel to Fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de confecção de corpos de prova	22
Figura 2. Confecção de corpos de prova para TEI (I).	22
Figura 3. Confecção de corpos de prova tração paralela às fibras (E_{t0}).....	23
Figura 4. Confecção de corpos de prova para flexão estática (II).	23
Figura 5. Confecção de corpos de prova para flexão estática (II).	24
Figura 6. Ensaio não destrutivo de excitação por impulso (TEI).	24
Figura 7. Ensaio destrutivos de flexão estática (a) e tração paralela às fibras(b)...	25
Figura 8. Defeito que diminuiu o comprimento do CP2.....	27
Figura 9. Análise de Regressão Polinomial - Frequência x Comprimento.....	29
Figura 10. Gráfico caixa para comparação das médias entre E_d e E_{t0}	30
Figura 11. Análise de regressão linear entre E_d e E_{t0}	31
Figura 12. Análise de regressão linear, Frequência x Largura.	32
Figura 13. Corpo de prova 26 e 27.....	33
Figura 14. Gráfico da comparação das médias entre E_d e E_M	34
Figura 15. Análise de regressão linear entre E_d e E_M	34
Figura 16: Defeitos visuais nos corpos de prova 19.....	34
Figura 17. Análise de regressão linear entre E_d e E_M sem o CP19.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Média do Módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e frequência (F) das peças nas dimensões 300 x 20,0 x 5,0 cm... ..	26
Tabela 2. Média de E_d e F das peças nas dimensões 300 x 5,0 x 5,0 cm.	26
Tabela 3. Média de E_d e F das peças nas dimensões 300 x 5,0 x 2,5 cm... ..	27
Tabela 4. Média de E_d e F para as peças de dimensões 250 x 5,0 x 2,5 cm.	27
Tabela 5. Média de E_d e F para as peças de dimensões 200 x 5,0 x 2,5 cm.	28
Tabela 6. Média de E_d e F para as peças de dimensões 150 x 5,0 x 2,5 cm.	28
Tabela 7. Média de E_d e F para as peças de dimensões 100 x 5,0 x 2,5 cm... ..	28
Tabela 8. Média de E_d e F para as peças de dimensões 45 x 5,0 x 2,5 cm... ..	28
Tabela 9. Média do Módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e na tração paralela às fibras (E_{t0}).....	29
Tabela 10. Média de E_d e F para as peças de dimensões 300 x 10 x 5,0 cm... ..	31
Tabela 11. Média de E_d e F para as peças de dimensões 300 x 5,0 x 5,0 cm.....	32
Tabela 12. Média do Módulos de elasticidade dinâmico (E_d) e na flexão estática (E_M).	33

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Relação entre Frequência e Comprimento.....	28
Equação 2. Relação entre E_d e E_{t0}	31
Equação 3. Relação entre E_d e E_M	34
Equação 3. Relação entre E_d e E_M	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Madeiras de reflorestamento	14
3.2	Técnicas de ensaios não destrutivos	15
3.2.1	Técnica de Excitação por Impulso (TEI)	16
3.3	Caracterização mecânica da madeira	16
3.3.1	Caracterização da madeira por métodos não destrutivos	17
3.3.2	Caracterização da madeira pela Técnica de Excitação por Impulso	19
4	MATERIAL E MÉTODO	21
4.1	Material	21
4.2	Método	21
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6	CONCLUSÕES	36
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material anisotrópico apresentando propriedades mecânicas distintas de acordo com a direção de suas fibras. Devido a essa variabilidade diversos estudos tanto destrutivos quanto não destrutivos têm sido realizados para verificação das suas propriedades mecânicas.

O estudo da caracterização mecânica da madeira é de fundamental importância para a utilização mais eficiente das espécies de reflorestamento em estruturas, buscando a máxima eficiência de cada peça a ser utilizada, aumentando assim o valor agregado dessa matéria-prima.

Os ensaios destrutivos consistem em uma força aplicada sobre a peça até sua ruptura, tornando-a inutilizável. Para que esses testes sejam realizados com precisão demanda-se um investimento financeiro elevado, como a utilização de máquinas, que necessitam de pessoal com treinamento adequado e uma manutenção periódica.

Para realização dos ensaios não destrutivos demanda-se menor investimento financeiro, técnico e em equipamentos, propiciando que as peças sejam reutilizadas, mantendo suas propriedades mecânicas e não comprometendo suas aplicações. Isso permite, por exemplo, testar vigas de serviço de estruturas, o que consiste em um facilitador para a construção civil e produtores de componentes de madeira que poderiam vender suas peças com maior confiabilidade e possivelmente mais lucro.

O Ensaio de Excitação por Impulso (TEI) é um tipo de ensaio não destrutivo onde um impacto de curta duração é realizado no corpo de prova, o qual induz uma resposta acústica composta por frequências que são geradas pela vibração da peça, a partir das quais pode ser calculado o módulo de elasticidade dinâmico.

Paralelamente, o Pinus é uma espécie que faz parte de vários processos produtivos, possuindo diversas aplicações, como: produção de celulose e papel, produção de painéis utilizados na construção civil e mobiliário, ressaltando-se que, em outros países sua aplicação também se destaca na construção civil, em técnicas construtivas como wood frame e, no Brasil, em estruturas.

Dada a necessidade de novos estudos sobre as propriedades físico-mecânicas da madeira, especificamente para utilização em estruturas, a possível

praticidade e acessibilidade aos produtores de madeira na utilização de técnicas de ensaio não destrutivas, em especial para madeiras de reflorestamento, justifica-se a realização do presente trabalho utilizando madeira da espécie *Pinus elliottii* e o método de ensaio não destrutivo de Excitação por Impulso.

Destaca-se que com este estudo pretende-se gerar informações para a classificação da madeira de *Pinus elliottii*, o que é de interesse das empresas do setor em especial da região de Itapeva/SP, auxiliando assim o consequente aumento do valor agregado desse material e no desenvolvimento regional.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar a influência da variação nas dimensões de peças de madeira de *Pinus elliottii* na frequência e rigidez por método não destrutivo de ensaio de excitação por impulso, para a pré-classificação das mesmas para utilização em estruturas.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Avaliar a influência da variação nas dimensões de peças em relação a largura e comprimento da madeira de *Pinus elliottii* na frequência natural de vibração obtida no método não destrutivo de ensaio de excitação por impulso;
- Comparar os módulos de elasticidade longitudinais da madeira de *Pinus elliottii* obtidos nos ensaios de flexão estática e tração paralela às fibras através da aplicação do método destrutivo convencional, ao obtido no método não destrutivo de excitação por impulso;
- Indicar equações de vibração da madeira da espécie de reflorestamento *Pinus elliottii* para várias dimensões das peças em relação a sua largura e comprimento, para contribuir com a classificação mecânica mais prática desse material.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Madeiras de reflorestamento

A palavra *Pinus* tem origem do latim “Pinu”, que é popularmente conhecido como Pinheiro em português e possui mais de 100 espécies. Teve sua origem nas regiões árticas e sub-árticas da Europa, Ásia, América Central e América do Norte. Apesar de ter sido introduzido no Brasil para fins ornamentais, o mesmo é utilizado em diversas aplicações há mais de um século (SHIMIZU, 2008).

O Brasil é um país que apresenta ótimas condições como solo e clima que se mostram adequados para o cultivo de florestas dessa espécie. As espécies exóticas plantadas no Brasil possuem um crescimento exponencial se comparadas ao crescimento das espécies nativas brasileiras, com destaque para o *Eucalipto* e o *Pinus*, possuindo ambos os gêneros ciclos de silvicultura entre 6 e 7 anos, sendo que em seus países de origem apresentam ciclos entre 60 e 80 anos.

O *Pinus* é um gênero de cadeia produtiva importante no Brasil, destacando-se seu cultivo na Região Sul, onde o clima lhe é mais favorável. Sua madeira é utilizada na produção de papel e celulose, na produção de chapas e painéis, que são utilizados na construção civil e na indústria moveleira. Ainda pode-se extrair do mesmo a resina, um produto que possui um mercado externo muito lucrativo e promissor, assim como o breu e a terebintina que dela derivam (SHIMIZU, 2008).

Os dados obtidos em um monitoramento de florestas plantadas entre 2000 e 2001, com espécies exóticas de reflorestamento com rápido índice de crescimento (*Pinus* e *Eucalipto*), indicaram que essas estão concentradas no estado de São Paulo. Nesse período, na Região Administrativa de Sorocaba, à qual pertencia a cidade de Itapeva e de suas adjacências, as áreas de plantio de *Eucalyptus sp* e de *Pinus sp* foram respectivamente iguais a 233.406 ha e 92.664 ha, constituíram os dois maiores plantios dentre todas as outras Áreas Reflorestadas no Estado de São Paulo. Consequentemente, tal município e região apresentam muitas serrarias que beneficiam e comercializam madeira de *Pinus* e *Eucalipto* com potencial de utilização em estruturas (KRONKA *et al.* 2005).

