



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL DE MADEIRAS UTILIZANDO SMARTPHONE

Hiago Rafael de Sousa Santos

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

**DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL
DE MADEIRAS UTILIZANDO SMARTPHONE**

HIAGO RAFAEL DE SOUSA SANTOS

Trabalho de Conclusão de Curso do Mestrado Profissional apresentada na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração de Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Andrés Batista Cheung

CAMPO GRANDE

SETEMBRO / 2024



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



FOLHA DE APROVAÇÃO

HIAGO RAFAEL DE SOUSA SANTOS

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL DE MADEIRA UTILIZANDO SMARTPHONE

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovada pela Banca Examinadora em **30 de setembro de 2024** na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Banca examinadora:

Dr. Andrés Batista Cheung (interno)

Dra. Ana Paula da Silva Milani (Interno)

Dr. Carlito Calil Junior (Externo)

Dr. Gilfranco Medeiros Alves (Interno) (Suplente)

Dr. Johannes Gerson Janzen (Interno) (Suplente)

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Andres Batista Cheung, Professor do Magisterio Superior**, em 30/09/2024, às 15:05, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula da Silva Milani, Professora do Magistério Superior**, em 30/09/2024, às 15:13, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Carlito Calil Junior, Usuário Externo**, em 30/09/2024, às 16:25, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5140268** e o código CRC **15E3E440**.

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

Fone:

CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

AGRADECIMENTO

Agradeço à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo à educação e ao desenvolvimento profissional. Ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Eficiência Energética e Sustentabilidade (PPGEES) e a todo o corpo docente pelos valiosos ensinamentos, com especial destaque ao Prof. Dr. Andrés Batista Cheung, por seus conselhos e acompanhamento no desenvolvimento deste trabalho, e ao Prof. Dr. Julio Alberto Ferencz Junior, cuja contribuição foi essencial ao longo de todo o mestrado.

Minha gratidão também se estende à Madeireira Madecal, pela disponibilização do espaço e material necessário para a realização dos ensaios experimentais.

Agradeço ainda aos membros da banca de qualificação, Prof.^a Dra. Ana Paula da Silva Milani e Prof. Dr. Carlito Calil Junior, por suas orientações que enriqueceram este trabalho, bem como aos membros da banca de defesa, pela avaliação criteriosa do trabalho final.

Em especial, expresso meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Prof. Dr. Andrés Batista Cheung, por seu imprescindível apoio, orientação e suporte, sem os quais esta pesquisa não seria possível.

À minha família, fonte de força, inspiração e conforto nos momentos difíceis, agradeço pelo constante apoio e incentivo. E, aos amigos, agradeço pela amizade e apoio incondicionais, que tornaram esta jornada mais leve e significativa.

RESUMO

A demanda crescente por práticas sustentáveis na construção civil tem impulsionado o uso de materiais renováveis, como a madeira, devido as suas propriedades estruturais, leveza, resistência, durabilidade e capacidade de sequestrar carbono. Contudo, o emprego da madeira enfrenta desafios, especialmente devido à variabilidade de suas características e à necessidade de métodos de avaliação mais eficazes, acessíveis e rápidos. Este estudo investigou a correlação entre o módulo de elasticidade longitudinal obtido por flexão estática (MOE_e) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{tv}) determinado por vibração transversal, utilizando *smartphones* como instrumento de medição. Foram analisados 215 amostras de 10 diferentes espécies de madeira por meio de ensaios de flexão estática e vibração transversal. Os resultados demonstraram uma correlação significativa entre MOE_{tv} e MOE_e ($0,49 \leq R^2 \leq 0,98$), validando a eficácia do método de vibração transversal com *smartphones*. A técnica revelou-se uma abordagem eficiente na previsão do módulo de elasticidade, apresentando uma alternativa econômica e acessível para a caracterização mecânica, contribuindo para práticas sustentáveis na construção civil e propondo um método inovador e preciso para a avaliação da rigidez deste material.

Palavras-chave: módulo de elasticidade; vibração; madeira; smartphone.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable practices in the construction industry has driven the use of renewable materials, such as wood, due to its structural properties, lightness, strength, durability, and carbon sequestration capacity. However, the use of wood faces challenges, particularly due to the variability of its characteristics and the need for more effective, accessible, and rapid evaluation methods. This study investigated the correlation between the longitudinal modulus of elasticity obtained by static bending (MOE_e) and the dynamic modulus of elasticity (MOE_{tv}) determined by transverse vibration, using smartphones as a measurement tool. A total of 215 samples from 10 different wood species were analyzed using static bending and transverse vibration tests. The results showed a significant correlation between MOE_{tv} and MOE_e ($0,49 \leq R^2 \leq 0,98$), validating the effectiveness of the transverse vibration method using smartphones. The technique proved to be an efficient approach for predicting the modulus of elasticity, offering an economical and accessible alternative for mechanical characterization, contributing to sustainable practices in the construction industry and proposing an innovative and precise method for this material.

Keywords: elasticity modulus; vibration; wood; smartphone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Templo de Horyu-ji, no Japão.	15
Figura 2. Esquema de funcionamento da máquina MSR.	19
Figura 3. Equipamento para avaliação não-destrutiva por meio de emissão de ultrassom	22
Figura 4. Disposições dos transdutores no ensaio ultrassônico.....	22
Figura 5. Ensaio de ondas de tensão	25
Figura 6. Esquema de um equipamento para a determinação do MOE por meio da vibração transversal.	27
Figura 7. Sistema massa-mola e viga vibrando transversalmente	27
Figura 8. Viga biapoiada carregada	28
Figura 9. Geometria de viga simplesmente apoiada com balanço simétrico.	32
Figura 10. a) Arranjo experimental utilizado no ensaio de campo e b) padrão de corte para amostras de madeira pequenas.....	33
Figura 11. Um modelo simples de uma viga vertical em balanço.....	37
Figura 12. a) Esquemas do teste de FV e a FEA dos dados de FV (b). H= 10, 20, 30, 40, 50 e 60 mm. (B) Preparação dos espécimes do tipo L e (b) Espécimes do tipo R (mm).	39
Figura 13. Configuração da viga <i>cantilever</i> :.....	41
Figura 14. Dispositivo geralmente utilizado para o método de vibração	46
Figura 15. Viga em vibração transversal.....	49
Figura 16. Modelo discreto com dois graus de liberdade.	49
Figura 17. Viga em vibração transversal.....	51
Figura 18. Forças em um elemento infinitesimal dx.	51
Figura 19. Viga apoiada sobre base elástica	56
Figura 20. Viga sobre dois apoios elásticos posicionados nas extremidades	57

Figura 21. Sensores dentro dos smartphones	60
Figura 22. Orientação dos eixos que estabelecem as componentes da aceleração de um smartphone	61
Figura 23. Fluxograma dos métodos.	64
Figura 24. Amostras de madeira (a) Peroba do Norte (<i>Goupia glabra</i>) e (b) Peroba Rosa (<i>Aspidosperma polyneuron</i>).	65
Figura 25. Tela inicial do aplicativo <i>myFrequency</i>	67
Figura 26. Peça de madeira sendo pesada em balança industrial	69
Figura 27. Medição da espessura da peça de madeira utilizando paquímetro	69
Figura 28. Smartphone posicionado para teste de vibração.....	70
Figura 29. Teste de vibração transversal	70
Figura 30. Ensaio de flexão estática.....	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico ($E_{M,din}$) e estático ($E_{M,static}$) obtido por Miná et al (2004).	24
Gráfico 2. Relação entre o módulo de Young em flexão e elasticidade da vibração transversal.	34
Gráfico 3. Relação entre o módulo de Young em flexão de quatro pontos EL4 e o módulo de elasticidade da vibração transversal ELV.	34
Gráfico 4. Diagrama de dispersão: E dinâmico X E estático, de 326 peças estruturais de madeira Southern Pine.	36
Gráfico 5. Raiz fundamental transformada da equação de frequência como uma função do grau de conicidade. C_s , circunferência do tronco no suporte próximo ao toco; C_0 , circunferência do tronco no suporte próximo à ponta.	45
Gráfico 6. Exemplo de uma aceleração medida em uma viga de madeira em balanço devido a um impacto.	47
Gráfico 7. (a) Domínio do tempo e (b) Domínio da frequência.	71
Gráfico 8. Peroba do Norte (<i>Goupia glabra</i>)	76
Gráfico 9. <i>Pinus sp.</i>	76
Gráfico 10. Peroba Rosa (<i>Aspidosperma polyneuron</i>).....	76
Gráfico 11. Pinus (<i>Pinus elliottii</i>).....	76
Gráfico 12. Cedrim (<i>Erismia uncinatum Warm</i>)	76
Gráfico 13. Cambará (<i>Gochnatia paniculata</i>)	76
Gráfico 14. Garrote - Tatajubá (<i>Bagassa guianensis</i>).....	77
Gráfico 15. Cupiúba - Peroba do Norte (<i>Goupia glabra</i>).....	77
Gráfico 16. Peroba Pariri (<i>Pouteria pariry</i>)	77
Gráfico 17. Canelão (<i>Nectandra megapotamica</i>).....	77

Gráfico 18. Dispersão dos dados para as espécies estudadas, como <i>Goupia glabra</i> – grupo 1(Tamazato, 2017), <i>Aspidosperma polyneuron</i> – grupo 2 (Takazono e Cheung, 2018), <i>Pinus sp</i> – grupo 3(Pereira, 2023) e grupos 4 a 10 (Santos e Cheung, 2024).....	79
Gráfico 19. Mostra os valores de MOE à flexão estática utilizando os valores de MOE por vibração transversal.....	80
Gráfico 20. Resíduos vs. valores estimados.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação entre os materiais usualmente utilizados na construção civil.	17
Tabela 2. Média e desvio-padrão para os módulos de elasticidade dinâmico e estático	35
Tabela 3. Resumo das amostras de madeira utilizadas neste estudo.	66
Tabela 4. Resumo das propriedades da madeira avaliada (coeficientes de variação (%) entre parênteses).	75
Tabela 5. Resumo das propriedades da madeira avaliada (coeficientes de variação (%) entre parênteses).	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Bandas de frequências do ultrassom para algumas aplicações	23
Quadro 2. Propriedades do smartphone.....	68

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ABENDI - Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASTM - *American Society for Testing and Materials*
- Buildings-GSR* - Relatório de Status Global de Edificação e Construção
- CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado A Quente
- CO₂ - Dióxido de Carbono
- ECO-92 - Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento
- EI – Rigidez à Flexão
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EI4 – Módulo de Young em flexão de quatro pontos adotado no estudo de Brancheriau (2002)
- END - Ensaio Não Destrutivos
- E_{tv} – Módulo de elasticidade da vibração adotado no estudo de Brancheriau (2002)
- FFT - *Fast Fourier Transform*
- FGV - Fundação Getulio Vargas
- FRF - Função Resposta em Frequência
- GPS - *Global Positioning System*
- Hz – *Hertz*
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IRI - Índice de Irregularidade Internacional
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
- MEL - *Machine Evaluated Lumber*
- MEMS - *Micro-Electro-Mechanical Systems*

MHz – *Megahertz*

MLC – Madeira Lamelada Colada

MOE – Módulo de Elasticidade

MOE_e – Módulo de Elasticidade Estático

MOE_{tv} – Módulo de Elasticidade Dinâmico

MSR - *Machine Stress Rating*

MPa – *Megapascal*

NBR – Norma Brasileira

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

PVES - Pesquisa Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura

R - Coeficiente de Correlação

R^2 - Coeficiente de Determinação

SIGA - Sistema de Informação Geográfica do Agronegócio

SM – Módulo de Cisalhamento

TSD – Tratamento Superficial Duplo

UFMS – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

UNEP - *United Nations Environment Programme*

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Percentual

A – Área da seção transversal (m^2)

b – Largura horizontal do espécime

C – Velocidade de propagação da onda (m/s)

C_b – Circunferência na base da tora

C_t – Circunferência da ponta do tronco

cm – Centímetro

cos – Cosseno

d – Distância entre os transdutores ou acelerômetros (m)

ΔF – Acréscimo de carga (N)

Δt – Tempo decorrido para a onda atravessar a madeira (s)

E – Módulo de elasticidade

EI – Rigidez à flexão

E_0 – Módulo de elasticidade do tronco

$E_{M,VT}$ – Módulo de Young obtido com a técnica de vibração transversal (Pa)

f_r – Frequência natural fundamental (Hz)

g – Aceleração da gravidade ($9,80665 m/s^2$)

I – Momento de inércia em relação ao plano de flexão considerado (cm^4)

K – Constante elástica

kg – Quilograma

L – Distância entre os pontos de emissão e recepção da onda (m)

L/h – Relação comprimento e altura

m – Metros

m^3 – Metro cúbico

m/s – Metro por segundo

m/s^2 – Metro por segundo ao quadrado

mm – Milímetro

N – Newton

π – Constante de valor 3,1415926..

ρ – Densidade da madeira (kg/m^3)

S – Vão de apoio ($<L$)

s – Segundos

t – Tempo de propagação das ondas (s)

V – Velocidade de propagação da onda (m/s)

W – Peso total do espécime

θ – Ângulo

φ_o – Ângulo de fase

λ – Constante de separação

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	<i>OBJETIVO GERAL</i>	11
1.1.1	Objetivos específicos	11
1.2	<i>JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO</i>	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	<i>MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL</i>	14
2.1.1	Importância do uso de madeira plantada para a sustentabilidade.....	15
2.2	<i>TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA A CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA</i>	18
2.2.1	Tensões MSR (<i>machine stress rating</i>)	19
2.2.2	Técnica de ultrassom.....	20
2.2.3	Ondas de tensão (<i>stress wave</i>).....	25
2.3	<i>VIBRAÇÃO TRANSVERSAL</i>	26
2.3.1	Equações de soluções analíticas.....	41
2.3.2	Técnicas de vibração existentes para a avaliação das características da madeira.....	46
2.3.3	Análise modal teórica de vigas retas	47
2.3.4	Fatores que afetam o ensaio de vibração transversal.....	53
2.4	<i>APLICAÇÃO DO SMARTPHONE NA ENGENHARIA</i>	58
2.4.1	Sensores presentes no smartphone.....	60
2.4.2	Funcionamento do acelerômetro.....	61
3	MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1	<i>Madeira Serrada</i>	65
3.2	<i>Smartphone</i>	67
3.2.1	Propriedades dos sensores do <i>smartphone</i>	67
3.3	<i>Determinação geométrica das peças</i>	68
3.4	<i>Ensaio de vibração transversal</i>	68
3.4.1	Aferição das Dimensões Físicas	68
3.4.2	Preparação para o Teste de Vibração	69
3.4.3	Indução da Vibração.....	70
3.4.4	Análise dos dados da vibração	71
3.5	<i>Teste de flexão estática para a obtenção do Módulo de elasticidade longitudinal (MOE_e)</i> 73	

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
5	82
	CONCLUSÕES.....	82

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por práticas sustentáveis na construção civil tem impulsionado a busca por materiais renováveis e ecologicamente corretos. Nesse cenário, a madeira surge como uma solução promissora para a descarbonização da construção, devido à sua capacidade de absorver carbono da atmosfera durante a fotossíntese (CHURKINA *et al.*, 2020). A madeira utilizada na construção pode ser proveniente de florestas plantadas, como monoculturas de pinus e eucalipto, ou de florestas nativas, que preservam a biodiversidade e contribuem para o equilíbrio ecológico e a segurança alimentar para o futuro (UNEP, 2020). Além de suas aplicações tradicionais, a madeira é um material multifuncional, com usos modernos que incluem a produção de celulose, papel, energia, resina, açúcar, partículas e flocos (ARAÚJO *et al.*, 2017).

Apesar de sua longa história na construção civil, o uso da madeira enfrenta desafios como a falta de compreensão completa de suas propriedades e a persistência de métodos construtivos desatualizados (HIGA; MORA; HIGA, 2000). A madeira é um material heterogêneo cujas propriedades variam conforme a espécie, a região e o tipo de processamento, o que pode afetar seu desempenho em aplicações estruturais.

Além de ser leve, resistente, durável e fornecer bom isolamento térmico e acústico, a madeira desempenha um papel crucial como sumidouro de carbono. Estima-se que as florestas capturem cerca de 7,6 bilhões de toneladas de CO_2 anualmente, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas (HARRIS *et al.*, 2021). Materialmente, a madeira pode armazenar aproximadamente 17,4 kg de carbono por metro quadrado de área construída, com potencial para uma mitigação ainda maior (JUNIOR, 2017).

A variabilidade nas propriedades da madeira, aliada à necessidade de métodos construtivos mais modernos, reforça a importância da classificação visual e mecânica. As normas NBR 7190-1:2022, NBR 7190-2:2022 e NBR 7190-3:2022 estabelecem requisitos para a classificação e ensaio das peças estruturais, garantindo a qualidade e a segurança das construções.