Dentre as madeiras de reflorestamento, o *Pinus sp* está sendo cada vez menos valorizado perante as indústrias do setor madeireiro no Brasil. Em florestas naturais torna-se possível encontrar essa espécie com grandes diâmetros, mas para produção rápida adotam-se diâmetros menores e ciclos de crescimento menores, obtendo grande parte dessa madeira como juvenil. Esse crescimento tem gerado

muitos pontos de estudos, um deles é que a madeira juvenil afeta drasticamente os módulos de elasticidade, podendo comprometer muito sua resistência mecânica e características físicas (BALLARIN, 2005).

Como a busca por um desenvolvimento sustentável é um dos alicerces para a sociedade, mostra-se como tendência crescente a utilização de matérias-primas renováveis, como a madeira, devido à tendência da plantação de florestas ou regeneração de florestas. Isso contribui com uma maior qualidade da matéria-prima disponível, pois a madeira em ciclos de crescimento menores não conta com a presença de nós, fendas e empenamentos, sendo possível diminuir o tempo de rotação dessa cultura, entre 6 e 10 anos. Para que isso seja possível cada região deve conhecer o melhor caminho para alcançar esse objetivo (PONCE, 1995).

3.2 Técnicas de ensaios não destrutivos

Cada vez mais tem sido importante a caracterização das propriedades mecânicas da madeira, feita comumente por ensaios destrutivos, que demandam a confecção específica de cada corpo de prova que serão inutilizados, que não propiciam a classificação específica de todo o lote de madeira e, às vezes, a presença de várias variáveis indesejáveis, como amostragem inadequada, confecção dos corpos de prova de regiões mais favoráveis, sem defeitos, o que não é tão apropriado para a área de estruturas. Já a caracterização por métodos não destrutivos mostra-se mais eficaz, sem a necessidade da confecção de corpos de prova específicos e até mesmo possibilitando a utilização das peças após seu ensaio (ROSS *et al.*, 1998).

Os métodos não destrutivos de ensaio consistem na avaliação do material sem que suas propriedades mecânicas e físicas sejam alteradas e fornecem informações adequadas para melhor aplicação e obtenção do melhor desempenho dos materiais (ROSS e PELLERIN, 1994).

Com a busca pela otimização do tempo de trabalho e do desperdício de matéria prima, os estudos sobre técnicas de ensaios não destrutivos vêm crescendo devido a sua praticidade e rapidez de operação, a serem equipamentos portáteis e por manterem as características mecânicas do material intactas, proporcionando assim a avaliação das peças antes de sua aplicação, por exemplo, em vigas.

Os testes não destrutivos proporcionam a determinação do módulo de elasticidade longitudinal. Podem ser citados a classificação visual (que é um dos mais amplamente utilizados), testes químicos (para detectar defeitos biológicos), “stress

wave”, ultrassom, método de deflexão, teste de propriedades elétricas, radiações gama, penetração de radiação e método de raio-x sendo os mais usualmente utilizados para madeira e seus derivados o “stress wave” e o ultrassom (BODIG, 2001).

Os estudos sobre métodos não destrutivos estão se tornando muito relevantes para o setor madeireiro nacional, em especial os ensaios não destrutivos de vibração transversal e avaliação da frequência longitudinal, retornando respostas rápidas e apresentando correlações lineares satisfatórias (em média em ordem de R^2 igual a 0,80). A popularização desses ensaios tem feito o valor desses equipamentos diminuir ainda mais (SEGUNDINHO *et al.*, 2012).

3.2.1 Técnica de Excitação por Impulso (TEI)

BRASHAW *et al.* (2009) citam que o campo de NDT e NDE está em constante evolução, especialmente na área de madeira e de materiais à base de fibras. Dentre as técnicas não destrutivas, COSSOLINO *et al.* (2009) argumentam que recentemente tem-se usado a Técnica de Excitação por Impulso (*Impulse Excitation Technique* - TEI).

Essa técnica utiliza a frequência natural do material, o que possibilita a obtenção de seu módulo de elasticidade longitudinal e é realizado através de um impacto mecânico na peça que retorna uma resposta acústica captada pelo microfone. O documento normativo ASTM E 1876/01-76 indica os procedimentos para se obter o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e também a obtenção da frequência (H_z).

As frequências comumente utilizadas em métodos acústicos para estudos de madeiras são abaixo de 20 kHz. O estado de equilíbrio ou de excitação passageira (impacto) pode ser usado para testes dinâmicos de vibração por ressonância quando os módulos elásticos são determinados (BUCUR, 2010).

3.3 Caracterização mecânica da madeira

O estudo de propriedades de madeiras, principalmente mecânicas, tem sido desenvolvido nacionalmente por vários pesquisadores, com predominância para espécies de reflorestamento (Pinus e Eucalipto) e em relação às mais diversas características tais como a análise da madeira de lenho juvenil e adulto (BALLARIN e PALMA, 2003), diversas idades e posições diferenciadas nas toras (OLIVEIRA *et al.*, 2006), espécies diferentes (BORTOLETTO Jr., 2008), a qualidade de madeiras comercializadas (OLIVEIRA, 2008), madeiras de uma mesma espécie com

procedências variadas (BALBINOT, 2009) e a utilização de métodos não destrutivos alternativos (TRIANOSKI, 2012).

3.3.1 Caracterização da madeira por métodos não destrutivos

Trabalhos têm sido conduzidos com a utilização de métodos não destrutivos para a caracterização mecânica de madeiras de reflorestamento como, dentre outros, a análise da madeira de tecido juvenil e adulto (BALLARIN e NOGUEIRA, 2009), o efeito da geometria do corpo de prova (OLIVEIRA *et al.*, 2006), da densidade e umidade (CALEGARI, GATTO e STANGERLIN, 2011), da estimativa de módulo de elasticidade (BATISTA, 2012), de predição de propriedades tecnológicas da madeira de espécies de reflorestamento (RIBEIRO *et al.*, 2013) e avaliação da qualidade da madeira para produtos sólidos (GONÇALVES, 2006) pelo método de ultrassom. Para a avaliação através da técnica de excitação por impulso podem ser citadas a avaliação do módulo de elasticidade na flexão estática (BALLARIN e LARA PALMA, 2009), ou de análises de propriedades de madeiras e comparação da utilização de dois tipos de ensaios não destrutivos (CHIU, LIN e YANG, 2013).

Baldasino (1996) utilizou o Resistograph®, um equipamento que mede a resistência da madeira efetuando a penetração de uma haste, madeira da espécie *Castanea Sativa*, provenientes de vigas com cerca de 100 anos de idade, comparando posteriormente aos resultados obtidos nos ensaios destrutivos de flexão estática, tração e compressão paralela às fibras. Nos ensaios destrutivos de tração e compressão encontrou respectivamente os valores de módulos de elasticidade iguais a 8,3 GPa e 13,7 GPa (CV = 11%), já para os módulos de elasticidade dinâmicos longitudinal na tração e compressão, valores iguais a 12,9 GPa (CV = 12%) e 13,0 GPa (CV = 16%), respectivamente nessas solicitações, concluindo que os valores obtidos nos dois métodos são estatisticamente equivalentes.

Ross *et al.* (1991) utilizaram a técnica de vibração transversal para verificar a correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico da madeira da espécie Spruce Pine Fir, em peças com comprimento de 2,7 m, ao módulo de elasticidade de flexão estática e obtiveram $R^2 = 0,99$.

Chui *et al.* (1999) avaliaram postes de madeira de *Red Pine*, com comprimento de 7,6 m e diâmetro com 26 cm, com métodos de ensaios não destrutivos, onde as toras ficaram suspensas por molas para que o impacto gerado pela batida fosse absorvido. Adotaram o modelo de *Bernoulli*, levando em conta o

formato cônico das toras, determinando os módulos de elasticidade na flexão estática e dinâmico, que apresentaram a correlação de $R^2 = 0,85$. Assim, o método de ensaio proposto forneceu resultados com precisão satisfatória para obtenção do módulo de elasticidade estático.

Avaliando a correlação entre os módulos de elasticidade na flexão estática e dinâmico pela técnica de vibração transversal, da madeira de *Pinus sp* possuindo dimensões de nominais de 3,5 cm x 12,5 cm x 2,6 m, para finalidade estrutural, obtiveram $R^2 = 0,98$. Concluíram que a técnica utilizada apresenta um nível de confiabilidade elevado, possibilitando-se avaliar através do mesmo a rigidez à flexão de madeira (CARREIRA *et al.*, 2003).

No estudo de peças estruturais de *Southern pine*, com dimensões de 3,81 cm x 13,97 cm x 3,02 m, a 12% de umidade, utilizou-se o ensaio de vibração transversal com o aparelho *E-computer*. Após o ensaio não destrutivo dinâmico e o destrutivo de flexão estática os módulos de elasticidade, obteve-se $R^2 = 0,98$ na análise de correlação (CALIL JÚNIOR e MINÁ, 2003).

Green *et al.*, (2004) utilizando o teste de vibração transversal e posteriormente o ensaio destrutivo de flexão estática para a classificação de 120 toras com comprimento de 4,9 m e diâmetros de 23,0 cm, após serem usinadas para terem os diâmetros uniformizados, da madeira das espécies *Lodgepole pine (Pinus contorta)* e *Subalpine fir (Albies lasiocarpa)*, obtiveram uma correlação de $R^2 = 0,95$ entre os módulos de elasticidade dos dois métodos.

Ballarin (2005), para a determinação do módulo de elasticidade na compressão paralela da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda L.* utilizou madeira de 6 árvores, com 34 anos de idade, provenientes do plantio da Estação Experimental, localizada em Sorocaba– SP, com corpos de prova de dimensões nominais de 4 cm x 4 cm x 45 cm retirados de pranchas de regiões onde se encontram o lenho juvenil e lenho tardio, a um teor de umidade de 12%. Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de ultrassom e posteriormente ao ensaio destrutivo de compressão paralela, obtendo-se um $R^2 = 0,90$.

Em estudos realizados para verificação das propriedades mecânicas e físicas da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea*, utilizando a técnica não destrutiva de ultrassom, Ribeiro *et al.* (2013) concluíram que as propriedades que tiveram melhor correlação foram densidade, módulo de elasticidade e módulo de ruptura, respectivamente.

A técnica não destrutiva de velocimetria por imagens de partículas (PIV) foi utilizada para obter o módulo de elasticidade na flexão para espécies *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis*, utilizados para confecção de painéis como LVL (*Laminated Vanner Lumber*), compensado e OSB (*Oriented Strand Board*). Os módulos de elasticidade obtidos pela técnica PIV e flexão estática mostraram equivalência estatística. Os valores médios de módulo de elasticidade através do método convencional e pela técnica PIV foram, respectivamente, iguais a 13,1 GPa e 13,0 GPa para o *Eucalyptus grandis*, 6,2 e 6,4 GPa para o *Pinus oocarpa*, 10,5 e 11,1 GPa para o compensado, 8,7 e 10,3 GPa para o LVL e 2,5 e 2,9 GPa para o OSB, mostrando que a técnica de PIV pode ser aplicada sem grande variabilidade (PEREIRA, 2017).

Durante o processo de secagem da madeira, o módulo de elasticidade não apresenta mudanças significativas, salvo quando a madeira atinge o ponto de saturação das fibras. Estudando a influência do teor no módulo de elasticidade de vigas de *Pinus* sp com dimensões de 5 cm x 10 cm x 200 cm, utilizando o método de ensaio de vibração transversal, abaixo e acima do ponto de saturação das fibras, Segundinho (2017) chegou ao resultado de que o teor de umidade não implica em alteração significativa no módulo de elasticidade, quando o teor de umidade varia entre 25,42% e 36,95%. Concluiu-se que mesmo com a umidade acima do ponto de saturação das fibras as ondas de vibração conseguem percorrer toda a viga, permitindo-se verificar o módulo de elasticidade de madeiras com teores de umidade mais elevados.

3.3.2 Caracterização da madeira pela Técnica de Excitação por Impulso

Em um trabalho sobre a madeira da espécie *Pinus oocarpa*, considerando os corpos de prova com as dimensões nominais de 4 x 24 x 200 cm e de 4 x 24 x 300 cm e utilizando a técnica de ensaio de excitação por impulso foi verificado que possíveis variações durante a condução do ensaio poderiam influenciar os resultados significativamente. Assim foram realizados também os ensaios variando dois tipos de apoios para as peças obtendo-se para os ensaios de vibração longitudinal as frequências médias de 968,4 Hz e 968,8 Hz e a frequência média de 968,5 Hz com a realização os ensaios sem a presença de apoios. Concluiu-se que as diferenças obtidas entre as médias não foram significativas com $R^2 = 0,89$, o que invalidou a hipótese de que os apoios utilizados nos pontos nodais fariam real diferença nos resultados obtidos (COSSOLINO e PEREIRA, 2009). Mesmo variando a distância

entre os apoios obtiveram resultados bem coerentes quando realizaram o ensaio nos modos flexional, torcional e longitudinal, com um $R^2 = 0,90$ e uma frequência média de 968,4 Hz SEGUNDINHO e COSSOLINO, 2012).

Em estudos realizados com madeira da espécie *Pinnus oocarpa*, utilizando a Técnica de Excitação por Impulso, obteve-se o valor $R^2 = 0,89$ na correlação dos módulos de elasticidade dinâmico e estático para corpos de prova de 115 x 5,0 x 5,0 cm teor de umidade igual a 12%. Isso não ocorreu para um teor de umidade igual a 54%, sendo que diferiram estatisticamente, o que revelou a impossibilidade de aplicação dessa técnica, a princípio, em caso de teores de umidade muito elevados (COSSOLINO *et al.*, 2009).

Ballarin e Palma (2009) utilizaram o equipamento *Beam Identification by Nondestructive Grading* (BING) para verificar as frequências de vibração transversal da madeira da espécie *Pinus taeda L.*, com árvores de idade de 21 anos, com corpos de prova nas dimensões nominais de 2 cm x 2 cm x 46 cm. Obtiveram para o módulo de elasticidade dinâmico o valor médio de 18,7 GPa, já para o módulo de elasticidade na flexão estática, o valor médio de 16,7 MPa, assim gerando um coeficiente de correlação pela análise de regressão linear de $R^2 = 0,98$.

A madeira de *Eucalyptus sp.* e de *Pinus oocarpa* foi avaliada por Segundinho *et al.* (2012) utilizando a Técnica de Excitação por Impulso, no modo longitudinal, e na flexão estática, e obtiveram o valor $R^2 = 0,91$ entre os módulos de elasticidade dinâmico (17,8 GPa) e estático.

Dadas as considerações anteriores, foram encontrados poucos trabalhos que foram conduzidos sobre a caracterização da rigidez da madeira utilizando a técnica de excitação por impulso. Este trabalho tem por objetivo geral avaliar a influência da variação nas dimensões de peças de madeira de *Pinus elliottii* em parâmetros de método não destrutivo de ensaio de excitação por impulso, para a pré-classificação das mesmas para utilização em estruturas.

4 MATERIAL E MÉTODO

4.1 Material

Para execução do trabalho foram utilizados:

- Máquina Universal de Ensaios EMIC, com capacidade de 30 toneladas e acessórios;
 - Máquinas para o beneficiamento da madeira e confecção dos corpos de prova;
 - Balança digital;
 - Paquímetro digital;
 - Medidor de umidade digital;
 - Computador e softwares disponíveis no Campus Experimental de Itapeva;
- Equipamento Sonelastic® Tecnologia Stand Alone, com suplemento PC Based;
- Madeira da espécie *Pinus elliottii*.

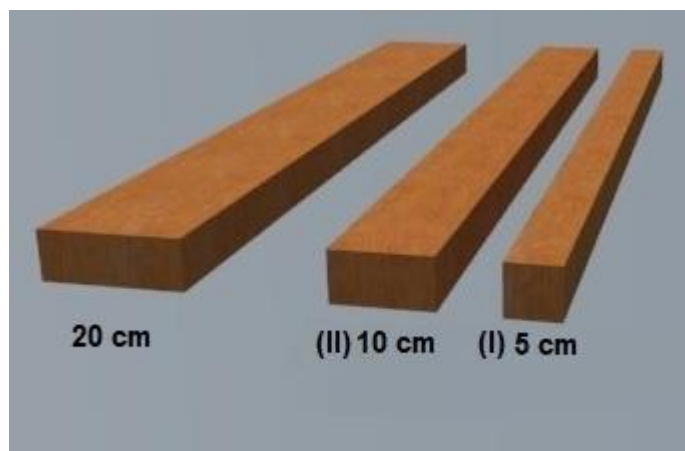
4.2 Método

O trabalho foi realizado no Campus Experimental de Itapeva, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Itapeva,

Após o processo de secagem ao ar livre foram utilizadas 7 pranchas comerciais de madeira de *Pinus elliottii*, nas dimensões nominais iniciais iguais a 3,0 m de comprimento nominal x 20,0 cm de largura x 5,0 cm de espessura. A princípio foram medidos os seus teores de umidade utilizando o medidor digital e as mesmas foram submetidas ao ensaio não destrutivo de excitação por impulso, que foi conduzido através da utilização do equipamento Sonelastic® Tecnologia PC Based, para determinação do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico e de sua frequência (Hz).