Nesse contexto, a técnica de vibração transversal se apresenta como um método não destrutivo eficaz para determinação do módulo de elasticidade da madeira, com estudos recentes demonstrando a viabilidade do uso de *smartphones*. Dessa forma, desenvolver e validar uma metodologia que permita medir o módulo de elasticidade longitudinal da madeira utilizando *smartphones*, baseada na técnica de vibração transversal, pode oferecer uma abordagem prática e acessível para avaliar as propriedades mecânicas da madeira na construção civil.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo é analisar a correlação entre o módulo de elasticidade longitudinal à flexão estática (MOE_e) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{tv}) obtido por meio de vibração transversal utilizando um *smartphone*.

1.1.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Verificar e validar o uso do acelerômetro do *smartphone* na determinação do módulo de elasticidade;
2. Desenvolver um procedimento para a aplicação do *smartphone* na técnica de vibração transversal;
3. Identificar, na literatura, os principais fatores que influenciam na técnica de vibração transversal, como as dimensões geométricas e as condições de vinculação das peças.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Conforme dados da Pesquisa Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PVES, 2021), divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), as florestas plantadas no Brasil ocupam uma área aproximada de 9,5 milhões de hectares. Dessa área, 1,8 milhões de hectares são ocupados por pinus (*Pinus* sp.) e 7,3 milhões de hectares são ocupados por eucalipto (*Eucalyptus* sp.). Tais espécies destacam-se como as mais plantadas no país, em razão de sua alta produtividade e adaptabilidade a diferentes condições climáticas.

O estado de Mato Grosso do Sul é um importante produtor florestal, destacando-se no plantio de eucalipto, que ocupa 99,5% da área destinada à cultura. Em dez anos, o setor experimentou um crescimento expressivo de 157%, passando de 456,6 mil hectares na safra 2011/2012 para 1,1 milhão de hectares na safra 2021/2022 (SIGA, 2022).

A utilização racional da madeira é um imperativo para a sustentabilidade ambiental e econômica. Por ser um material versátil e renovável, pode ser empregado nas mais diversas aplicações, desde a construção até a produção de móveis. Porém, é importante o seu uso de forma responsável, evitando o desmatamento e garantindo a regeneração das florestas. A racionalização pode ser promovida por meio de tecnologias avançadas de processamento, classificação e preservação. Essas tecnologias permitem que esse material orgânico seja usado de forma mais eficiente e durável, reduzindo o desperdício. Uma abordagem cuidadosa e responsável na utilização da madeira não apenas preserva as florestas, mas também contribui para uma economia circular e mais ecologicamente equilibrada.

A utilização estrutural da madeira requer a avaliação de suas propriedades mecânicas, a fim de agrupar as peças de mesmas características em classes. Esse procedimento reduz a variabilidade das propriedades mecânicas, conforme estabelecido na NBR 7190-1 (ABNT, 2022). Assim, é possível utilizar as peças de melhor qualidade nas posições de maior solicitação da estrutura, enquanto as de qualidade inferior podem ser usadas nas posições de menor solicitação. Essa prática induz ao uso equilibrado da madeira, evitando o desperdício e garantindo a segurança das estruturas.

Ademais, a pesquisa está diretamente alinhada com dois dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), propostos na

Agenda 2030. A técnica de vibração transversal para a classificação das madeiras contribui para o cumprimento da ODS 9 (indústria, inovação e infraestrutura), que aborda metas sobre a adoção de tecnologias para infraestruturas resilientes, limpas e ambientalmente sustentáveis. Ao utilizar essa técnica, é possível classificar as madeiras com maior precisão e eficiência, o que contribui para a redução do desperdício e o aumento da eficiência do uso dos recursos. Isso alinha a pesquisa com a ODS 12 (consumo e produção responsável), que se refere ao direcionamento sustentável nos usos dos recursos, produção e consumo, para a redução de perdas e resíduos.

Em última análise, a classificação mecânica da madeira contribui para o aumento da segurança das estruturas e para a racionalização do uso do material. Nesse sentido, a aplicação de técnicas não-destrutivas, como o ensaio de vibração transversal, é fundamental para as espécies de floresta plantada. O ensaio de vibração transversal tem sido amplamente empregado para estimar o módulo de elasticidade de elementos estruturais de madeira serrada, conforme pode ser observado em estudos realizados por diversos pesquisadores, como PELLERIN (1965), MURPHY (1997), WANG *et al.*, (2001), BRANCHERIAU *et al.*, (2002), CARREIRA *et al.*, (2003), CHANG *et al.*, (2014), TAMAZATO *et al.*, (2017), TAKAZONO *et al.*, (2018), SEGUNDINHO *et al.*, (2017) e ZHANG *et al.*, (2021).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A madeira é um dos materiais mais utilizados na construção civil. Devido às suas diversas características, tais como: a elevada resistência mecânica em relação ao seu próprio peso, facilidade em seu processamento, excelente isolamento térmico e flexibilidade de uso, além do custo reduzido e um material renovável, podendo ser lamilar, serrada, cortada em partículas, quebrada em fibras e ativos renováveis (FREITAS *et al.*, 2018).

No Brasil, o uso de elementos estruturais de madeira vem crescendo ao longo dos últimos anos devido as diversas pesquisas realizadas, para tornar o material mais competitivo quando comparado com outros materiais, como concreto e aço (CALIL JUNIOR; BRITO, 2011). O País possui aproximadamente 500 milhões de hectares (59% do seu território) de florestas naturais e plantadas, representando a segunda maior área de florestas do mundo, ficando atrás apenas da Rússia (MAPA, 2019 *apud* IBGE, 2018).

Conforme Winter (2019), o emprego da madeira na construção é vantajoso por economizar a quantidade de energia em duas etapas: uma na formação da matéria-prima feita através da absorção da energia solar (fotossíntese), e a outra, com o consumo de energia necessário no processo de usinagem. Além disso apresenta benefícios em relação ao consumo de energia para o processamento e montagem da construção e, principalmente, quando ao aproveitamento de seus resíduos por meio do seu poder calorífico.

As construções em madeira podem ser desde moradias de pequeno porte a grandiosos edifícios, bem como, parte secundárias das estruturas. Uma das construções mais antigas de madeira no mundo é o templo budista de Horyu-ji, localizada em Nara, no Japão, que permanece grandioso por mais de um milênio, ilustrado a seguir (COSTA, 2013). A Figura 1 apresenta o monumento da mesma forma que foi construído a mais de 1400 anos.

Figura 1. Templo de Horyu-ji, no Japão.



Fonte: <https://cacadoresdelendas.com.br/japao/horyu-ji-um-dos-mais-antigos-templos-de-madeira-do-mundo/>

2.1.1 Importância do uso de madeira plantada para a sustentabilidade

A agenda 21 elaborada no final dos anos 80, com a realização da ECO-92 (Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento) sobre a construção sustentável propõe que as condições ambientais devem ser aumentadas para as gerações futuras; que toda a cadeia produtiva deva ser repensada, desde a extração da matéria-prima; os processos construtivos sejam aprimorados levando-se em consideração as condições de saúde e segurança dos trabalhadores; que haja redução da poluição; economia de energia e água; controle e diminuição da liberação de materiais perigosos no meio ambiente; aumento da qualidade e diminuição dos custos das construções (LOPES *et al.*, 2023 *apud* ÂNGULO *et al.*, 2002).

Em 2015, a ONU definiu a Agenda 2030, que possui 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas (UNEP, 2020). Entre eles, destacam-se os ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, 12 – Produção e Consumo Sustentáveis, e 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima, que tratam das metas de redução dos gases do efeito estufa (ODS BRASIL, 2022). Esses objetivos são importantes porque abordam a necessidade de um crescimento econômico com a proteção ambiental e a equidade social.

O aumento global da construção civil elevou as emissões de CO_2 a uma alta histórica de 10 gigatoneladas. O Relatório de Status Global de Edificação e Construção (Buildings-GSR) de 2022 conclui que o setor foi responsável por mais de 34% da demanda de energia e cerca de 37% das emissões de CO_2 relacionadas a energia e processos em 2021. Na Europa, o setor representa 40% das necessidades totais de energia no continente, sendo que cerca de 80% dessa energia provém de combustíveis fósseis. Para reduzir as emissões gerais, o setor de construção pode ajudar melhorando o desempenho energético dos edifícios, diminuindo a pegada de carbono dos materiais de construção e multiplicando os compromissos políticos, além de promover incentivos ao investimento em eficiência energética (ONU, 2022).

Nesse contexto, a madeira desempenha um papel fundamental na construção civil, sendo o único material de construção que apresenta um balanço negativo de CO_2 , ou seja, sequestra carbono da atmosfera. Cada metro cúbico de madeira consegue sequestrar, em média, 0,8 e 0,9 toneladas de CO_2 . Ao substituir outros materiais pela madeira, economiza-se 1,1 tonelada adicional de CO_2 que teria sido emitida ao se utilizar concreto, resultando em uma economia total de aproximadamente 2 toneladas de CO_2 (FERREIRA *et al.*, 2022).

No Brasil, o emprego da madeira em aplicações de longo prazo na construção civil ainda é pouco explorado (PUNHAGUI, 2014). Embora o país apresente um dos maiores índices de produtividade em florestas plantadas no mundo, com rendimentos de 29,7 m³/ha para pinus e 38,9 m³/ha para eucalipto (IBÁ, 2023), o setor da construção consome apenas 6,4% do volume total de madeira serrada e apilada produzida no país (FAO, 2021).

Segundo Mendes *et al.* (2018), as madeiras de lei, conhecidas como madeiras nobres, são próprias para a construção civil, devido a suas propriedades de resistência e durabilidade. Entretanto, a extração sem planos de manejo sustentável pode desencadear a escassez dessa matéria-prima na Mata Atlântica e na Floresta Amazônica, devido à expansão dos limites agrícolas e desenvolvimento predatório. Nesse cenário, as madeiras reflorestadas abriram um amplo mercado, como as plantações de pinus e eucalipto. Dessa forma, a madeira oriunda de florestas nativas foi gradualmente substituída por madeira proveniente de floresta plantada com espécies exóticas, que apresentavam um crescimento mais rápido e melhoramento genético para as características de produtividade (RAMPAZZO; SPONCHIADO, 2000).

Segundo o IBGE (2019), o Brasil possui cerca de 10 milhões de hectares de florestas plantadas, principalmente com espécies dos gêneros *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., que

representam aproximadamente 96% do total. Essa área corresponde apenas a 1,2% do território nacional e 2,0% da área total das florestas. Embora a maior parte dos plantios florestais seja em sistema de monocultura, as pesquisas têm avançado na área de sistemas agroflorestais e silvipastoris, demonstrando resultados positivos nos aspectos econômicos, ambientais e sociais. Algumas importantes funções das florestas plantadas são:

- Diminuição da pressão sobre as florestas nativas;
- Reaproveitamento de terras degradadas;
- Sequestro de carbono;
- Proteção do solo e água;
- Ciclos de rotação mais curtos em relação aos países com clima temperado;
- Maior homogeneidade dos produtos, facilitando a adequação de máquinas na indústria.

Portanto Demarzo *et al.*, (2017), a madeira, quando comparada a materiais como aço e o concreto, geralmente utilizados na construção civil, apresenta resultados satisfatórios em relação a aspectos ambientais, como a geração de resíduos e o consumo energético. Cerca de 75% da energia necessária para a produção de madeira serrada, que é a principal utilização da madeira de floresta plantada, é consumida na etapa da secagem. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre a madeira e outros materiais utilizados na construção civil.

Tabela 1. Comparação entre os materiais usualmente utilizados na construção civil.

Material	Consumo de Energia	Emissão de CO ₂	Poluição do ar	Resíduos sólidos	Impacto ambiental
Madeira	X	X	X	X	X
Aço	2,4X	1,45X	1,42X	1,36X	1,16X
Concreto	1,70X	1,8 X	1,67X	1,96X	1,97X

Fonte: Adaptado DEMARZO *et al.*, (2017).

2.2 TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA A CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA

A madeira, por ser um material natural, apresenta variações significativas em suas propriedades. Diferenças na resistência podem ser observadas em peças da mesma espécie e dimensão devido à relação entre resistência e densidade. Essas variações ocorrem em razão de fatores naturais de crescimento, como a presença de nós, que afetam a resistência da madeira. A localização e a dimensão dos nós também podem variar entre as peças, mesmo dentro da mesma espécie e floresta plantada (CURRY, 1969 *apud* CARREIRA; DIAS, 2006).

Diante disso, é imprescindível realizar uma avaliação rigorosa e coerente, por meio de métodos não-destrutivos, que possibilitam a aferição diretamente no elemento, sem a necessidade de extração de corpos-de-prova. Para a ABENDI (2018), os Ensaio Não Destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais para verificar defeitos e descontinuidades, por meio de princípios físicos definidos, sem modificar as suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais, não interferindo em seu uso posterior.

O módulo de elasticidade da madeira é uma propriedade fundamental que mede a capacidade do material de resistir à deformação quando submetido aos esforços. Também conhecido como módulo de Young, ele reflete a rigidez da madeira e sua capacidade de retornar à sua forma original após a aplicação de uma carga. Esse parâmetro é crucial no projeto estrutural, pois permite prever o comportamento de uma peça sob carga, auxiliando na determinação da capacidade de carga e na prevenção de deformações excessivas.

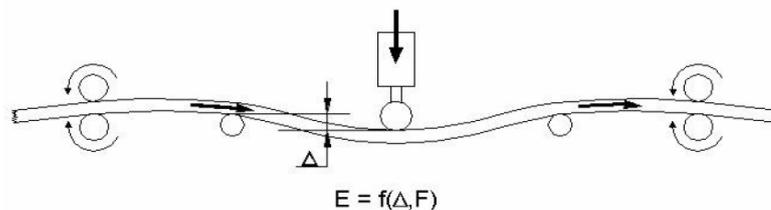
O módulo de elasticidade varia conforme a direção das fibras da madeira, sendo maior ao longo das fibras e menor perpendicularmente a elas. Conhecer e considerar essa propriedade é essencial para assegurar a segurança, durabilidade e eficácia de estruturas de madeira em diversas aplicações, desde construção civil até fabricação de móveis.

Existem diversas técnicas de avaliação não destrutiva que são utilizadas para determinar o módulo de elasticidade da madeira, como a técnica de ultrassom, ondas de tensão (*stress wave*), classificação pela máquina MSR (*machine stress rating*) e vibração transversal, que serão apresentadas posteriormente.

2.2.1 Tensões MSR (*machine stress rating*)

A classificação de tensão mecânica usa a máquina MSR (*Machine Stress Rating*) em um processo totalmente automatizado, no qual a madeira passa por diversos roletes. Durante a execução do ensaio aplica-se uma carga perpendicular (cilindro pneumático) ao eixo de menor inércia da seção transversal da peça, permitindo a medição do módulo de elasticidade para cada peça. A Figura 2 ilustra o esquema de operação do equipamento. Segundo Carreira *et al.*, (2003), o MSR deve ser utilizado para a classificação mecânica de peças com espessura de até 38 mm. A madeira classificada por esse método de tensão é submetida a uma inspeção visual adicional e é identificada como “MSR *lumber*”.

Figura 2. Esquema de funcionamento da máquina MSR.



Fonte: Carreira *et al.*, (2003).

A peça é posicionada na máquina MSR (*Machine Stress Rating*), onde o transdutor (*encoder*) faz a leitura de possíveis deslocamentos e imperfeições. A peça é então direcionada para dentro da máquina pelo cilindro de alimentação, percorrendo todo o interior do equipamento até chegar ao cilindro de carga. Em seguida, o cilindro de pressão é acionado para aplicar uma carga enquanto a peça permanece apoiada na direção e carga cilindros. O carregamento causa o deslocamento, e nesta fase o transdutor faz a leitura (FREITAS, 2004).

De acordo com Galligan *et al.* (2000), alguns dispositivos medem o módulo de elasticidade *MOE* e classificam a madeira com base no deslocamento vertical que ocorre para um pequeno vão, inferior ao comprimento da peça de madeira; outros medem em relação a um pequeno vão, mas consideram a média dos resultados obtidos ao longo de todo o

comprimento da peça. A forma como os dados são obtidos, analisados e informados pelo dispositivo influencia a especificação da classe de resistência. Portanto, a calibração do dispositivo com os testes estáticos é sempre necessária.

A máquina MSR possui alta produtividade, permitindo classificação de todas as peças em grande escala no processo de manufatura, tornando-se uma opção eficaz para uso na indústria madeireira, além dos produtos processados mecanicamente (GONG, 2019). O equipamento pode alcançar uma média de 300 m/minuto. No entanto, é importante destacar que o equipamento requer manutenções periódicas, e a aquisição implica avaliar o custo-benefício para a empresa (MASTELA *et al.*, 2023).