Em continuidade, as pranchas foram seccionadas longitudinalmente nas larguras nominais de 5,0 cm (I) e 10,0 cm (II), seguindo as medidas das larguras de pranchas comumente comercializadas, como mostrado na Figura 1.

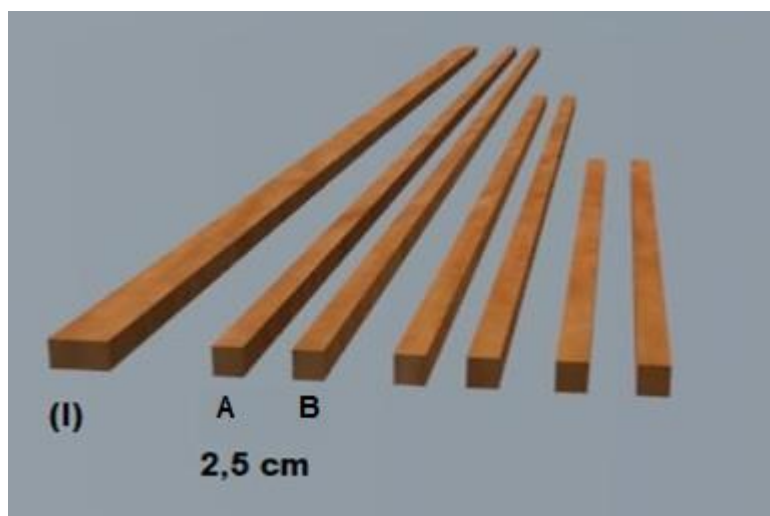
Figura 1: Esquema de corte das pranchas.



Fonte: Próprio autor (2018)

As peças I foram seccionadas em duas de 2,5 cm de espessura (A e B), dimensão usual comercialmente, num total de 14 peças, e sucessivamente tiveram seus comprimentos diminuídos de 50 cm até chegarem no comprimento, largura e espessura nominais de 45 cm x 5 cm x 2,5 cm, medidas dos corpos de prova de tração paralela às fibras (Figura 2). Desde o comprimento inicial aos obtidos em cada seccionamento, as peças foram submetidas primeiramente ao ensaio não destrutivo de Excitação por Impulso para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal e posterior comparação ao obtido no ensaio de tração paralela às fibras.

Figura 2: Confeccção de corpos de prova para aplicação da TEI (I).



Fonte: Próprio autor (2018)

Foram confeccionados 14 corpos de prova para o ensaio de tração paralela às fibras, como mostrado na Figura 3, para a determinação do módulo de elasticidade.

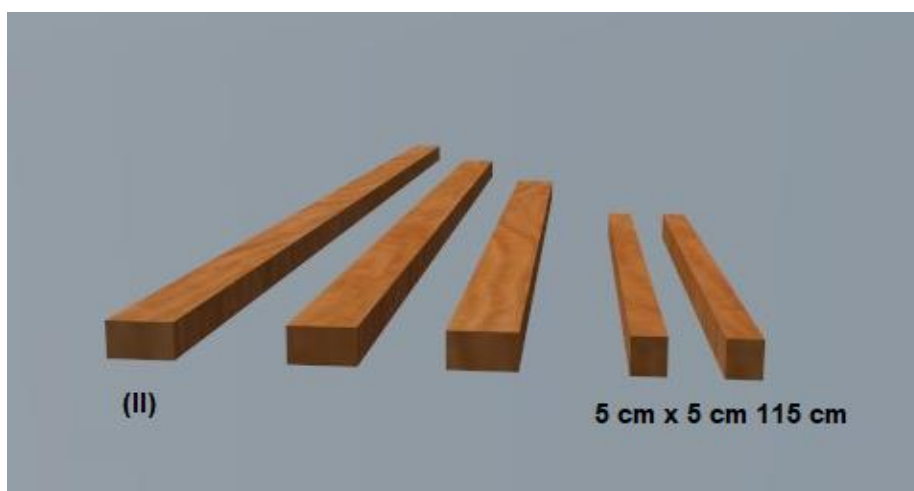
Figura 3: Confeção de corpos de prova tração paralela às fibras (I).



Fonte: Próprio autor (2018)

As peças II, mantidas suas larguras e espessuras, tiveram seus comprimentos diminuídos de 50,0 em 50,0 cm, até atingirem 250,0 cm, baseando-se no comprimento comercial de pranchas de madeira, quando também foram seccionadas na direção do comprimento em duas peças de espessura de 5,0 cm (A e B), como se pode observar na Figura 4, totalizando 14 corpos de prova de flexão estática (Figura 5).

Figura 4: Confeção de corpos de prova para aplicação da TEI (II).



Fonte: Próprio autor (2018)

Ressalta-se que inicialmente foram realizados ensaios prévios seccionando-se os comprimentos de 20,0 em 20,0 cm, porém só foi notada diferença significativa nas medições com o equipamento não destrutivo quando as peças foram seccionadas de 50,0 em 50,0 cm.

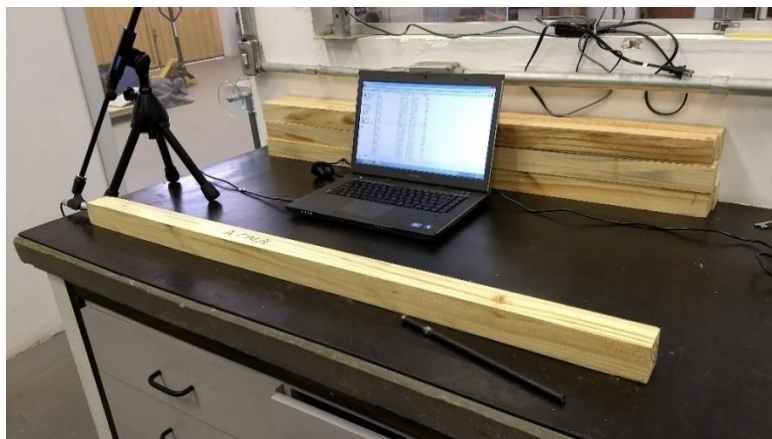
Figura 5: Confeção de corpos de prova para flexão estática (II).



Fonte: Próprio autor (2018)

Após cada um dos seccionamentos as peças foram submetidas ao ensaio não destrutivo de excitação por impulso (Figura 6), para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal e posterior comparação ao obtido no método de flexão estática, de acordo com as prescrições do documento normativo ASTM E 1876/01-76.

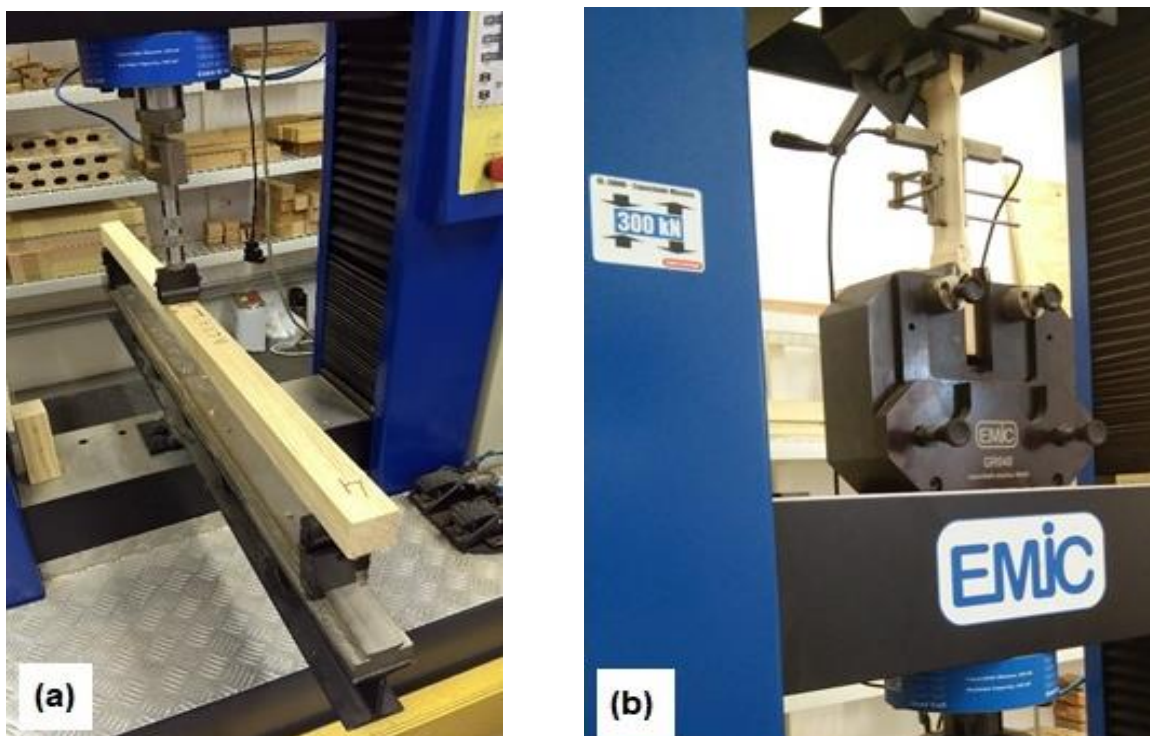
Figura 6: Ensaio não destrutivo de excitação por impulso (TEI).



Fonte: Próprio autor (2018)

Em prosseguimento foram realizados os ensaios destrutivos de flexão estática e tração paralela às fibras para a determinação, respectivamente, dos módulos de elasticidade na flexão (E_{m0}) e na tração paralela às fibras (E_{t0}), que foram conduzidos de acordo com as prescrições normativas da ABNT: NBR 7190/97, como mostrado na Figura 7a e 7b.

Figura 7: Ensaios destrutivos de flexão estática (a) e tração paralela às fibras(b).



Fonte: Próprio autor (2018)

Os resultados encontrados foram processados em relação a dados descritivos e passaram por tratamento estatístico, utilizando software estatístico R, pela análise de regressão linear e teste t, com intervalo de confiança de 95%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram medidos os teores de umidade de cada uma das 7 pranchas de madeira de *Pinus elliottii*, obtendo-se o teor de umidade de 12% para cada uma delas, em seguida efetuou-se a medição de seu comprimento, largura e espessura, obtendo respectivamente as medidas 300 cm x 20 cm x 5,0 cm.

Em seguida as mesmas foram submetidas ao ensaio não destrutivo de excitação por impulso (TEI), retornando o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e a frequência (F), e a média, desvios padrão (DP) e coeficientes de variação (CV) dos dados obtidos estão na Tabela 1.

Tabela 1: Média do Módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e frequência (F) das peças nas dimensões 300 x 20,0 x 5,0 cm.

	E_d (GPa)	F (Hz)
Média	10,4	650,8
DP	1,1	29,2
CV	10,6	4,5

Cossolino e Pereira (2009), utilizando Sonelastic® com corpos de prova com as dimensões de 4 x 24 x 200 cm e 4 x 24 x 300 cm, da espécie de *Pinnus oocarpa*, obtiveram as frequências médias de 968,4 Hz e 968,8 Hz.

Os valores médios dos módulos de elasticidade dinâmico (E_d) e das frequências (F) das peças II (300 x 5,0 x 5,0 cm) e I (300 x 5,0 x 5,0 cm) estão dispostos nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Média de E_d e F das peças nas dimensões 300 x 5,0 x 5,0 cm.

	E_d (GPa)	F (Hz)
Média	11,5	728,3
DP	2,4	81,5
CV	21,1	11,2

Tabela 3: Médias de E_d e F das peças nas dimensões 300 x 5,0 x 2,5 cm.

	E_d (GPa)	F (Hz)
Média	10,0	683,1
DP	2,3	62,1
CV	22,7	9,1

Ressalta-se que corpo de prova 2 só foi ensaiado a partir do comprimento de 200 cm, (Figura 8) após a verificação visual de um defeito que comprometeu o seu comprimento.

Figura 8. Defeito que diminuiu o comprimento do CP2.



Fonte: Próprio autor (2018)

Em seguida os comprimentos foram diminuídos de 50,0 cm até atingir o comprimento nominal de 45 cm, e os valores médios, desvios padrão (DP) e coeficientes de variação (CV) dos do módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e frequência (F) estão dispostos nas Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8.

Tabela 4: Média de E_d e F para as peças de dimensões 250 x 5,0 x 2,5 cm.

	E_d (GPa)	F (Hz)
Média	10,7	852,1
DP	1,9	50,1
CV	17,6	5,9

Tabela 5: Média de E_d e F para as peças de dimensões 200 x 5,0 x 2,5 cm.

	E_d (GPa)	F (Hz)
Média	10,7	1052,6
DP	2,6	120,4
CV	24,3	11,4

Tabela 6: Média de E_d e F para as peças de dimensões 150 x 5,0 x 2,5 cm.

	E_d (GPa)	F (Hz)
Média	11,2	1454,3
DP	2,0	161,1
CV	17,7	11,1

Tabela 7: Média de E_d e F para as peças de dimensões 100 x 5,0 x 2,5 cm.

	E_d (GPa)	F (Hz)
Média	10,1	2088,1
DP	2,0	209,4
CV	19,8	10,0

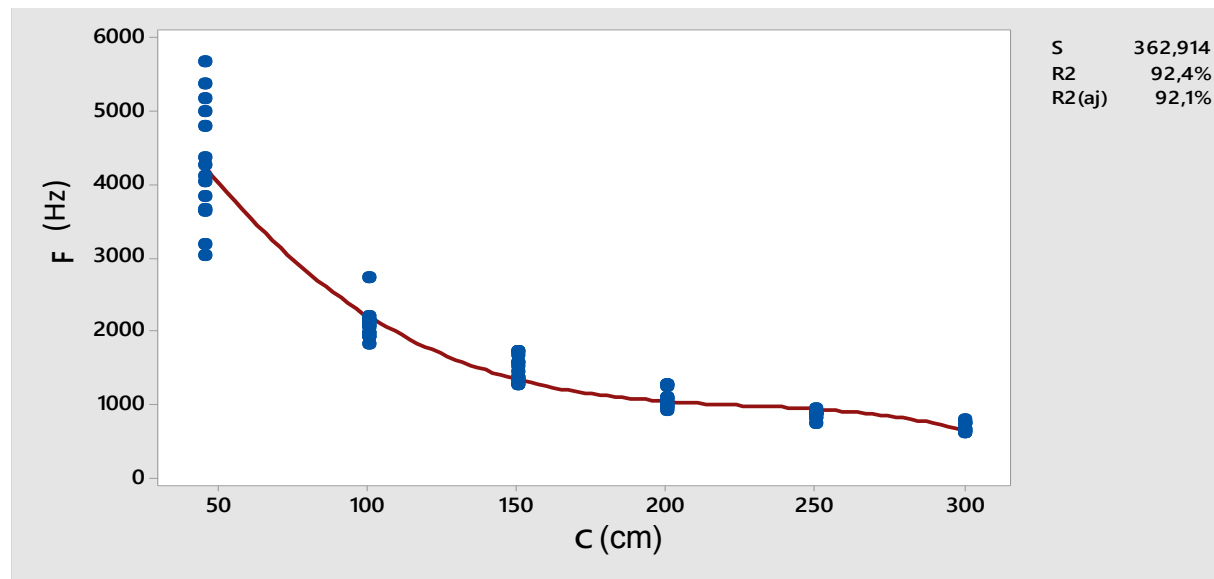
Tabela 8: Média de E_d e F para as peças de dimensões 45 x 5,0 x 2,5 cm.

	E_d (GPa)	F (Hz)
Média	9,1	4291,9
DP	4,4	813,5
CV	48,5	19,0

Através da análise de regressão linear dos dados obtidos referentes as Tabelas 3, 4, 5, 6, 7 e 8 obteve-se um valor de $p = 2,2 \times 10^{-16}$, o que mostra que a frequência pode ser dada em função do comprimento (Figura 9), com valor de $R^2 = 0,924$, que resultou na Equação 1. Pode se observar também que conforme o comprimento da peça diminuiu, a frequência aumentou, o que é de se esperar, já que quanto menor o corpo de prova, a captação do som é melhor.

$$F = 7129 - 77,90 \cdot C + 0,3362 \cdot C^2 - 0,000495 \cdot C^3 \quad (1)$$

Figura 9: Análise de Regressão Polinomial - Frequência x Comprimento.



Fonte: Próprio autor (2018)

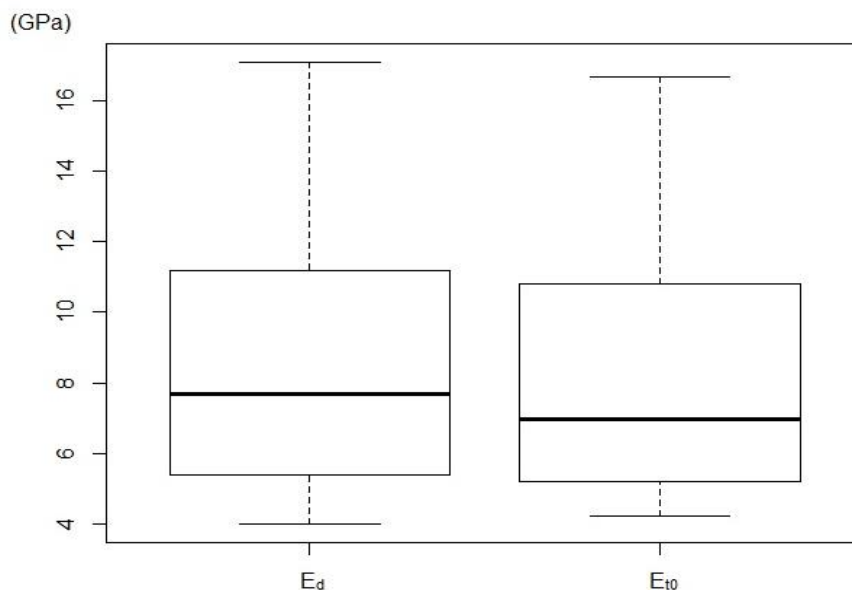
Na tabela 9 estão contidos valores E_d e E_{t0} obtidos, juntamente às médias, desvios padrão (DP) e coeficientes de variação (CV), respectivamente, nos ensaios não destrutivos de excitação por impulso e destrutivo de tração paralela às fibras, efetuados nos corpos de prova de 5 x 2,5 x 45 cm.