Carreira *et al.* (2003) classificaram 600 peças utilizando uma máquina MSR fornecida por uma fábrica de madeira. No mesmo estudo, o teste de flexão estática foi utilizado para obtenção do módulo de elasticidade estático (MOE_e). Com base nos resultados dos testes de flexão estática e MRS, o MOE_e estático e MOE_{tv} dinâmico foram comparados por regressão linear. Os autores assumem que ocorreram vazamentos de ar comprimido, impedindo a máquina de manter a força constante para altos valores de MOE .

Além do sistema MSR, há o sistema *MEL* (*Machine Evaluated Lumber*), que se diferencia pelo nome das classes, controle de qualidade e coeficientes de variação (MSR = 11% e MEL \leq 15%) para os valores do módulo de elasticidade (KRETSCHMANN; GREEN, 1999). Assim, para correlacionar o módulo de elasticidade com a resistência à flexão para uma determinada espécie de madeira, é essencial realizar testes prévios que meçam o módulo de elasticidade e determinem a resistência à flexão das peças.

2.2.2 Técnica de ultrassom

O método de ultrassom baseia-se na verificação da propagação de ondas ultrassônicas e sua relação com as constantes elásticas da madeira, como a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade. A técnica ultrassônica utiliza ondas acústicas com frequência superior a 20kHz (GONÇALEZ *et al.*, 2001; OLIVEIRA, 2001). Essa técnica tem sido explorada pela detecção de características que podem reduzir a resistência da madeira, como nós, inclinação de fibras e apodrecimento (EMERSON *et al.*, 1998).

Calegari (2006) explica que a propagação de ondas ultrassônicas ocorre por meio de um circuito eletrônico que emite pulsos elétricos. Esses pulsos são conduzidos por cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezoeletrico, localizado nos transdutores. As vibrações mecânicas se deslocam pelo material, atenuando o sinal emitido pelo gerador. O sinal retardado é recuperado por outro cristal piezoeletrico, sendo então amplificado e transformado em pulsos elétricos, permitindo a medição do tempo de propagação. A partir da distância e do tempo de percurso da onda sonora, calcula-se sua velocidade.

A medição de ondas ultrassônicas envolve o posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. A onda é introduzida no material por um dos transdutores e captada pelo outro, e a contagem de tempo realizada pelo próprio instrumento de ultrassom. O transdutor integra um elemento piezoeletrico que converte sinais elétricos em vibração mecânica (OLIVEIRA *et al.*, 2005). Segundo Carreira *et al.* (2003), a velocidade de propagação é determinada por:

C pode ser determinada pela seguinte Equação 1:

$$C = \frac{2 \cdot L}{\Delta t} \quad (1)$$

Sendo:

L é a distância entre os pontos de emissão e recepção da onda (m);

Δt é o tempo decorrido para a onda atravessar a madeira (s).

O valor do MOE (Equação 2) pode ser determinado usando a velocidade de propagação Equação 2:

$$MOE = C^2 \cdot \rho \quad (2)$$

Sendo:

C é a velocidade de propagação da onda (m/s);

ρ é a densidade da madeira (kg/m^3).

A Figura 3 apresenta um modelo de aparelho de emissão ultrassônica utilizado para avaliação não-destrutiva.

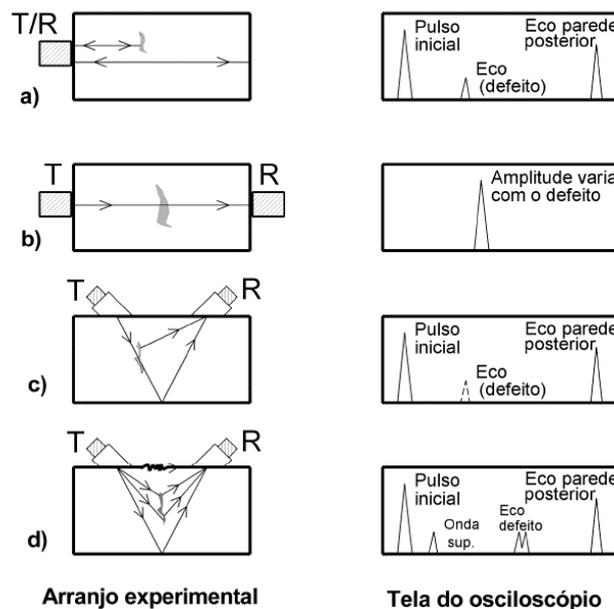
Figura 3. Equipamento para avaliação não-destrutiva por meio de emissão de ultrassom



Fonte: Ross et al., (1999).

A presença de imperfeições ou inclusões no material pode provocar a dispersão das ondas sonoras, resultando em ecos e reverberações. A detecção das ondas refletidas e dos ecos permite a identificação de possíveis defeitos no material (CARREIRA, 2022). A Figura 4 mostra os diferentes métodos de ensaio que podem ser utilizados na detecção de defeitos por meio do ultrassom.

Figura 4. Disposições dos transdutores no ensaio ultrassônico



Fonte: CARREIRA (2012) apud CARTZ (1996).

A frequência do sinal dependerá do material que será testado. A Quadro 1 apresenta as frequências comumente usadas para algumas aplicações.

Quadro 1. Bandas de frequências do ultrassom para algumas aplicações

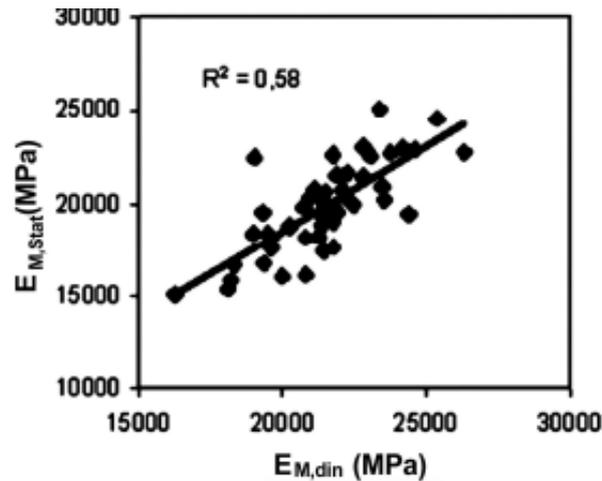
Bandas de frequência	Aplicações
200 KHz – 1 MHz	Metais de granulação grossa: Ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular, cobre e aço inoxidável.
400 KHz – 5 MHz	Metais de granulação fina: Aço alumínio e latão.
200 KHz - 2,25MHz	Plásticos e compósitos com plásticos
1 – 5 MHz	Produtos laminados: chapas, placas, barras.
2,25 – 10 MHz	Dobrados e extrudidos: barras, tubos e perfis.
1 – 10 MHz	Forjados.
2,25 – 10 MHz	Vidros e cerâmicas.
1 – 2,25 MHz	Soldas.
1 – 10MHz	Verificação de fadiga e trincas.

Fonte: CARREIRA (2012) *apud* CARTZ (1996).

Oliveira (2005) afirma que a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na madeira sofre uma significativa atenuação para frequências acima de 1 MHz. Essa atenuação é causada por diversos fatores, como a heterogeneidade da madeira, a presença de defeitos e a absorção das ondas por moléculas de água. A atenuação das ondas ultrassônicas limita o alcance da técnica de ultrassom na madeira, tornando importante trabalhar com frequências inferiores a 1 MHz para garantir a precisão dos resultados.

Miná *et al.* (2004) investigaram a aplicabilidade da técnica ultrassônica para avaliação do módulo de elasticidade dinâmico da madeira. Os autores avaliaram 15 postes de 7,5 m de comprimento (com diâmetro médio de 21 cm) e 35 postes de 9 m de comprimento (com diâmetro médio de 13,5 cm) da espécie *Eucalyptus citriodora*. Os ensaios dinâmicos foram realizados utilizando um aparelho *Sylvatest* com transdutores de 22 kHz. O Gráfico 1 demonstra a correlação entre o módulo de elasticidade estático e o dinâmico.

Gráfico 1. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico ($E_{M,din}$) e estático ($E_{M,stat}$) obtido por Miná et al (2004).



Fonte: CARREIRA (2012) apud MINÁ et al., (2004).

Os resultados demonstraram que a técnica ultrassônica é aplicável para avaliação do módulo de elasticidade dinâmico da madeira, apresentando uma correlação de 0,96 entre os valores do módulo de elasticidade estático e dinâmico. Os autores concluíram que a técnica ultrassônica é um método rápido e não destrutivo para avaliação do módulo de elasticidade dinâmico da madeira. A compreensão dos fatores que afetam a propagação das ondas ultrassônicas na madeira é de fundamental importância para o uso adequado da técnica, permitindo a escolha da frequência e das condições de ensaio mais apropriadas para cada aplicação.

A avaliação de estruturas de madeira utilizando a técnica de ultrassom é caracterizada por uma alta variabilidade nos resultados. Fatores como a frequência da onda, a pressão aplicada pelo operador, o contato entre transdutores e o elemento, bem como a natureza do material de acoplamento, influenciam na medição da velocidade. As alterações naturais da madeira e a presença de defeitos acrescentam incerteza e dispersão às medições (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

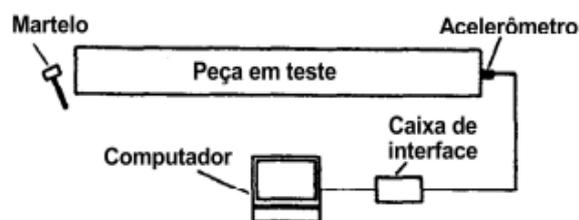
A técnica não destrutiva de ultrassom apresenta várias utilidades, como a determinação da existência de nós, decomposição, presença de ataque de micro-organismos ou insetos, direcionamento das fibras, avaliação de elementos estruturais de madeira em uso e estimativa de parâmetros como módulos de elasticidade e ruptura (GORNIAK; MATOS, 2000).

2.2.3 Ondas de tensão (*Stress Wave*)

A técnica de ondas de tensão é semelhante à de ultrassom, mas difere no fato de que as ondas são geradas por impacto, e não induzidas por transdutores, como ocorre na técnica de ultrassom, além de diferir na frequência das emissões (BODIG, 2001 *apud* MORALES, 2006). Ao empregar esta técnica, os principais parâmetros analisados são a velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material (TARGA *et al.*, 2005). O método pode ser utilizado em diversas situações, desde a árvore em pé até os produtos finais obtidos (WANG *et al.*, 2001).

Segundo Matos (1997), na aplicação e medição das ondas de tensão, dois transdutores acelerômetros são posicionados sobre o material a ser avaliado. Uma onda acústica é induzida ao material por meio do choque de um martelo, pêndulo ou outros materiais (Figura 5). Quando a onda alcança o acelerômetro de partida, uma contagem de tempo, em microssegundos, é iniciada pelo instrumento. Quando a onda atinge o acelerômetro de chegada, a contagem de tempo é interrompida, e o aparelho registra e mostra o tempo de trânsito da onda de tensão entre os acelerômetros, através do material.

Figura 5. Ensaio de ondas de tensão



Fonte: WANG *et al.*, (2004).

Os tempos registrados são usados para calcular a velocidade de propagação das ondas, de acordo com a Equação 3 a seguir:

$$MOE_d = \rho \cdot V^2 \cdot \frac{1}{g} \quad (3)$$

Sendo:

V é a velocidade de propagação da onda (m/s);

d é a distância entre os transdutores ou acelerômetros (m);

t é o tempo de propagação das ondas (s).

ρ é a massa específica do material;

g é a aceleração da gravidade (9,80665 m/s²).

A metodologia de ondas de permite distinguir entre a estrutura natural da madeira e patologias inerentes. Para aumentar a acurácia do método, alguns fatores devem ser considerados como a velocidade e atenuação em diferentes direções, as propriedades de reflexão nos contornos dos elementos anatômicos e a dispersão causadas pelas heterogeneidades do material (BERNDT *et al.*, 2000).

De acordo com Shimoyama (2005), a técnica de avaliação das propriedades da madeira por meio da propagação de ondas de tensão apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos acústicos, especialmente no que se refere ao equipamento utilizado, que é simples, portátil e facilita a avaliação em qualquer local, inclusive no campo, com baixo custo. Essa característica possibilita a aquisição do equipamento por pequenas indústrias para a avaliação não destrutiva de diversos produtos de madeira.

2.3 VIBRAÇÃO TRANSVERSAL

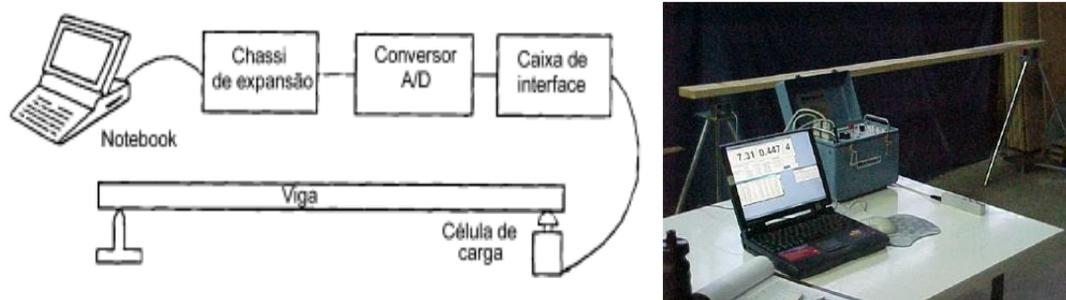
Segundo Ballarin e Gonçalves (2001) e Ballarin *et al.* (2002), a vibração transversal foi um dos primeiros métodos não destrutivos estudados para a determinação do módulo de elasticidade da madeira. Apesar de sua concepção simples, em comparação com métodos mais avançados, como o ultrassom e as ondas de tensão, a técnica da vibração transversal ainda se destaca como um método promissor, sobretudo pela forte aderência entre o modelo

físico do fenômeno e o correspondente modelo teórico matemático, além da possibilidade de aplicação em peças estruturais de dimensões reais (*in-grade testing*).

De acordo com os estudos de Wang *et al.* (2008), o teste de vibração transversal pode ser considerado o método não destrutivo mais eficiente de avaliação da madeira. O método apresenta valores confiáveis para o módulo de elasticidade e pode ser empregado nos mais variados tipos de madeira, independentemente da seção transversal (MURPHY, 2000).

Uma vibração mecânica é provocada quando o sistema se desloca da sua posição de equilíbrio estável. A tendência do sistema é retornar a essa posição sob a ação de forças restauradoras, no entanto, ao alcançar a posição original com certa velocidade, o sistema ultrapassa essa posição. Em um sistema ideal, sem a presença de forças dissipativas, o sistema continuaria o movimento oscilatório indefinidamente em torno de sua posição de equilíbrio (vibração livre não-amortecida). A Figura 6 mostra o esquema do equipamento para determinação do módulo de elasticidade através da vibração transversal (CARREIRA *et al.*, 2003).

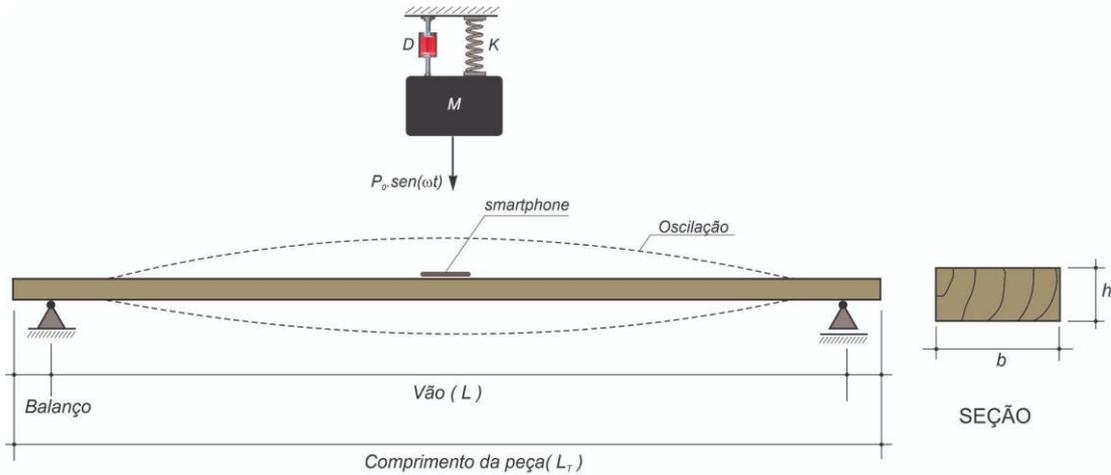
Figura 6. Esquema de um equipamento para a determinação do MOE por meio da vibração transversal.



Fonte: Carreira et al. (2003).