Tabela 9: Média do Módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e na tração paralela às fibras (E_{t0}).

	E_d (GPa)	E_{t0} (GPa)
Média	9,1	8,6
DP	4,4	4,2
CV	48,5	48,6

Efetuando um Shapiro teste para verificar a normalidade de E_d e E_{t0} , foram obtidos, respectivamente, os valores de $p = 0,058$ e $p = 0,061$, o que indica a normalidade dos dados analisados. Em seguida efetuou-se o teste t para comparação de médias, onde o valor de $p = 0,754$ obtido indica que as médias não diferem de forma significativa, como mostrado no gráfico da Figura 10.

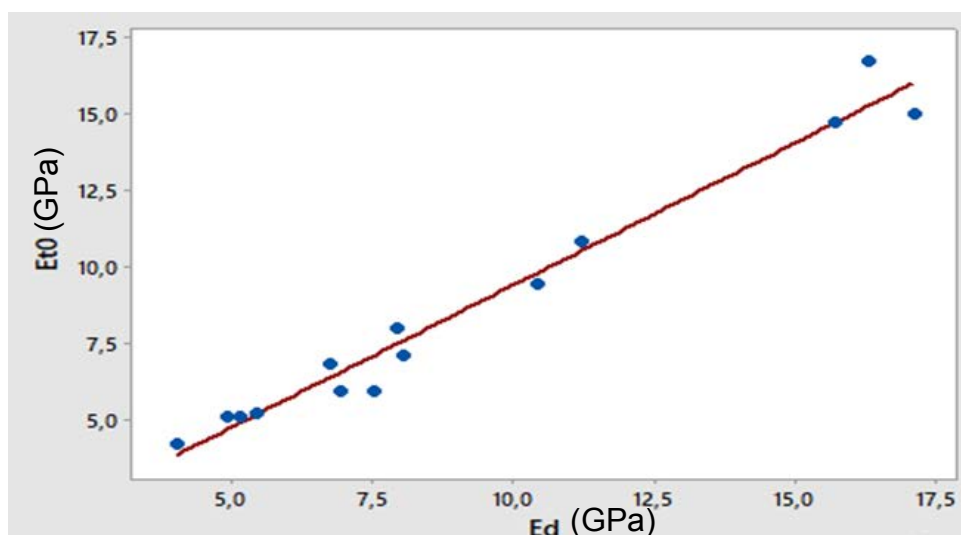
Figura 10: Gráfico caixa para comparação das médias entre E_d e E_{t0} .



Fonte: Próprio autor (2018)

Em uma análise de regressão entre os módulos de elasticidade obtidos nos dois métodos de ensaio (Figura 11), obteve-se $R^2 = 0,97$, valor este que está de acordo com os obtidos por Carreira *et al.*, (2003), que encontraram $R^2 = 0,98$ para madeira de *Pinus sp*, Ballarin e Lara Palma (2009) encontraram $R^2 = 0,98$ para madeira de *Pinus taeda L* e Segundinho *et al.*, (2012), obtiveram para *Pinus oocarpa* utilizando a técnica de vibração por impulso $R^2=0,91$, quando fizeram a mesma análise.

Figura 11: Análise de regressão linear entre E_d e E_{t0} .



Fonte: Próprio autor (2018)

A análise de regressão linear também resultou na Equação 2, que relaciona os valores dos dois módulos encontrado através do ensaio não destrutivo de Excitação por impulso e o ensaio de tração paralela às fibras.

$$E_{t0} = (0,9272 \cdot E_d) + 0,1469 \quad (2)$$

Os 7 corpos de prova (II) foram usinados onde a única parte alterada foi sua largura, que ficou com 10 cm, mantendo seu comprimento 300 cm e sua largura de 5,0 cm, e as peças foram submetidas ao ensaio não destrutivo (TEI), Tabela 10.

Tabela 10: Média de E_d e F para as peças de dimensões 300 x 10 x 5,0 cm.

	E_d (GPa)	F (Hz)
Média	9,4	639,0
DP	2,1	78,8
CV	22,1	12,3

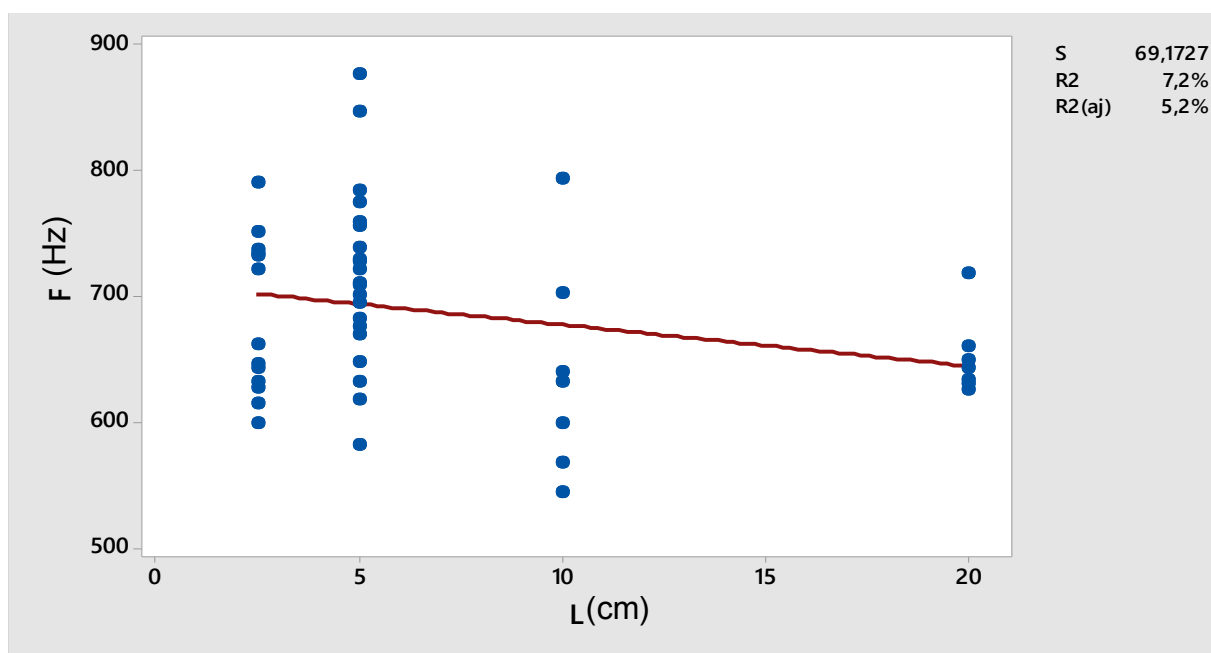
Na tabela 11, juntamente os desvios padrão (DP) e coeficientes de variação (CV), estão contidos os valores médios dos módulo de elasticidade dinâmico e frequência obtidos no ensaio não destrutivo de Excitação por impulso em peças de dimensões 300 x 5,0 x 5,0 cm.

Tabela 11: Média de E_d e F para as peças de dimensões 300 x 5,0 x 5,0 cm.

	E_d (GPa)	F (Hz)
Média	10,8	693,8
DP	1,7	37,8
CV	15,4	5,4

Verificou-se utilizando a análise de regressão linear das frequências que constam nas Tabelas 1, 2, 3, 10 e 11 que a frequência não é função da largura ($p = 0,09125$). Foi obtido $R^2 = 0,071$, mostrando que não há um modelo que possa explicar os valores observados (Figura 12).

Figura 12: Análise de regressão linear, Frequência x Largura.



Fonte: Próprio autor (2018)

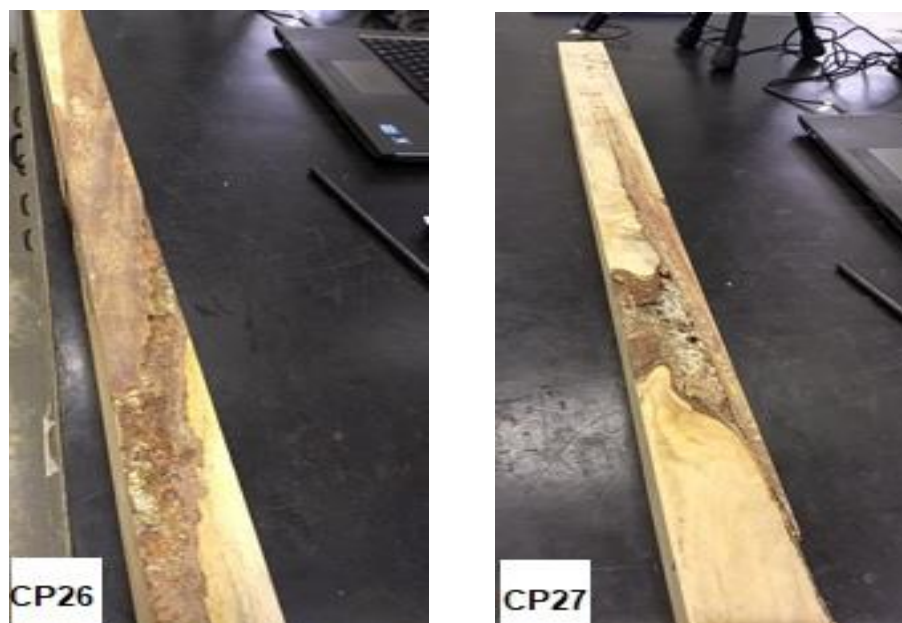
Na tabela 12 estão contidos os valores médios de E_d e E_M obtidos, respectivamente, nos ensaios não destrutivo e de flexão estática, efetuados nos corpos de prova de 115 x 5,0 x 5,0 cm, juntamente os desvios padrão (DP) e coeficientes de variação (CV).

Tabela 12: Média do Módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e na flexão estática (E_M).

	E_d (GPa)	E_M (GPa)
Média	8,2	7,6
DP	2,8	3,0
CV	34,1	39,4

Notou-se que para os corpos de prova 26 e 27 nenhum módulo de elasticidade E_d e E_M foi obtido devido a excesso de defeitos na madeira (Figura 13), mostrando que a técnica de excitação por impulso foi eficaz para a presença de defeitos, possibilitando a identificação de peças que não podem ser utilizadas devido a sua baixa resistência mecânica, assim como foi obtido no ensaio convencional.

Figura 13: Defeitos visuais nos corpos de prova 26 e 27.

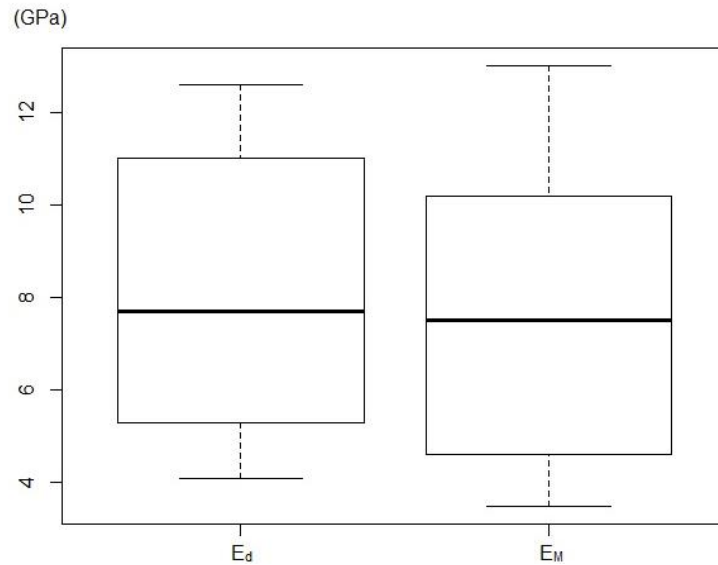


Fonte: Próprio autor (2018)

Apesar dos coeficientes de variação serem elevados, observa-se nos dados da Tabela 12 que as médias de E_d e E_M obtidos possuem similaridade.

Efetuada um Shapiro teste para verificar a normalidade de E_d e E_M , foram obtidos, respectivamente, os valores de $p = 0,063$ e de $p = 0,127$, o que indica a normalidade dos dados estudados. Em seguida efetuou-se o teste t para comparação de médias onde o valor de $p = 0,5213$ obtido indica que as médias não diferem de forma significativa, como mostrado no gráfico da Figura 14.

Figura 14: Gráfico caixa para comparação das médias entre E_d e E_M .

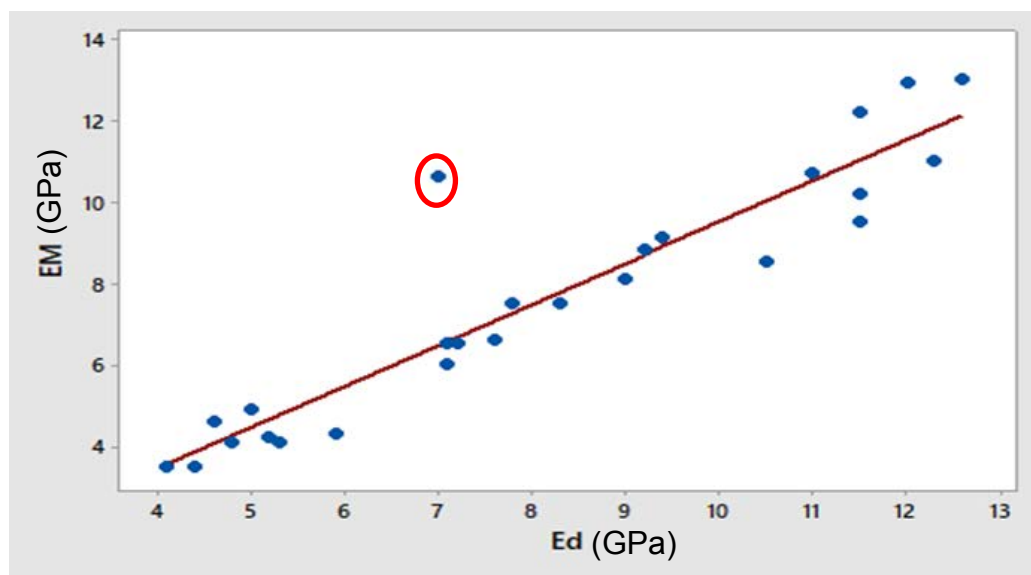


Fonte: Próprio autor (2018)

Em uma análise de regressão entre os valores de E_d e E_M (Figura 15), obteve-se $R^2 = 0,87$ que está de acordo com os valores obtidos Ballarin (2005), $R^2 = 0,90$, para a madeira de *Pinus taeda* L, Chui *et al.* (1999) de $R^2 = 0,85$ para a madeira de *Red Pine*, Cossolino *et al.* (2009), obteve um $R^2 = 0,89$, para madeira de *Pinnus oocarpa* e Segundinho *et al.* (2012) de $R^2 = 0,91$, quando realizaram o mesmo tipo de análise. Essa análise também originou a Equação 3.

$$E_M = (1,0067 \cdot E_d) - 0,5742 \quad (3)$$

Figura 15: Análise de regressão linear entre E_d e E_M .



Fonte: Próprio autor (2018)

Notou-se que para o corpo de prova 19 obteve-se uma diferença entre E_d e E_M devido ao excesso de defeitos na madeira (Figura 16).

Figura 16: Defeitos visuais nos corpos de prova 19.

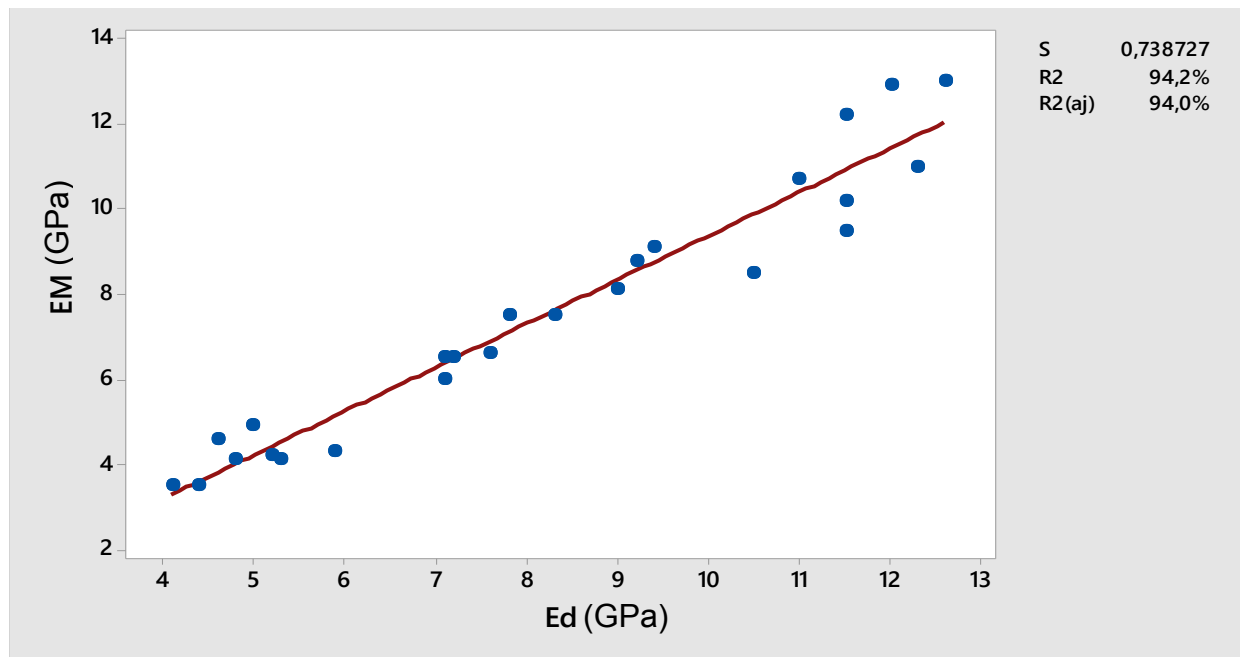


Fonte: Próprio autor (2018)