Para ilustrar o método da vibração transversal, Wang (2001) fez uma analogia entre o comportamento da vibração de uma viga biapoiada e a vibração de um sistema massa-mola amortecido com um grau de liberdade, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7. Sistema massa-mola e viga vibrando transversalmente.

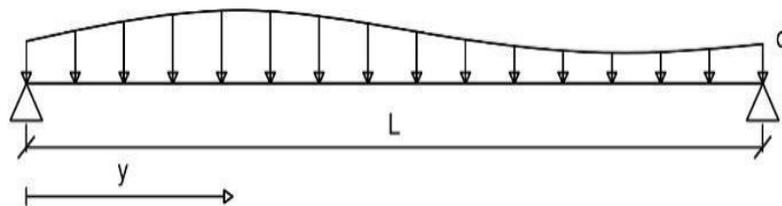


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 7, a massa M é suportada por uma mola de constante elástica K , e o amortecimento é representado por D . A função igualada a força de excitação $P_0 \text{sen } \omega t$ para a vibração forçada ou a zero para vibração livre. Quando M está em vibração livre, sua Equação (4) de movimento pode ser expressa por (TAMAZATO, 2017):

$$M \cdot \left(\frac{d^2 x}{dt} \right) + D \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right) + K \cdot x = 0 \quad (4)$$

Figura 8. Viga biapoiada carregada.



Fonte: Tamazato e Cheung (2017).

Da Figura 9, tem-se as seguintes equações:

$$\left(\frac{d^2 x}{dy^2} \right) = - \left(\frac{M}{EI} \right) \quad (5)$$

$$\left(\frac{d^2 M}{dy^2}\right) = -q \quad (6)$$

$$\left(\frac{d^4 x}{dy^4}\right) = -\frac{q}{EI} \quad (7)$$

A partir das forças inerciais, temos do movimento vibratório sob uma dada frequência circular ρ :

$$q = -\frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad (8)$$

Como admite-se movimento vibratório, de frequência circular ρ , tem-se:

$$x(y, t) = x(y) \cdot \cos(\omega t - \varphi_0) \quad (9)$$

Onde:

$$\varphi_0 = \text{ângulo de fase}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^2 x}{dt^2}\right) &= -\omega^2 \cdot x(y) \cdot \cos(\omega t - \varphi_0) \\ &= -\omega^2 \cdot x \end{aligned} \quad (10)$$

$$q = \frac{\gamma}{g} - (\omega^2 \cdot x) = \frac{\gamma}{g} \omega^2 \cdot x = -\omega^2 \cdot x \quad (11)$$

Substituindo (12) em (7):

$$\left(\frac{d^4 x}{dy^4}\right) = -\frac{\omega^2 \gamma}{EI \cdot g} x \quad (12)$$

$$k = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 \gamma}{EI \cdot g}} \quad (13)$$

$$x(y) = C_1 e^{ky} + C_2 e^{-ky} + C_3 \text{sen } ky + C_4 \text{cos } ky \quad (14)$$

Condição de contorno:

$$xy = 0 \rightarrow x = 0 \quad (15)$$

$$y = l \rightarrow x = 0 \quad (16)$$

$$x = 0 \rightarrow \frac{d^2x}{dy^2} = 0 \quad (17)$$

Aplicando as condições de contorno:

$$C_1 = C_2 = C_4 = 0 \quad (18)$$

$$C_3 \neq 0 \quad (19)$$

$$x = C_3 \text{sen } ky \quad (20)$$

Assim:

$$k = \frac{\pi n}{L} \quad (21)$$

Sendo:

$n = 1$, corresponde ao 1º modo;

$n = 2$, corresponde ao 2º modo;

$n = 3$, corresponde ao 3º modo.

Igualando (21) em (13):

$$\frac{\pi n}{L} = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 \gamma}{EI \cdot g}} \quad (22)$$

Como:

$$W = \gamma \cdot L \quad (23)$$

$$f_r = \frac{\omega}{2\pi} \quad (24)$$

$$\omega = f_r \cdot 2\pi \quad (25)$$

Resume-se (22) em:

$$f_r = \frac{\pi n^2}{2} \sqrt{\frac{EI \cdot g}{WL^3}} \quad (26)$$

Para n=1:

$$\left(\frac{\pi n^2}{2}\right)^2 = \left(\frac{\pi 1^2}{2}\right)^2 = 2,46 \quad (27)$$

Sendo assim (24) resulta em:

$$MOE_d = \frac{f_r^2 \cdot W \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad (28)$$

Sendo:

f_r é a frequência natural fundamental (Hz);

W é a massa da viga (kg);

L é o vão da peça (m);

I é o momento de inércia em relação ao plano de flexão considerado (cm⁴);

g é a aceleração da gravidade (9,8 m/s²).

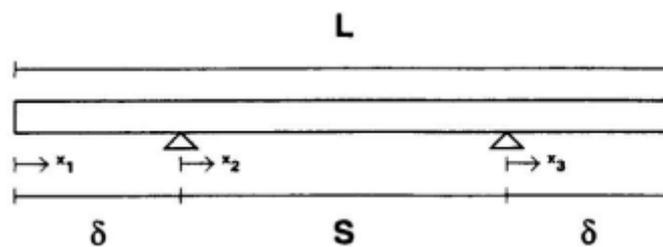
Pellerin (1965) estudou o uso da vibração transversal em vigas de madeira serrada para a determinação do módulo de elasticidade. O autor analisou a vibração transversal livre das peças com apoios nas extremidades e concluiu que a vibração transversal em vigas desse tipo é descrita por uma equação diferencial com solução analítica. O trabalho de Pellerin (1965) foi seguido por diversos outros estudos que utilizaram metodologia semelhante para a determinação do módulo de elasticidade em variadas espécies de madeira. Esses estudos

mostraram que o teste de vibração transversal é uma técnica confiável e eficiente, aplicável a diferentes espécies e condições de madeira.

Em um estudo conduzido por Ross *et al.* (1991), foi realizado um ensaio não destrutivo de vibração transversal em 30 vigas de *Spruce-Pine-Fir*. Os resultados obtidos foram comparados aos resultados de flexão estática, resultando em um coeficiente de correlação de 0,99. Esse valor indica uma forte correlação entre as duas técnicas, validando o método de vibração transversal como uma técnica precisa e confiável para a determinação do módulo de elasticidade da madeira.

Murphy (1997) apresentou uma solução numérica para a equação de frequência da vibração transversal de uma viga simplesmente apoiada com balanço simétrico (Figura 9). Uma aproximação analítica simples, válida para $1 \geq S/L \geq 0,85$, e razoável para $0,85 \geq S/L \geq 0,80$, pode ser utilizada para estimar o módulo de elasticidade e o momento de inércia de uma viga a partir das medições da frequência, geometria, balanço e peso. Essa aproximação resulta em uma estimativa conservadora do módulo de elasticidade e do momento de inércia.

Figura 9. Geometria de viga simplesmente apoiada com balanço simétrico.



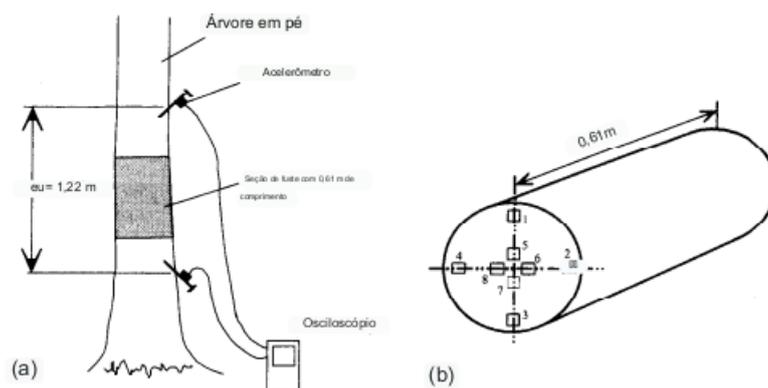
Fonte: Murphy (1997).

Wang *et al.* (2001) investigaram o uso de três técnicas para avaliar o módulo de elasticidade (*MOE*) de toras de pequeno diâmetro (Figura 10): flexão estática, vibração transversal e ondas de tensão. O estudo foi realizado em 159 toras, sendo 109 toras de *jack pine* (*Pinus banksiana* Lamb.) e 50 da espécie *red pine* (*Pinus resinosa* Ait). O diâmetro da parte mais delgada das toras variou entre 127 e 310 mm.

Os resultados mostraram que os coeficientes de determinação entre o MOE_e estático e o MOE_{tv} obtido com a técnica de vibração transversal foram 0,95 para o *red pine* e 0,85 para o *jack pine*. Esses valores indicam uma forte correlação entre as duas técnicas, sugerindo que o método de vibração transversal é mais preciso na avaliação do MOE do que o método das ondas de tensão. A técnica de vibração transversal demonstrou ser menos sensível às imperfeições geométricas das toras, o que pode explicar sua maior precisão.

Os resultados sugerem que o método de vibração transversal é uma técnica promissora para a avaliação do MOE_{tv} de toras de pequeno diâmetro, pois é não destrutiva, rápida, simples e mais precisa do que o método de ondas de tensão.

Figura 10. a) Arranjo experimental utilizado no ensaio de campo e b) padrão de corte para amostras de madeira pequenas



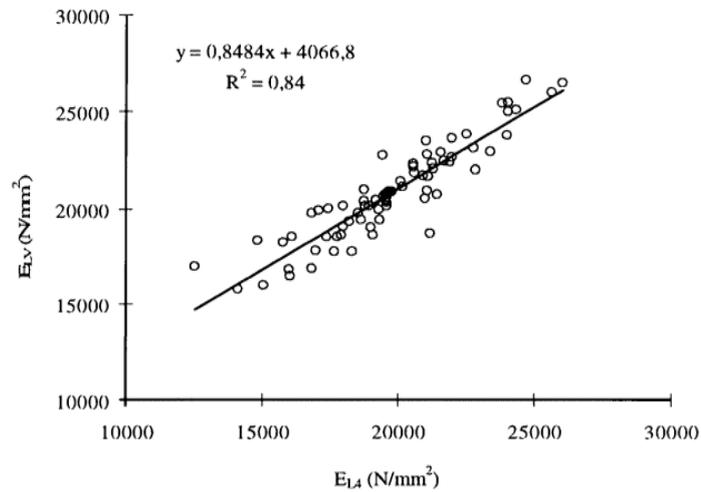
Fonte: Wang (2001).

Em um estudo publicado, Brancheriau *et al.* (2002) analisaram a vibração natural de vigas de madeira, apresentando os modelos teóricos mais comuns e discutindo sua faixa de validade, condições de aplicação e níveis de precisão. Os autores concluíram que diferentes modelos teóricos e suas soluções aproximadas permitem determinar, com precisão suficiente, o módulo longitudinal de elasticidade e o módulo de cisalhamento em vibrações transversais.

Com base em uma ampla gama de módulos de elasticidade, os autores observaram uma excelente correlação entre módulos dinâmicos e estáticos em amostras de madeira. Os resultados obtidos em madeira estrutural em tamanho real (60 x 155 x 3500 mm) de duas

espécies tropicais da Guiana Francesa também mostraram boas correlações, apesar de alguns valores discrepantes devido a defeitos na madeira, como nós, ângulo de grão ou falha de compressão (Gráficos 2 e 3).

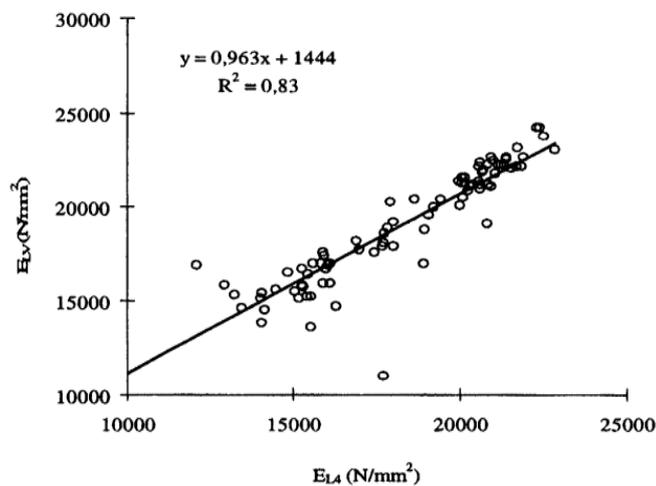
Gráfico 2. Relação entre o módulo de Young em flexão e elasticidade da vibração transversal.



Fonte: Brancheriau (2002).

O Gráfico 3, mostra a relação entre o módulo de Young em flexão de quatro pontos E_{L4} e o módulo de elasticidade da vibração transversal E_{LV} em madeira estrutural de tamanho real ($60 \times 155 \times 3500$ mm) de *Basralocus* (*Dicorynia guianensis* Amshoff, 76 vigas).

Gráfico 3. Relação entre o módulo de Young em flexão de quatro pontos E_{L4} e o módulo de elasticidade da vibração transversal E_{LV} .



Fonte: Brancheriau (2002).

A relação entre o módulo de Young em flexão de quatro pontos (E_{L4}) e o módulo de elasticidade da vibração transversal (E_{tv}) em madeira estrutural de tamanho real (60 × 155 × 3500 mm) de Mandioqueira (*Qualea* spp., 86 vigas).

Carreira *et al.* (2003) avaliaram a correlação linear entre os módulos estático e dinâmico de 600 peças estruturais de *Pinus* ssp., com dimensões nominais de 3,5 cm x 12,5 cm x 260 cm. Os autores observaram uma forte correlação entre os dados, com um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,98$, indicando que os dois módulos estão fortemente relacionados. Isso sugere que a vibração transversal é um método confiável para estimar a rigidez à flexão da madeira.

Calil Junior e Miná (2003) determinaram o módulo de elasticidade de 326 peças estruturais de *Pinus* sp. utilizando a técnica de vibração transversal. As vigas de madeira serrada apresentavam dimensões nominais de 3,8 cm x 13,9 cm x 302,3 cm e teor de umidade de 12%. Os ensaios dinâmicos foram realizados com o aparelho *E-computer 340 da Metriguard*. Após o ensaio dinâmico, o módulo de elasticidade foi medido pelo ensaio de flexão estática, com as vigas na condição biapoiada com carregamento centrado. A regressão linear entre os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos resultou em um coeficiente de correlação (R) de 0,98, o que indica uma forte correlação entre as duas técnicas, o que sugere que a vibração transversal é um método eficiente para estimar o módulo de elasticidade da madeira.

A Tabela 2 apresenta a média e o desvio-padrão para os resultados de módulo de elasticidade obtidos pelos métodos dinâmico e estático.

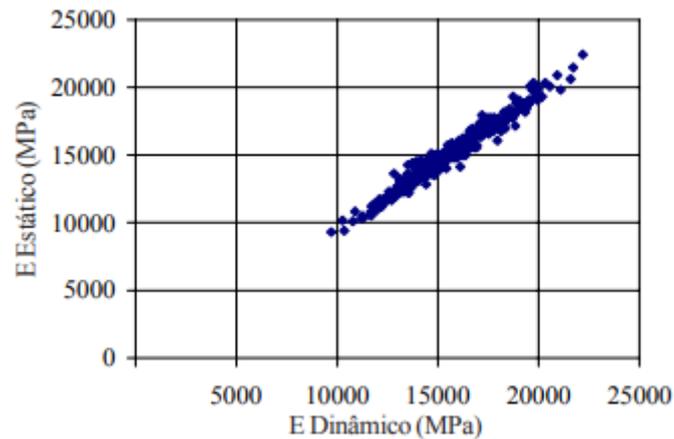
Tabela 2. Média e desvio-padrão para os módulos de elasticidade dinâmico e estático

	Elasticidade - MPa	
	Dinâmico	Estático
Média	15753,7	15270,2
Desvio- Padrão	2299,6	2363,4

Fonte: Calil Junior e Miná (2003)

Com base nos resultados obtidos para os módulos de elasticidade dinâmico e estático, foi traçado um diagrama de dispersão de E dinâmico versus E estático. A disposição dos pontos (E dinâmico; E estático) no gráfico mostra uma clara relação linear entre as duas grandezas.

Gráfico 4. Diagrama de dispersão: E dinâmico X E estático, de 326 peças estruturais de madeira *Southern Pine*.

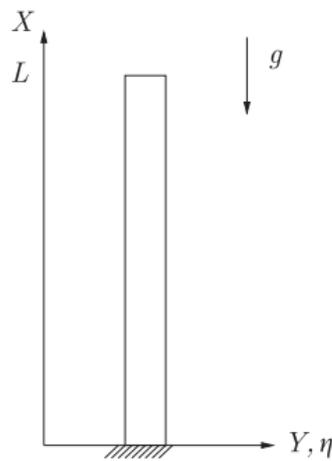


Fonte: Calil Junior e Miná (2003)

Hijmissen *et al.* (2008) investigaram as vibrações transversais de uma viga de Timoshenko em balanço (Figura 11), submetida a uma força de compressão linearmente variável. A força de compressão é gerada pela gravidade e pelo peso próprio da viga, sendo considerada pequena, mas não desprezível. As vibrações transversais da viga foram descritas por um problema de valor inicial e de contorno não linear. Aproximações da solução do problema foram desenvolvidas utilizando um método de perturbação de múltiplos escopos temporais.