Em uma nova análise de regressão entre os valores de E_d e E_M (Figura 17), retirando o corpo de prova 19, obteve-se $R^2 = 0,94$.

$$E_M = (1,032 \cdot E_d) - 0,9498 \quad (4)$$

Figura 17: Análise de regressão linear entre E_d e E_M sem o cp 19.



Fonte: Próprio autor (2018)

6 CONCLUSÕES

Conforme os comprimentos foram diminuídos de 50,0 em 50 cm, nos comprimentos 200, 150, 100 e 45 cm, mantendo-se a largura (5,0 cm) e a espessura (2,5 cm) constantes, foram obtidas, respectivamente, as frequências médias iguais a 1052,6 Hz, 1454,3 Hz, 2088,1 Hz e 4291,9 Hz, observando-se que enquanto o comprimento diminui o valor da frequência aumenta. A análise estatística dos dados mostrou que a frequência pode ser dada em função do comprimento com $R^2 = 0,924$ e equação de correlação: $F = 7129 - 77,90 \cdot C + 0,3362 \cdot C^2 - 0,000495 \cdot C^3$. Verificou-se que a frequência não é dada em função da largura.

Tanto para o módulo de elasticidade na tração paralela às fibras quanto na flexão estática houve equivalência estatística com o módulo de elasticidade dinâmico, com os valores de $R^2 = 0,97$ e de $R^2 = 0,87$ e equações de correlação $E_{t0} = (0,9272 \cdot E_d) + 0,1469$ e $E_M = (1,0067 \cdot E_d) - 0,5742$ respectivamente, mostrando a eficiência do método alternativo não destrutivo de excitação por impulso.

Com os valores obtidos de frequências e, em especial com a equação entre o comprimento e as frequências para a madeira de *Pinus elliottii* é possível ao fornecedor ter uma pré-classificação da madeira quanto a rigidez, utilizando um equipamento de baixo custo e de fácil operacionalidade, sem que seja necessário maior conhecimento técnico para contribuir com o consequente aumento no seu valor agregado.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB 26 – Ensaio físicos e mecânicos de madeiras, Rio de Janeiro, Brasil, 1940.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira – Anexo B, Rio de Janeiro, Brasil, 1997. 107 p.

BALLARIN, Adriano Wagner; LARA PALMA, Hernando Alfonso Lara. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, p. 371-380, 2003.

BALLARIN, Adriano Wagner; NOGUEIRA, Marcelo. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, p. 19-28, 2005.

BALLARIN, Adriano Wagner; LARA PALMA, Hernando Alfonso Lara. Avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento com uso do método não destrutivo de vibração transversal. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 10, n. 25, p. 5-14, 2011.

BATISTA, Fernando Augusto Franco et al. Diferenciação de clones de eucalipto utilizando ensaio de propagação de ondas em árvores. 2012.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Estudo de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus merkusii*. **Scientia forestalis**, v. 36, n. 79, p. 237-243, 2008.

BRASHAW, Brian K. et al. Nondestructive testing and evaluation of wood: A worldwide research update. **Forest products journal**, v. 59, n. 3, p. 7, 2009.

BODIG, Jozsef. The process of NDE research for wood and wood composites. **The e-journal of nondestructive testing**, v. 6, n. 3, 2001.

BALDASSINO, N.; PIAZZA, M.; ZANON, P. In situ evaluation of the mechanical properties of timber structural elements. In: **10. th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood NDT1996**. Presses polytechniques et universitaires romandes, 1996. p. 369-377.

BUCUR, Voichita. Strings for Musical Instruments of the Baroque and Romantic Periods. In: **Handbook of Materials for String Musical Instruments**. Springer, Cham, 2016. p. 455-524.

BALBINOT, Rafaelo et al. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 5, n. 1, p. 59-68, 2009.

CALEGARI, Leandro; GATTO, Darci Alberto; STANGERLIN, Diego Martins. Influence of moisture content, specific gravity and specimen geometry on the ultrasonic pulse velocity in *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 2, n. 2, p. 10-12953/2177-6830. v02n02a01, 2011.

JÚNIOR, Carlito Calil; MINÁ, Alexandre JS. Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v. 7, n. 2, 2003.

CARREIRA, Marcelo Rodrigo et al. Avaliação de técnicas não-destrutivas aplicadas à madeira de *pinus* sp. In: **CONFERÊNCIA PAN-AMERICANA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**.

CHUI, Y. H.; BARCLAY, D. W.; COOPER, P. A. Evaluation of wood poles using a free vibration technique. **Journal of testing and evaluation**, v. 27, n. 3, p. 191-195, 1999.

CHIU, Chih-Ming; LIN, Chih-Hsien; YANG, Te-Hsin. Application of nondestructive methods to evaluate mechanical properties of 32-year-old Taiwan incense cedar (*Calocedrus formosana*) wood. **BioResources**, v. 8, n. 1, p. 688-700, 2012.

COSSOLINO, Leiliane Cristina et al. Avaliação da coerência entre três métodos de determinação do módulo de elasticidade da madeira de *Pinus Oocarpa*. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 10, p. 33-42, 2009.

DE OLIVEIRA, Fabio Lucas et al. Propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. em função da idade e da posição radial na tora. Properties of *Pinus taeda* L. wood in function of age and radial position in log. **Revista do Instituto Florestal**, v. 18, n. unknown, p. 59-70, 2006.

DE OLIVEIRA, Vitor Martim et al. Adequação às normas e qualidade da madeira serrada para fins estruturais comercializada no Distrito Federal. **FLORESTA**, v. 38, n. 3, 2008.

GONÇALVES, Raquel; TRINCA, Alex Julio; PELLIS, Bruno Piva. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. **Wood science and technology**, v. 48, n. 2, p. 269-287, 2014.

GOMES RIBEIRO AMORIM, Patrícia; GONÇALEZ, Joaquim Carlos; ALVES CAMARGOS, José Arlete. Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. **Cerne**, v. 19, n. 3, 2013.

GREEN, D. W. et al. Improved grading system for structural logs for log homes. **Forest products journal**, v. 54, n. 9, p. 52, 2004.

KRONKA, Francisco José Nascimento et al. Monitoramento da vegetação natural e do reflorestamento no Estado de São Paulo. **Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto**, v. 12, p. 16-21, 2005.

NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A. W. Efeito da idade na qualificação mecânica da madeira serrada de *Eucalyptus* sp. com uso de ensaios não- destrutivos. *Revista Energia na Agricultura*, Botucatu, v. 23, n. 3, p. 74-94, jul./set. 2008.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Propagação de ondas acústicas na madeira. **ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**, VII, São Carlos, 2000.

PEREIRA, Rodrigo Allan et al. Análise da elasticidade em madeiras submetidas à ensaio de flexão estática utilizando a técnica de velocimetria por imagens de partículas (piv). **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 2, 2017.

PONCE, Reinaldo Herrero. Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas. **Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria**, p. 50-58, 1995.

ROSS, Robert J. et al. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. **Forest Products Journal**, v. 47, n. 2, p. 89, 1997.

ROSS, Robert J.; PELLERIN, Roy F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures. **General Technical Report FPL-GTR**, v. 70, p. 24061-0503, 1994.

ROSS, Robert Jon et al. **Transverse vibration nondestructive testing using a personal computer**. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991.

SHIMIZU, Jarbas Yukio Shimizu. **Pinus na silvicultura brasileira**. Embrapa Florestas, 2008.

SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcântara 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**, v. 36, n. 6, p. 1155-1162, 2012.

SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcântara et al. Influence of moisture content on the determination of the modulus of elasticity of Pinus sp. beams. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 319-329, 2017.

TRIANOSKI, Rosilani. Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada. 2012.