As aproximações das frequências foram obtidas, e as frequências dos modos de ordem superior foram separadas em dois conjuntos. No primeiro conjunto, verificou-se que a diminuição na magnitude da frequência devido à força de compressão aumenta significativamente com o aumento do número do modo de vibração. Esta diminuição pode ser explicada pela presença de um novo modo de vibração, associado à força de compressão. No segundo conjunto, concluiu-se que a diminuição da magnitude das frequências é menos significativa em comparação com a do primeiro conjunto. Esse resultado pode ser atribuído à interação entre os modos de vibração associados à força de compressão e os modos de vibração de flexão da viga.

Figura 11. Um modelo simples de uma viga vertical em balanço



Fonte: Hijmisen et al., (2008)

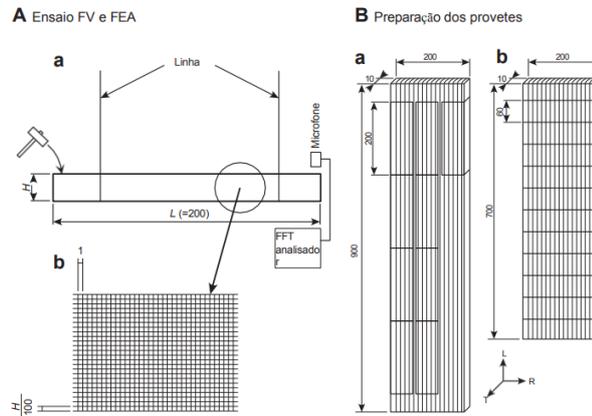
Murphy (2011) desenvolveu quatro equações para determinar a rigidez à flexão de madeira estrutural usando a vibração transversal. As equações foram derivadas a partir de um modelo físico da viga, que considera os efeitos da rigidez à flexão, da massa e da força de compressão linearmente variável. Assim, essas equações podem ser usadas para estimar a rigidez à flexão de madeira estrutural de forma rápida e precisa, sendo particularmente úteis para vigas com seção transversal complexa ou que não podem ser ensaiadas sob cargas permanentes.

Arriaga *et al.* (2014) demonstraram que as vibrações longitudinal e transversal podem ser usadas para prever as propriedades de flexão da madeira de *Pinus radiata* com precisão comparável aos ensaios mecânicos tradicionais. O método de vibração longitudinal é mais simples e apresenta algumas vantagens práticas, como ser não destrutivo e rápido, tornando-se uma ferramenta valiosa para a classificação de madeiras estruturais. Essa técnica permite a avaliação de grandes quantidades de material de forma rápida e eficiente e proporciona melhores resultados do que as regras de classificação visual, que são subjetivas e propensas a erros. As conclusões do estudo indicam que a vibração longitudinal é uma técnica promissora para a classificação de madeira estrutural.

Yoshihara e Yoshinobu (2015) investigaram as propriedades mecânicas por meio de ensaios de vibração livre à flexão sob a condição livre (Figura 12). A relação altura/comprimento (C/L) variou de 0,05 a 0,3. Os dados dos ensaios foram analisados numericamente, e a eficácia da equação considerando o cisalhamento. Essa equação diferencial parcial descreve o movimento de uma viga flexível e considera os efeitos da rigidez à flexão, da massa e da força de compressão linearmente variável. O módulo de Young (módulo de elasticidade, MOE) nas direções longitudinal (L) e radial (R) e o módulo de cisalhamento (SM) no plano LR foram calculados com base nas soluções rigorosas e aproximadas da equação de Timoshenko. Os resultados indicaram que a solução aproximada é mais precisa para relações comprimento/altura menores, enquanto a solução rigorosa é mais adequada para relações comprimento/altura maiores. O estudo confirma que a equação de vibração de Timoshenko é uma ferramenta útil para a determinação das propriedades mecânicas de vigas flexíveis influenciadas pela força cortante.

Yu *et al.* (2015) investigaram um método para medir o módulo de elasticidade de vigas lamelares coladas (MLC) usando o método de vibração. O método de vibração forçada foi empregado para medir a frequência natural de MLC na condição de apoio simples. Os resultados mostraram que o método de vibração é uma técnica viável para medir o módulo de elasticidade de MLC, sendo tão preciso quanto os métodos tradicionais (métodos de elementos finitos e método estático), com uma diferença máxima de 10%. As MLC utilizadas no estudo eram compostas por vigas de placa única de *Xingan Larch*, com dimensões de 30 mm x 150 mm x 2100 mm. O estudo indicou que a qualidade do sensor de aceleração usado no teste pode influenciar os resultados, e destacou que o método de vibração é uma técnica rápida, simples e conveniente para essa medição.

Figura 12. a) Esquemas do teste de FV e a FEA dos dados de FV (b). $H = 10, 20, 30, 40, 50$ e 60 mm. (B) Preparação dos espécimes do tipo L e (b) Espécimes do tipo R (mm).



Fonte: Yoshihara e Yoshinobu (2015)

Segundinho *et al.* (2017) investigaram a influência do teor de umidade na obtenção do módulo de elasticidade de vigas de madeira serrada de *Pinus sp.* por meio de ensaios de vibração transversal livre e flexão estática. Foram utilizadas 20 vigas com dimensões de 5 cm x 10 cm x 200 cm, extraídas de toras recém-abatidas de reflorestamento em São Paulo, condicionadas em ambiente controlado com temperatura entre 21,4 e 24,6 °C e umidade relativa de 55% a 65%. O teor de umidade a partir do qual não houve alteração significativa no módulo de elasticidade variou entre 25,42% e 36,95% para a flexão estática e entre 23,48% e 39,90% para a vibração transversal livre. A análise estatística mostrou equivalência entre as médias dos dois tipos de ensaio. O módulo de elasticidade longitudinal aparente estabilizou-se na faixa de variação do ponto de saturação das fibras (PSF), concluindo-se que altos teores de umidade acima do PSF não influenciam a classificação estrutural das peças de madeira.

Kouroussis *et al.* (2017) exploraram a viabilidade do uso da técnica de atualização de análise modal para determinar as propriedades mecânicas de uma viga de madeira. Essa técnica se baseia em medições da resposta em frequência (FRF) para estimar essas propriedades. Os resultados indicaram que o procedimento é eficaz para vigas de madeira, independentemente das condições de contorno (seja livres ou fixas), pois ambos os cenários mostraram tendências semelhantes. A aplicação de elementos de viga permitiu a estimativa do módulo de Young longitudinal e, em menor grau, dos módulos de cisalhamento. Outros parâmetros dinâmicos, como a massa específica e a rigidez à torção, tiveram pouca influência nas características modais da viga. Além disso, defeitos locais, como furos ou trincas,

demonstraram ter um impacto insignificante nas frequências naturais, evidenciando que o procedimento de atualização modal é apropriado até mesmo para vigas com defeitos.

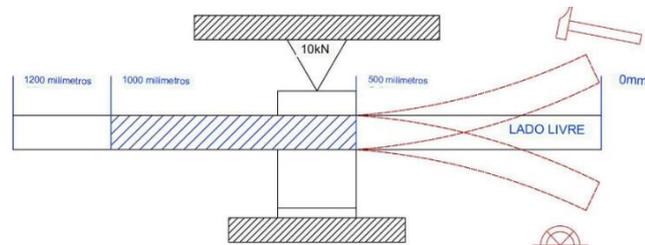
Franca *et al.* (2018) investigaram a viabilidade da aplicação da vibração transversal para a avaliação da rigidez à flexão e resistência da madeira estrutural. Utilizaram amostras de madeira de pinho do sul com espessura de 38 mm, condicionadas à temperatura e umidade ambiente antes de serem submetidas à vibração transversal. O módulo de elasticidade (*MOE*) foi estimado usando a frequência de oscilação e a densidade da madeira, e também foram determinados o *MOE* de flexão estática e a resistência à flexão para cada amostra. Os resultados demonstraram excelente correção entre os valores de *MOE* obtidos pela vibração transversal e pela flexão estática, bem como uma forte correlação entre os valores de resistência à flexão determinados pelos dois métodos.

Zhang *et al.* (2021) avaliaram a viabilidade de se estimar simultaneamente a rigidez à flexão e ao cisalhamento de vigas pré-fabricadas de madeira por meio de ensaios de vibração transversal, uma técnica não destrutiva. Utilizaram um total de 65 vigas de madeira em 13 configurações diferentes, condicionadas à temperatura e umidade ambiente antes do ensaio. A fórmula de frequência simplificada das vigas de Timoshenko foi implementada para estimar a rigidez à flexão e ao cisalhamento, mostrando que a fórmula foi capaz de estimar com precisão ambas as propriedades mecânicas.

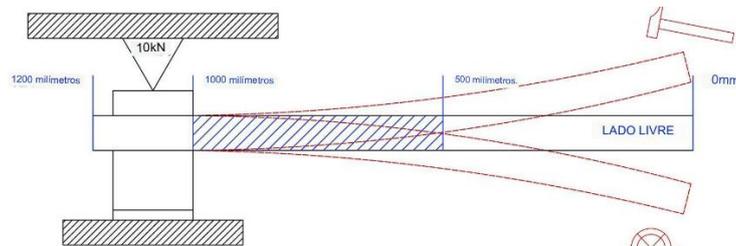
Acuña *et al.* (2023) estudaram o comportamento elástico de diferentes espécies de madeira (de baixa, média e alta densidade) através da determinação do módulo de elasticidade dinâmico com base nas frequências de vibração transversal em vigas em balanço (Figura 13). Os resultados foram comparados com ensaios de ultrassom e flexão estática, utilizando um total de 150 vigas de diferentes espécies e densidades. O estudo demonstrou que o módulo de elasticidade dinâmico determinado por meio das vibrações transversais apresentou alta correlação com os valores obtidos por ensaios de ultrassom e flexão estática, com um valor final de R^2 foi de 95,5% para o modelo de predição em função da densidade e frequência de vibração.

Figura 13. Configuração da viga *cantilever*:

a) comprimento inicial.



b) comprimento final.



Fonte: Acuna *et al.*, (2023)

2.3.1 Equações de soluções analíticas

Existem quatro equações que podem ser utilizadas para determinar a rigidez à flexão por meio da vibração transversal em diversos tipos de produtos de madeira. A equação mais relevante é destinada a produtos com seção transversal constante. A rigidez à flexão (EI) é calculada com base em dois termos: o primeiro utiliza a frequência fundamental e o comprimento do vão, considerando que o corpo de prova está simplesmente apoiado; o segundo termo refere-se à massa do corpo de prova por unidade de comprimento. Destaca-se que não é necessário especificar a forma da seção transversal para o cálculo do momento de inércia, pois este é uma função da área da seção transversal, independentemente da sua forma.

Conforme observado por Murphy (1997), a Equação (29) oferece uma excelente aproximação para as relações vão/comprimento $(S/L) \geq 0,80$. Além disso, outras equações

utilizam os mesmos dois termos da Equação (29), mas ajustam os cálculos com modificadores geométricos, ampliando a aplicabilidade das fórmulas para produtos com diferentes formas de seção transversal.

Pontos positivos:

- *Versatilidade:* A equação principal para produtos com seção transversal constante permite calcular a rigidez à flexão (EI) sem precisar especificar a forma da seção transversal, pois o momento de inércia depende da área e não da forma;
- *Simplicidade:* O cálculo da rigidez à flexão é simplificado ao utilizar apenas a frequência fundamental, o comprimento do vão e a massa do corpo de prova por unidade de comprimento;
- *Precisão:* A Equação (29) fornece uma excelente aproximação para relações vão/comprimento ($S/L \geq 0,80$), garantindo precisão para essa faixa;
- *Ajuste Geométrico:* Outras equações ajustam os cálculos com modificadores geométricos, permitindo a aplicação em produtos com diversas formas de seção transversal;
- *Aplicabilidade Ampliada:* As equações ajustadas ampliam a aplicabilidade das fórmulas para uma gama mais ampla de produtos de madeira, além das seções transversais constantes.

Produtos de seção transversal constante, Equação (29):

$$EI = \frac{f^2 S^4 W}{\pi^2 / 4 g L} \quad (29)$$

Painéis:

$$EI/b = \frac{f^2 S^4 W}{\pi^2/4 g L b} \quad (30)$$

Produtos de seção transversal retangular:

$$EI/b = \frac{f^2 S^4 W}{\pi^2/4 g L} \frac{12}{bh^3} \quad (31)$$

Assim:

$$E_0 = \frac{f^2 S^4 W}{\pi^2/4 g L} \frac{64\pi^3}{C_b^4} \frac{1}{\theta} \quad (32a)$$

Portanto:

$$\theta = \frac{(m^2 + 6mn + n^2)}{32} \frac{(1 + a + a^2)}{3} \quad (32b)$$

$$a = C_t / C_b$$

$$m = 2 + (a - 1)(1 + S/L) \quad (32b)$$

$$n = 2 + (a - 1)(1 - S/L)$$

Sendo:

b é a largura horizontal do espécime;

C_b é a circunferência na base da tora;

C_t é a circunferência da ponta do tronco;

E é o módulo de elasticidade;

EI é a rigidez à flexão;

E_0 é o módulo de elasticidade do tronco;

f é a frequência fundamental de vibração;

g é a constante gravitacional (980.665 cm/s², 386.089 in/s²);

h é a altura vertical do espécime;

I é o momento de inércia;

L é o comprimento do espécime;

S é o vão de apoio ($<L$);

W é o peso total do espécime;

π é uma constante de valor 3,1415926...

2.3.1.1 Produtos de seção transversal constante

Conforme a Equação (29), esta é aplicável a todos os elementos de madeira e madeira-plástico com seção transversal constante, incluindo vigas em formato “I” e “T”, assim como membros de madeira lamelada colada (MLC). A equação considera o plano de vibração, com o membro posicionado na borda. Não é necessário conhecer o momento de inércia para essa aplicação, pois o deslocamento é a variável mais relevante para fins de engenharia. Dessa forma, a rigidez à flexão (EI) é utilizada diretamente, sem a necessidade de isolar o módulo de elasticidade.

Essa abordagem simplifica a análise estrutural, pois permite o uso direto da rigidez à flexão (EI) nas aplicações, evitando cálculos adicionais que exigiriam a separação do módulo de elasticidade do material.

2.3.1.2 Painéis

Conforme a Equação (30), esta é utilizada para produtos de painel. O painel deve ser submetido à vibração em apenas uma dimensão, de modo que sua resposta seja similar à de uma viga muito larga. É essencial garantir que o painel não vibre em duas direções ao mesmo tempo, pois isso pode comprometer a precisão dos resultados. Nesse contexto, a rigidez à flexão (EI) por unidade de largura continua sendo parâmetro crítico para determinar o deslocamento, tornando desnecessário o conhecimento específico do momento de inércia, especialmente no caso de painéis compensados.

2.3.1.3 Produtos de seção transversal retangular

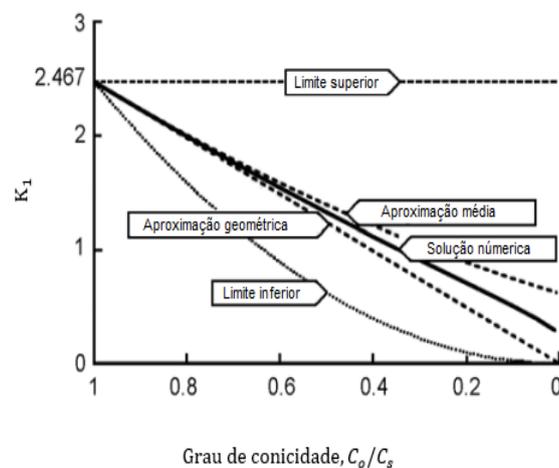
A equação (31) é aplicável a madeira aparelhada, bem como qualquer membro sólido serrado (ou madeira-plástico) que tenha uma seção transversal retangular. No caso de vigas de

madeira-plástico ou madeira lamelada colada (MLC), o módulo de elasticidade considerado é um módulo efetivo, pois presume-se que as propriedades do material sejam uniformes ao longo de toda a seção transversal bruta. Para alguns compostos de madeira-plástico, o módulo de elasticidade pode variar entre a pele e o núcleo; entretanto é possível determinar o módulo de elasticidade eficaz para uma seção transversal específica.

2.3.1.4 Toras com e sem conicidade

A Equação (32a, b, c) é utilizada para a análise de toras, incluindo aquelas com conicidade ($\theta=1$) ou sem formato cônico. Quando a circunferência da ponta do tronco é igual à circunferência da base, temos $\theta=1$. O segundo termo da Equação, incorpora o volume de um cilindro cônico em comparação com o de um cilindro reto. O primeiro termo no lado esquerdo da equação considera as medições das circunferências da ponta e da base do tronco, em vez das áreas de apoio, bem como o efeito da conicidade na raiz fundamental da equação de frequência. Embora este termo seja tecnicamente o mais preciso, se a razão entre a circunferência da ponta e da base for maior ou igual a 0,80, o tronco pode ser tratado como um cilindro reto ($\theta=1$) com uma circunferência constante, equivalente à média das circunferências da ponta e da base, como uma excelente aproximação (MURPHY, 2000). Conforme mostrado no Gráfico 5.

Gráfico 5. Raiz fundamental transformada da equação de frequência como uma função do grau de conicidade. C_s , circunferência do tronco no suporte próximo ao toco; C_o , circunferência do tronco no suporte próximo à ponta.

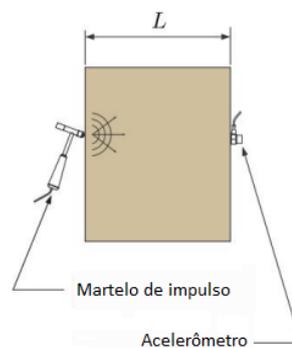


Fonte: Adaptado MURPHY (2011).

2.3.2 Técnicas de vibração existentes para a avaliação das características da madeira

O método de vibração envolve a excitação da estrutura por meio de impactos com um martelo em vários pontos do corpo de prova de madeira, com o objetivo de induzir uma onda de tensão (stress wave). O sinal de aceleração é então medido utilizando pequenos acelerômetros (Figura 14). Na aplicação deste método para a inspeção de madeira, deve-se levar em conta a alta atenuação do material, que intensifica com frequências elevadas. Entretanto, as transmissões em alta frequência demonstram maior sensibilidade a defeitos internos, como nós ou outras imperfeições.

Figura 14. Dispositivo geralmente utilizado para o método de vibração



Fonte: Adaptado de KOUROUSSIS (2017).

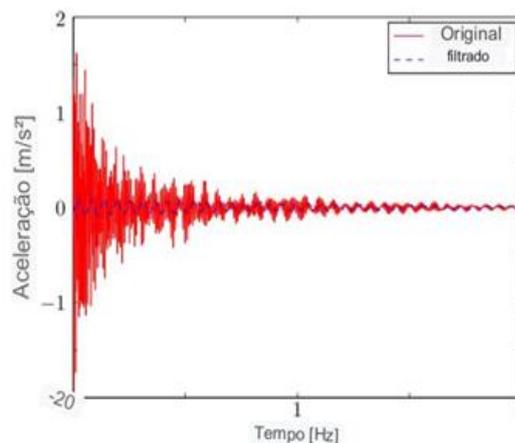
A seleção da gama de frequências resulta de um equilíbrio entre o nível de atenuação (para pequenos ou grandes vãos) no comprimento L estudado e a sensibilidade a defeitos. A análise do espectro de frequência pode ser empregada para avaliar e quantificar a deterioração da madeira. Quando os modos fundamentais são de interesse, há fórmulas específicas que estabelecem relações próximas entre o módulo de Young e o modo fundamental analisado.

As propriedades mecânicas de uma estrutura de madeira podem ser determinadas experimentalmente por meio de testes de vibração forçada ou ambiente, utilizando propriedades dinâmicas ou métodos de identificação modal. Esses métodos têm sido aplicados com sucesso em diversas situações estruturais. Yang *et al.* (2003) propuseram o uso da forma da onda de vibração de flexão de vigas de madeira no primeiro modo como um

indicador primário. O módulo dinâmico de elasticidade das seções das vigas estudadas foi calculado a partir da razão da curvatura da forma modal correspondente. Utilizando uma viga em balanço, Wang *et al.* (2012) detectaram o primeiro modo de flexão da viga, utilizando uma técnica simples baseada na medição da resposta ao impulso.

O Gráfico 6 apresenta o módulo de Young e a taxa de amortecimento estimados. A principal dificuldade consiste em isolar o primeiro modo de flexão entre todos os modos de flexão registrados (e eventualmente modos de torção se a simetria não for verificada). O uso de um filtro torna-se claramente necessário, dada a falta de conhecimento preciso sobre a frequência de corte.

Gráfico 6. Exemplo de uma aceleração medida em uma viga de madeira em balanço devido a um impacto



Fonte: Adaptado de KOUROUSSIS (2017).

Além disso, o método proposto deve ser aplicado a espécies de madeira em condições de teste de laboratório. Um método similar foi usado por Wang *et al.* (2005), voltado para medições *in situ*. Um modelo analítico foi derivado da teoria flexão de vigas para correlacionar a frequência de ressonância associada. Um teste de impacto não destrutivo alternativo, baseado em formas de modo de seção transversal, foi apresentado por Alves *et al.* (2013), permitindo a determinação do módulo de Young transversal de espécies de madeira.

2.3.3 Análise modal teórica de vigas retas

Segundo He e Fu (2001), a análise modal é uma técnica que permite identificar as propriedades dinâmicas intrínsecas de um sistema, como frequências naturais, fatores de

amortecimento e modos de vibração. Essas propriedades são essenciais para a construção de um modelo matemático que descreve o comportamento dinâmico do sistema. Conforme Silva (2000), a vibração é definida como um movimento periódico ou oscilatório de um sistema mecânico, podendo ser livre, quando ocorre sem a influência de uma força externa, ou forçada, quando está sob a influência de uma força externa.

De acordo com Rao (2008), as vibrações podem ser classificadas de várias formas, incluindo vibração livre e forçada, com ou sem amortecimento, linear e não linear, determinística ou aleatória. A vibração de um sistema envolve a transferência alternada de energia potencial para energia cinética, sendo que em sistemas amortecidos, parte dessa energia é dissipada no componente responsável pelo amortecimento.

Silva (2000) define o grau de liberdade de um sistema dinâmico como o número mínimo de coordenadas independentes necessárias para descrever completamente o movimento de todos os pontos do sistema em um determinado instante de tempo. Rao (2011) distingue entre sistemas discretos, que possuem um número finito de graus de liberdade, e sistemas contínuos, que possuem um número infinito de graus de liberdade. Nascimento (2011) complementa afirmando que os sistemas discretos são descritos por equações diferenciais ordinárias, enquanto os sistemas contínuos são fundamentados por equações diferenciais parciais.

2.3.3.1 Modelos discretos

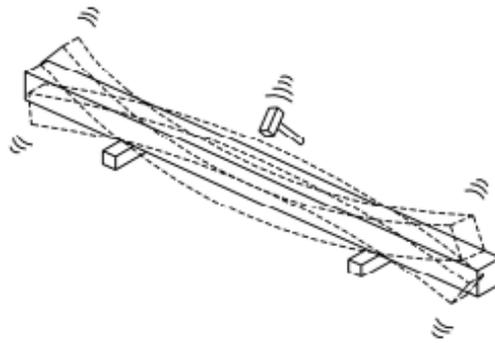
Todas as estruturas reais possuem, teoricamente, um número infinito de graus de liberdade, o que demandaria um número igualmente infinito de coordenadas para descrever suas posições em um instante específico no tempo. No entanto, nem todos os modos de vibração da estrutura são relevantes, pois muitos deles não são excitados ou apresentam amplitudes de deslocamento insignificantes. Além disso, o amortecimento é maior nos modos superiores. Dessa forma, dependendo da complexidade do problema, o modelo físico do sistema dinâmico pode ser simplificado para incluir apenas alguns graus de liberdade, ou até mesmo um único grau de liberdade.

Conforme Beards (1995), na modelagem de uma estrutura real, é comum adotar várias simplificações para obter as informações desejadas de forma rápida e com um nível aceitável

de precisão. Por exemplo, a massa distribuída ao longo da estrutura pode ser considerada concentrada em pontos específicos, o efeito do amortecimento pode ser desconsiderado, e uma mola não linear pode ser tratada como linear dentro de um determinado intervalo de deformação.

Uma viga em vibração transversal livre pode ser representada como um sistema discreto de massas e molas, no qual a massa da viga é distribuída nos pontos nodais dos modos de interesse, conforme ilustrado na Figura 15.

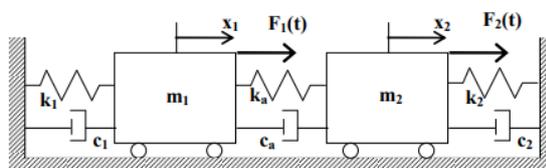
Figura 15. Viga em vibração transversal.



Fonte: Íñiguez Gonzáles *et al*, (2007).

A Figura 16 apresenta um exemplo de um sistema discreto com dois graus de liberdade, submetido a duas forças de excitação, $F_1(t)$ e $F_2(t)$. O sistema é composto por duas massas m_1 e m_2 , que estão conectadas por uma mola de rigidez k_a e um amortecedor com amortecimento c_a . As massas estão fixadas nas extremidades por molas com rigidezes k_1 e k_2 , e por amortecedores com coeficientes de amortecimento c_1 e c_2 , respectivamente, que são definidos pelas condições de contorno do problema.

Figura 16. Modelo discreto com dois graus de liberdade.



Fonte: Carreira (2012).

Considerando amortecimento viscoso e aplicando a segunda Lei de Newton obtém-se a Equação (33) de equilíbrio:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_a & -c_a \\ -c_a & c_2 + c_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_a & -k_a \\ -k_a & k_2 + k_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{Bmatrix} \quad (33)$$

Ou ainda empregando uma representação mais compacta, Equação (34):

$$[M] \langle \ddot{x} \rangle + [C] \langle \dot{x} \rangle + [K] \langle x \rangle = \langle F(t) \rangle \quad (34)$$

Sendo:

$[M]$ é a matriz de massa;

$[C]$ é a matriz de amortecimento;

$[K]$ é a matriz de rigidez;

$\langle F(t) \rangle$ é o vetor das ações dinâmicas;

$\langle \ddot{x} \rangle$ é o vetor das acelerações;

$\langle \dot{x} \rangle$ é o vetor das velocidades;

$\langle x \rangle$ é o vetor dos deslocamentos.

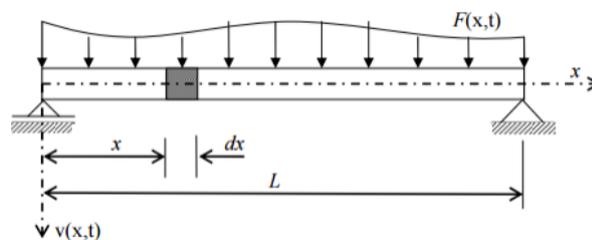
Constata-se que a matriz de massa $[M]$ é diagonal de ordem n , o que não ocorre com as matrizes de rigidez $[K]$ e amortecimento $[C]$ devido ao acoplamento da mola (k_a) e do amortecedor (c_a). A presença de c_a e (k_a) que conectam as massas m_1 e m_2 , faz com que os dois sistemas de um grau de liberdade se comportem como um único sistema de dois graus de liberdade. Esse acoplamento entre as coordenadas x_1 e x_2 resulta em uma complexidade significativa na resolução direta do sistema, uma vez que os efeitos se tornam interdependentes.

2.3.3.2 Modelos contínuos

Segundo Rao (2006), em sistemas discretos, a massa, o amortecimento e a rigidez da mola são considerados concentrados em pontos específicos do sistema. Em contrapartida, em sistemas contínuos, esses parâmetros são distribuídos ao longo do comprimento dos elementos.

Seja uma viga reta em vibração transversal como ilustrada na 17.

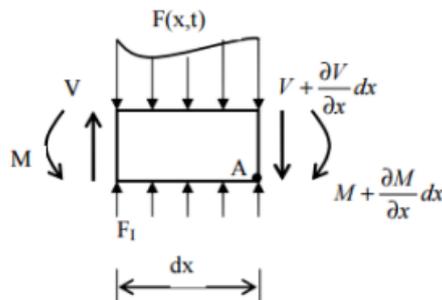
Figura 17. Viga em vibração transversal.



Fonte: Amorim (2015) *apud* Clough e Penzien (2003).

A viga apresentada na Figura 18 possui duas propriedades físicas importantes: a rigidez à flexão $EI(x)$ e a massa por unidade de comprimento $m(x)$. Essas propriedades variam ao longo do comprimento da viga. O carregamento $F(x,t)$ pode variar tanto no tempo quanto no espaço., fazendo com que os deslocamentos transversais também sejam funções dessas variáveis. A Equação do movimento (35) para essa viga pode ser derivada pelo equilíbrio das forças em um elemento infinitesimal dx .

Figura 18. Forças em um elemento infinitesimal dx .



Fonte: Carreira (2008).

$$m(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (35)$$

Sendo:

$m(x)$ é a massa por unidade de comprimento;

$u(x,t)$ é o deslocamento transversal da viga;

E é o módulo de elasticidade do material da viga;

$I(x)$ é o momento de inércia da seção transversal;

x é a coordenada na direção longitudinal da viga;

t é o tempo.

Tendo a equação (36) uma função de duas variáveis, a solução dessa equação pode ser representada por uma função de duas variáveis.

$$u(x,t) = A(x) q(t) \quad (36)$$

Em que:

$q(t)$ = variação do movimento no tempo.

$$q(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t \quad (37)$$

$$q(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t \quad (38)$$

$A(x)$ = amplitude do deslocamento ao longo do comprimento;

$$A(x) = C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x + C_5 \cosh \lambda x + C_6 \sinh \lambda x \quad (39)$$

Sendo:

C_1 a C_6 são constantes;

ω é a frequência circular natural de vibração;

λ é a constante de separação.

Aplicando as condições iniciais encontram-se C_1 e C_2 , e com as condições de contorno encontram-se C_3 a C_6 .

A constante de separação de variáveis é relacionada com as frequências naturais pela equação (40).

$$\lambda^4 = \frac{\omega^2 m(x)}{EI} \quad (40)$$

2.3.4 Fatores que afetam o ensaio de vibração transversal

2.3.4.1 Amortecimento

Os ensaios de vibração transversal em vigas de madeira bi-apoiadas são amplamente empregados na prática. Nesta configuração, a viga não está perfeitamente apoiada nas extremidades, o que resulta em uma certa quantidade de balanço em cada apoio. Em um estudo realizado em 1997, Murphy investigou o efeito de balanços de mesmo comprimento nas extremidades de uma viga bi-apoiada e desenvolveu uma solução numérica para a determinação do módulo de elasticidade (E) da viga, levando em consideração esses balanços.

Murphy (1997), observou que, para balanços pequenos ($0,85 \leq L_{\text{apoio}}/L \leq 1$), a solução numérica converge para a aproximação analítica encontrada por Timoshenko (1974). Isso indica que, sob essas condições, o módulo de elasticidade E da viga pode ser calculado pela Equação (41).

$$E_{M,VT} = \frac{f_1^2 \cdot \rho \cdot A \cdot L \cdot L_{\text{apoio}}^3}{K_1 \cdot I} \quad (41)$$

Sendo:

$E_{M,VT}$ = módulo de Young obtido com a técnica de vibração transversal (Pa);

f_1 = frequência natural do primeiro modo de vibração (Hz);

L = comprimento da viga (m);

L_{apoio} = distância entre apoios (m);

ρ = densidade do material (kg/m^3);

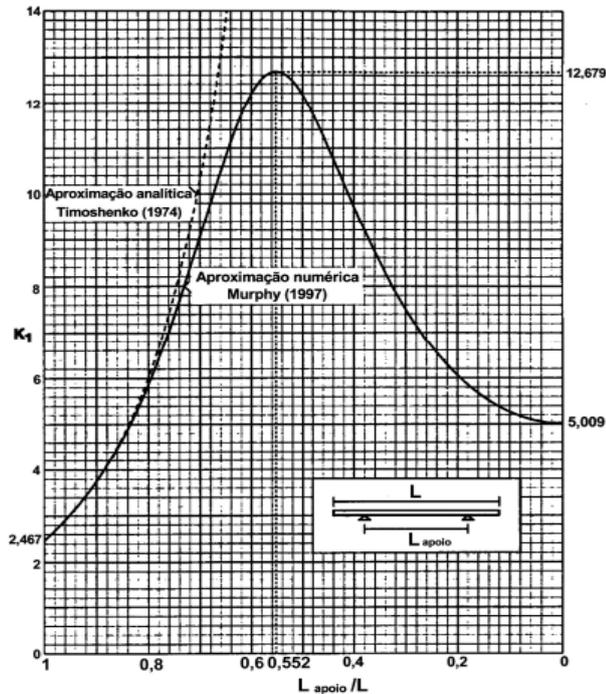
A = área da seção transversal (m^2);

I = momento de inércia da seção transversal (m^4);

$$K_1 = \frac{(\lambda L)^4}{4\pi^2} = 2,476 \text{ (para condições bi-apoiada com } 0,85 \leq L_{apoio}/L \leq 1);$$

O Gráfico 7 mostra os valores de K_1 encontrados por Murphy (1997) e por Timoshenko (1974) em função da relação L_{apoio}/L .

Gráfico 7. Valores de K_1 em função da relação L_{apoio}/L .



Fonte: Murphy (1997).

2.3.4.2 Influência da inércia a rotação e do esforço cortante

De acordo com Hu e Hsu (1996), *apud* Cho (2007), as tensões de cisalhamento tornam-se insignificantes quando o comprimento da viga é superior a 20 vezes a sua altura. Isso implica que, nessas condições, os efeitos das tensões de cisalhamento podem ser desconsiderados sem comprometer a confiabilidade do ensaio.

No entanto, Zangiácomo (2007) afirma que, em toras de madeira, as tensões de cisalhamento podem ser desconsideradas quando a razão entre o comprimento e o diâmetro é maior que 18. Diversos autores, incluindo Hearmon (1958), Nederveen e Schwarzl (1964), Brancheriau e Bailleres (2002) e Kubojima *et al.* (2004), fazem referência ao trabalho de Goens (1931), que desenvolveu uma equação transcendental para o cálculo exato do módulo de elasticidade de uma viga, considerando os efeitos do cisalhamento e da inércia à rotação.

A equação proposta por Goens (1931) *apud* Nederveen e Schwarzl (1964):

$$\left(\frac{\tan \frac{1}{2} \beta k}{\tanh \frac{1}{2} \alpha k} + \frac{\beta \varphi}{\alpha \varepsilon} \right) \left(\frac{\tan \frac{1}{2} \beta k}{\tanh \frac{1}{2} \alpha k} + \frac{\alpha \varepsilon}{\beta \varphi} \right) = 0 \quad (42)$$

Com:

$$\alpha, \beta = [(\beta^2 k^4 + 1)^{1/2} \pm Ak^4]^{1/2} \quad (43)$$

$$\varphi \varepsilon = (\beta^2 k^4 + 1)^{1/2} \pm Bk^2 \quad (44)$$

$$A, B = \frac{1}{2} \frac{i^2}{L^2} \left(\frac{\eta E}{G} \pm 1 \right) \quad (45)$$

Sendo:

ω é a frequência natural do primeiro modo;
 L é o comprimento da viga;
 ρ é a densidade do material;
 k é a constante obtida pela solução da Equação (42);
 i é o raio de giração da seção transversal.

2.3.4.3 Influência da inércia a rotação e do esforço cortante

De acordo com Murphy (2000), o impacto da rigidez do sistema de suspensão nas frequências naturais de vibração está relacionado à relação entre a rigidez do apoio (K) e a rigidez da viga (EI/L^3), onde E é o módulo de elasticidade, I é o momento de inércia da seção

transversal da viga e L é o comprimento da viga. A frequência de oscilação do sistema aumenta conforme a relação $(KL^3)/(EI)$ cresce. Segundo Frýba (1999), Timoshenko (1926) foi pioneiro na análise do impacto dos apoios elásticos no comportamento de vigas em vibração transversal.

Para uma viga de Bernoulli que está uniformemente apoiada sobre uma fundação elástica (Figura 19), as frequências naturais podem ser determinadas usando a Equação (46), conforme descrito por Clough e Penzien (1995). Essa equação considera a interação entre a rigidez da fundação e as características estruturais da viga, proporcionando uma compreensão mais detalhada do comportamento vibracional do sistema.

$$\omega_n \left[(\lambda L)^4 \frac{EI}{\rho A L^4} + \frac{\bar{K}}{\rho A} \right] \quad (46)$$

Sendo:

ω_n é a frequência natural de vibração do n-ésimo modo;

λL é obtido na tabela de frequências naturais e modos normais de algumas vigas prismáticas;

E é o módulo de elasticidade da viga;

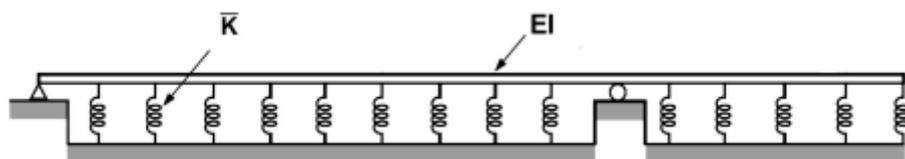
I é o momento de inércia da área da seção transversal;

ρ é a densidade aparente do material da viga;

L é o comprimento da viga;

\bar{K} é a rigidez do sistema de suspensão por unidade de comprimento.

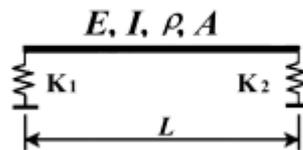
Figura 19. Viga apoiada sobre base elástica



Fonte: Carreira (2012) apud Clough e Penzien (1995).

Karnovsky e Lebed (2001) apresentam equações exatas para o cálculo das frequências naturais e dos modos de vibração de vigas de Bernoulli apoiadas em ambas as extremidades por apoios elásticos (Figura 20). Essas equações foram desenvolvidas por Anan'ev (1946) e Gorman (1975).

Figura 20. Viga sobre dois apoios elásticos posicionados nas extremidades



Fonte: Carreira (2012) apud Karnovsky e Lebed (2001).

As frequências naturais de uma viga de Bernoulli suspensa, conforme mostrado na Figura 27, podem ser obtidas a partir da Equação (47):

$$\omega_n = \frac{(\lambda L)_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (47)$$

Sendo:

- ω_n é a frequência natural do n-ésimo modo;
- L é o comprimento da viga;
- E é o módulo de elasticidade da viga;
- I é o momento de inércia da área da seção transversal;
- ρ é a densidade do material;
- A é a área da seção transversal.

2.4 APLICAÇÃO DO SMARTPHONE NA ENGENHARIA

O *smartphone* é um dispositivo eletrônico portátil que combina as funcionalidades de um telefone celular com as capacidades de um computador pessoal. Esses dispositivos são altamente integrados, possuem significativo poder computacional, grande capacidade de memória e são equipados com uma variedade de sensores, tornando-os atraentes para aplicações na área de monitoramento, onde os dados devem ser registrados, processados, armazenados, transmitidos e visualizados (MORGENTHAL e HÖPFNER, 2012).

No Brasil, atualmente há mais de um *smartphone* por pessoa, com 249 milhões de aparelhos de celular em uso, enquanto a população é de 207,8 milhões de habitantes (FGV, 2022; IBGE, 2022). Segundo Rambaldi (2009), as mudanças na sociedade moderna ocorrem por meio de inovações tecnológicas, entendendo-se a inovação não apenas como algo novo, mas como o aproveitamento e aperfeiçoamento do que já existe para atender a novas necessidades e situações.

Com o crescimento e popularização dos avanços tecnológicos dos *smartphones* na última década, muitos aplicativos foram desenvolvidos para as mais variadas finalidades e ramos de atividades. A capacidade de multitarefa, associada ao baixo custo e à simplicidade operacional, torna o *smartphone* uma ferramenta indispensável, ampliando ainda mais suas possibilidades de aplicação no campo da engenharia (RIBEIRO, 2019).

Oliveira *et al.* (2017) usaram *smartphones* para analisar as condições de superfície em rodovias do estado do Ceará. O objetivo do estudo foi determinar as condições de superfícies de rodovias pavimentadas com concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), tratamento superficial duplo (TSD) e concreto-cimento, e de rodovias não pavimentadas. O trabalho foi realizado utilizando um dispositivo móvel que mediu as irregularidades do pavimento. Os resultados mostraram que as medições obtidas com o dispositivo móvel eram semelhantes às fornecidas pelos órgãos rodoviários, indicando que os *smartphones* podem ser usados para avaliar as condições da superfície de rodovias de forma rápida e eficiente, além de permitir a coleta de dados em tempo real, melhorando o planejamento e a manutenção de rodovias.

Pravia e Braido (2015) desenvolveram um método inovador para medir as características de vibração de pontes estruturais utilizando *smartphones*. O procedimento baseia-se na excitação natural das estruturas para capturar dados de vibração por meio de acelerômetros embutidos nos *smartphones*. A técnica foi testada em três pontes diferentes, e os resultados demonstraram que esse método conseguiu medir as características de vibração das pontes com a mesma precisão dos dispositivos de medição tradicionais, além de demandar menos tempo para realizar as medições em comparação aos métodos convencionais.

Muliterno *et al.* (2019), utilizaram *smartphones* para averiguar o Índice de Irregularidade Internacional (IRI) de pavimentos sobre pontes, empregando os acelerômetros integrados nesses dispositivos para adquirir dados de aceleração e determinar a irregularidade através de procedimentos numéricos. As medições foram realizadas em três pontes com um veículo equipado com dois *smartphones* diferentes, cada um com uma taxa de aquisição de 100Hz. Um dos dispositivos foi colocado no interior de veículo, enquanto o outro foi posicionado na bandeja do sistema de suspensão. Para calibrar as medições de resposta nas pontes, foi utilizado o Método de Nível e Mira. Os resultados demonstraram uma boa convergência entre os métodos usados para obter os perfis de superfície das pontes, evidenciando a precisão dos *smartphones* como um método alternativo simples e econômico. Além disso, o uso dos aparelhos mostrou-se de fácil operação e alta produtividade.

Zhao *et al.* (2016), verificaram a viabilidade da técnica de monitoramento rápido da integridade de uma ponte usando *smartphones*. Um novo método de medição de força de cabo (estai) usando câmera de *smartphone* foi inicialmente validado por testes em um modelo de cabo em laboratório. Um experimento sobre o monitoramento de múltiplos parâmetros de um modelo em escala de ponte foi realizado, monitorando os parâmetros como aceleração, deslocamento e ângulo por meio do *smartphone*. Os resultados mostraram uma boa concordância entre o sensor de referência e as medições do *smartphone* nos domínios do tempo e da frequência.

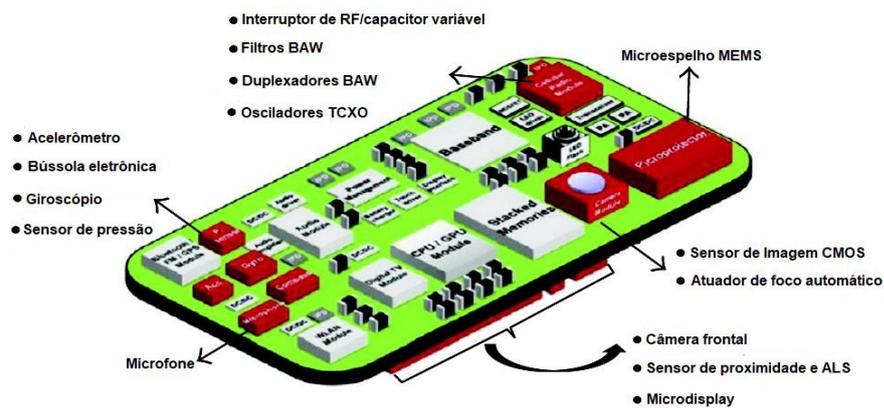
Diversos estudos confirmaram o potencial dos *smartphones* na monitorização da condição das infraestruturas civis, tanto por meio de testes laboratoriais quanto de campo (YU *et al.*, 2012). Reilly *et at.* (2014), desenvolveram um aplicativo móvel *iShake*, que utiliza *smartphones* como sensores sismológicos, permitindo que eles meçam e transmitam os dados

de movimento do solo para um servidor. A precisão dos sensores embutidos nos *smartphones* para aplicação em sensoriamento sísmico foi validada por meio de testes em mesa vibratória. Yu; Han *et al.* (2015) mediram a força do cabo da ponte estaiada com um acelerômetro embutido no *smartphone*, demonstrando que é possível estimar a força do cabo com precisão utilizando os sensores internos do dispositivo.

2.4.1 Sensores presentes no smartphone

Como mostra a Figura 21, os *smartphones* modernos são equipados com diversos tipos de sensores. Dentre os sensores mais comuns presentes na maioria dos *smartphones*, destacam-se o acelerômetro, o giroscópio, o magnetômetro, o microfone e a câmera.

Figura 21. Sensores dentro dos smartphones



Fonte: LIU (2013).

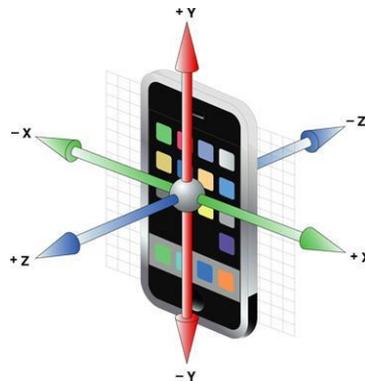
- ✓ Acelerômetro: Mede a aceleração adequada, que é a aceleração que ele experimenta em relação à queda livre e é a aceleração sentida por pessoas e objetos;
- ✓ Giroscópio: Mede ou mantém a orientação, com base nos princípios do momento angular;
- ✓ Magnetômetro: Mede a força e talvez a direção dos campos magnéticos;
- ✓ Microfone: Usado para gravar som;

- ✓ Câmera: Usado para capturar informações de visão do mundo real.

2.4.2 Funcionamento do acelerômetro

Para Queiroz *et al.* (2016), os *smartphones* possuem diversos sensores, sendo dois essenciais: o acelerômetro, que detecta a variação do movimento ou aceleração nos três eixos perpendiculares (X, Y e Z), e o giroscópio, que mede e a orientação do aparelho — embora este último não seja utilizado na pesquisa (Figura 22). O acelerômetro mede as forças de aceleração aplicadas a um objeto, a partir de sua movimentação ou do local onde o sensor se encontra. A inércia em relação a um referencial interno permite detectar a perturbação, que é então convertida em um sinal elétrico por meio da transformada de Fourier. O acelerômetro mensura a aceleração no intervalo $\pm 2g$ (g representa a aceleração da gravidade), tomando como base um ponto de referência inercial. Embora a resolução do acelerômetro alcance até 0,002g, há limitações devido a ruídos provenientes de vibrações mecânicas do próprio *smartphone*.

Figura 22. Orientação dos eixos que estabelecem as componentes da aceleração de um smartphone



Fonte: MOREIRA (2012).

Existem diversos tipos de acelerômetro, cada um utilizando diferentes princípios físicos para medir a aceleração. De acordo com o princípio físico subjacente à sua operação, os principais tipos de acelerômetros são:

- ✓ Piezoelétrico;
- ✓ Piezoresistivo;

- ✓ Capacitivo;
- ✓ Acelerômetro de Efeito Hall;
- ✓ Magnetoresistivo;
- ✓ Ultrassônico.

Morgenthal *et al.* (2012) realizaram uma comparação da precisão de diversos métodos de medição de frequência naturais de estruturas, descrevendo as vantagens e desvantagens de cada abordagem. O foco principal do estudo foi a aplicação desses métodos para fins de identificação estrutural, embora a medição de inclinação também tenha sido considerada. Os resultados indicaram que os *smartphones* possuem múltiplas vantagens, tornando-os uma ferramenta promissora para o monitoramento de integridade estrutural.

Ma, Qiao *et al.* (2013) conduziram uma avaliação abrangente do desempenho dos sensores de *smartphones* de última geração, incluindo acelerômetros, giroscópios, magnetômetros e GPS. O estudo se concentrou em cinco métricas de desempenho: exatidão, precisão, frequência máxima de amostragem, variação do período de amostragem e consumo de energia. Os resultados indicaram que os sensores de acelerômetro e giroscópio embutidos nos *smartphones* apresentam alta estabilidade, com desvios de unidade entre 0,1 e 0,8 em comparação com o valor real, tornando-os adequados para uma ampla gama de aplicações.

Castro-Palacio *et al.* (2013) realizaram uma análise quantitativa de oscilações mecânicas acopladas utilizando sensores de aceleração de *smartphones*. Os autores analisaram separadamente os modos normais simétricos e assimétricos, bem como uma oscilação acoplada geral, estudada como uma combinação dos modos normais. Os resultados demonstraram que as discrepâncias entre os valores ajustados e experimentais para o período e a constante da mola são inferiores a 1% para todos os casos, sugerindo que os sensores de aceleração de *smartphones* podem ser utilizados como instrumentos confiáveis para medir variações rápidas dos componentes da aceleração instantânea em fenômenos físicos como oscilações.

Feng *et al.* (2015) realizaram testes de mesa de agitação sísmica e testes de campo de pontes para investigar o desempenho de acelerômetros de *smartphones* na medição de resposta estrutural a carregamento dinâmico. Os testes variaram de ambientes de baixa amplitude a excitações sísmicas de alta amplitude, bem como excitações senoidais. Os testes de mesa vibratória em pequena escala confirmaram que os sensores do *smartphones* conseguem medir com precisão a vibração senoidais de 0,5 Hz a 20 Hz, uma faixa de frequência relevante para a maioria das estruturas de engenharia civil. Os resultados dos testes demonstraram as vantagens dos sensores de *smartphones* em relação aos sensores convencionais, como a facilidade de instalação, aquisição de dados e transmissão sem fio.

Wu, Wang *et al.* (2020) propuseram um método inovador para a identificação de buracos em estradas utilizando *smartphones* com acelerômetros embutidos. Essa abordagem pode reduzir significativamente o tempo e os recursos necessários para a detecção de buracos, uma vez que *smartphones* são dispositivos amplamente disponíveis e de baixo custo. A viabilidade do método foi testada através de uma série de experimentos, e os resultados indicaram que os modelos de aprendizado de máquina utilizando recursos extraídos de sinais de aceleração ao longo de três eixos alcançaram alta precisão na classificação de buracos, com o método Random Forest apresentando precisão de 88,5% e recall de 75%.

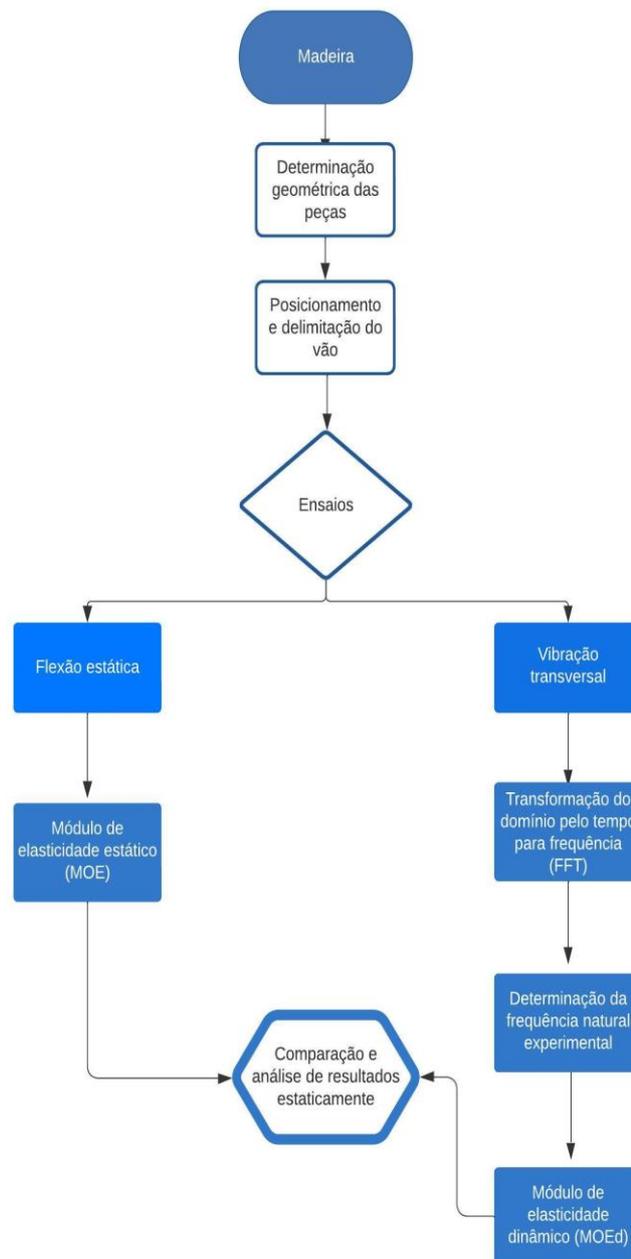
Kamranfar *et al.* (2022) apresentaram uma estrutura de aprendizado não supervisionado para a avaliação da condição do pavimento. A estrutura combina a caracterização de *wavelet* otimizada por Pareto com agrupamento para identificar diferentes classes de desgaste do pavimento, mesmo em estágios iniciais. Os resultados mostraram que a estrutura é capaz de detectar vários tipos de defeitos do pavimento, incluindo rachaduras, remendos e buracos, mas os dados do acelerômetro do *smartphone* de baixo custo podem não ser adequados suficientes para distinguir defeitos de granulação fina do pavimento. Fontes adicionais de dados, como de outros sensores, podem ser necessárias para melhorar a quantificação da condição do pavimento.

Por fim, a utilização do acelerômetro de *smartphones* para determinar a vibração transversal em peças de madeira é inédita, conforme verificado na bibliografia e demonstrado neste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, são descritos os materiais, equipamentos e métodos experimentais utilizados neste trabalho de pesquisa. A Figura 23 apresenta um diagrama esquemático da metodologia a ser desenvolvida.

Figura 23. Fluxograma dos métodos.



Fonte: Próprio autor.

3.1 Madeira Serrada

Foram utilizadas 215 peças de madeira das espécies *Pinus sp*, *Pinus (Pinus elliottii)*, Cedrim (*Erismia uncinatum Warm*), Cambará (*Gochnatia paniculata*), Garrote - Tatajubá (*Bagassa guianensis*), Cupiúba - Peroba do Norte (*Goupia glabra Aubl*), Peroba Pariri (*Pouteria pariry*), Canelão (*Nectandra megapotamica*) e Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*), Figura 24. As amostras apresentaram diversas espécies com diferentes densidades, comprimentos e seções transversais, visando validar o método em uma ampla gama de aplicações.

Os espécimes foram submetidos a dois tipos de ensaios: teste de flexão estática e vibração transversal (com *smartphone* acoplado). As amostras foram selecionadas aleatoriamente de diferentes lotes de madeira. A Tabela 3 apresenta um resumo do número de peças, comprimentos, espécies, seções transversais utilizadas e relação comprimento altura (L/h).

Figura 24. Amostras de madeira (a) Peroba do Norte (*Goupia glabra*) e (b) Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*).



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor

Tabela 3. Resumo das amostras de madeira utilizadas neste estudo.

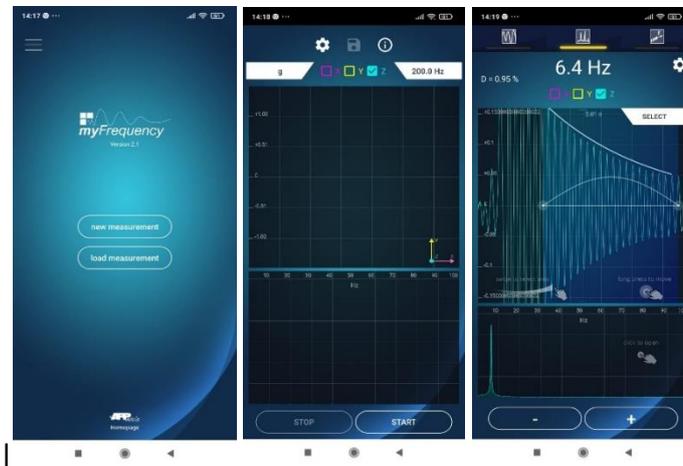
Espécies de Madeira	Média			L/h	Número de amostras	
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (m)		Por Comprimento	Total
<i>Pinus sp</i>	18	136	2,66	148	15	38
	23	200	3,05	133	23	
Peroba do Norte (<i>Goupia glabra</i>)	31	153	3,00	97	36	64
	31	150	2,50	81	28	
Peroba Rosa (<i>Aspidosperma polyneuron</i>)	72	220	3,90	54	10	13
	75	214	5,00	67	3	
Pinus (<i>Pinus elliottii</i>)	19	149	3,00	158	12	12
Cedrim (<i>Erisma uncinatum</i> Warm)	21	150	2,53	120	12	12
Cambará (<i>Gochmatia paniculata</i>)	44	146	3,01	68	12	12
Garrote - Tatajubá (<i>Bagassa guianensis</i>)	31	112	3,03	98	12	12
Cupiúba – Peroba do Norte (<i>Goupia glabra</i>)	45	100	3,04	98	12	12
Peroba Pariri (<i>Pouteria pariry</i>)	25	146	3,01	120	20	20
Canelão (<i>Nectandra megapotamica</i>)	28	115	3,52	126	12	20
	29	103	4,03	139	4	
	34	112	4,53	133	4	

Fonte: Próprio autor

3.2 Smartphone

Foi utilizado o *smartphone* Samsung Galaxy com sistema operacional *Android* 6.0. O aplicativo utilizado neste estudo foi o *myFrequency* (Figura 25), que oferece funcionalidades avançadas para análise de frequências. Esse aplicativo adquire dados do sensor acelerômetro triaxial (MEMS) com uma frequência de amostragem de 500 Hz, permitindo a captura precisa das variações de aceleração em três eixos, essencial para estudos de dinâmica estrutural. Além de realizar medições em Hertz (Hz), o *myFrequency* possui uma ferramenta para a Transformada de Fourier, permitindo a conversão dos dados do domínio do tempo para o domínio da frequência. Esse recurso foi fundamental para uma análise detalhada das componentes de frequência e avaliação do comportamento estrutural. Além disso, o aplicativo possibilitou o cálculo do amortecimento do sistema estrutural, parâmetro essencial para a análise de estabilidade e desempenho dinâmico das estruturas estudadas. Até o momento, o *myFrequency* está disponível exclusivamente para dispositivos *Android*.

Figura 25. Tela inicial do aplicativo *myFrequency*.



Fonte: Próprio autor.

3.2.1 Propriedades dos sensores do *smartphone*

As principais características do sensor acelerômetro triaxial (MEMS) do *smartphone* utilizado estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Propriedades do smartphone

Propriedades	Smartphone
Fabricante do Sensor	STM
Modelo do Sensor	LSM6DSO
Sistema Operacional	Android
Tipo de Sensor	MEMS
Sensibilidade	2,3942 mm/s ²
Faixa	7,8 g
Faixa de Frequência	500

Fonte: Próprio autor.

3.3 Determinação geométrica das peças

Este estudo utilizou duas bases de dados principais. A primeira foi composta por informações coletadas por alunos de iniciação científica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), sob a supervisão do Prof. Dr. Andrés Batista Cheung, também vinculado à UFMS.

A segunda base de dados consistiu em 100 amostras de diversas espécies de madeira cedidas pela madeireira Madecal com sede em Campo Grande/MS, incluindo Pinus (*Pinus elliottii*); Cedrim (*Erisma uncinatum Warm*); Cambará (*Gochnatia paniculata*); Garrote - Tatajubá (*Bagassa guianensis*); Cupiúba - Peroba do Norte (*Goupia glabra*); Peroba Pariri (*Pouteria pariry*) e Canelão (*Nectandra megapotamica*). Essas amostras foram organizadas em sete grupos de vigas, contendo 12 amostras nos grupos 1 a 5 e 20 amostras nos grupos 6 e 7, com comprimentos variando entre 2,5 m a 4,50 m. As dimensões reais das vigas foram medidas utilizando um paquímetro e uma trena. O módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{tv}) foi determinado inicialmente, seguido pela medição do Módulo de Elasticidade Estático (MOE_e).

3.4 Ensaio de vibração transversal

3.4.1 Aferição das Dimensões Físicas

Cada peça de madeira foi pesada, em balança, para a determinação da sua massa, Figura 26.

Figura 26. Peça de madeira sendo pesada em balança industrial



Fonte: Próprio autor.

As dimensões físicas de cada peça, incluindo a largura e espessura, foram medidas em três pontos distintos: na base, no meio e no topo (Figura 27). Essas medições são fundamentais para assegurar a precisão dos resultados subsequentes.

Figura 27. Medição da espessura da peça de madeira utilizando paquímetro



Fonte: Próprio autor.

3.4.2 Preparação para o Teste de Vibração

O *smartphone* foi posicionado no centro do vão da peça de madeira, sobre um suporte do tipo canaleta montado em cavaletes, Figura 28. O dispositivo foi utilizado para registrar os dados de vibração por meio de seus acelerômetros embutidos.

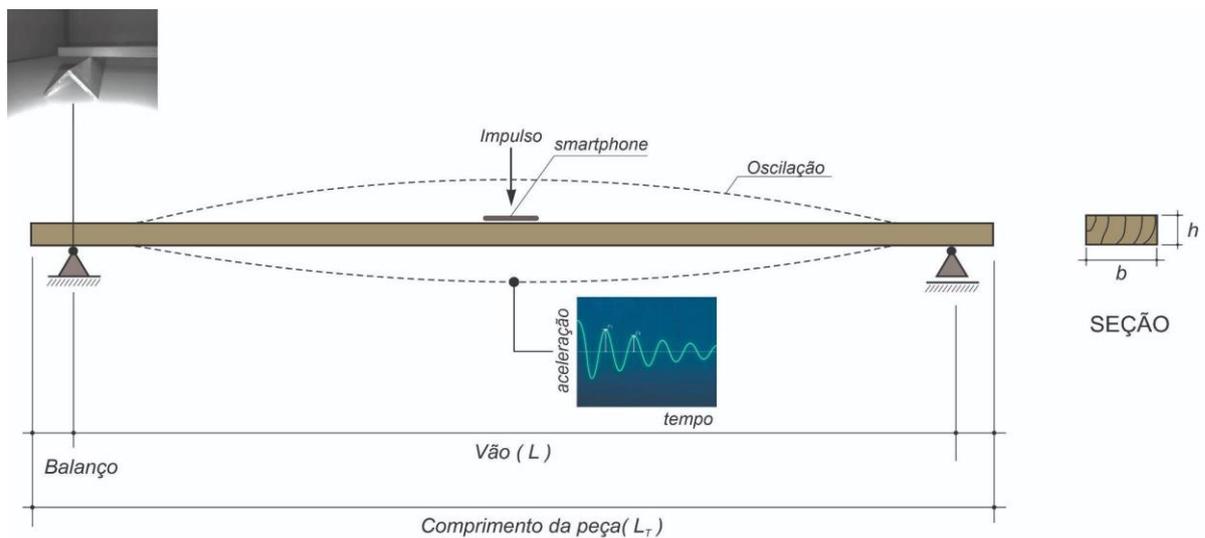
Figura 28. *Smartphone* posicionado para teste de vibração.



Fonte: Próprio autor.

Cada peça foi submetida à aplicação manual de uma força impulsiva, conforme ilustrado Figura 29, assegurando a consistência da força aplicada.

Figura 29. Teste de vibração transversal



Fonte: Próprio autor.

3.4.3 Indução da Vibração

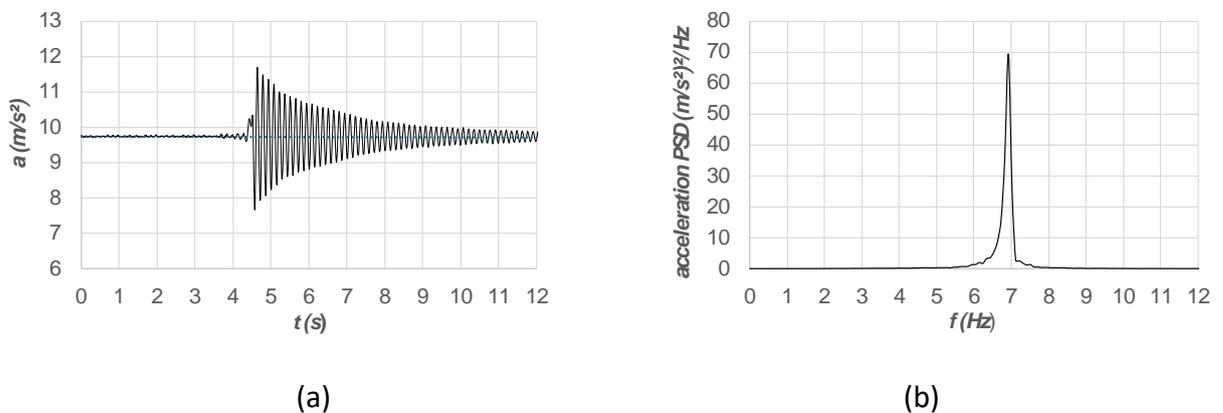
A aplicação da força impulsiva gera uma vibração livre amortecida nas peças de madeira. Esse tipo de vibração é fundamental para a análise subsequente, pois possibilita a obtenção do primeiro modo de vibração à flexão da peça.

3.4.4 Análise dos dados da vibração

Para avaliar o módulo de elasticidade dinâmico de uma viga sob regime de flexão longitudinal, é necessário determinar sua frequência natural. Essa frequência pode ser obtida pela transformação do domínio do tempo para frequência, utilizando a transformada rápida de Fourier (FFT). A FFT é um algoritmo matemático que permite a decomposição de um sinal no domínio do tempo em suas componentes de frequência, realizando uma análise espectral que revela os diferentes componentes de onda que constituem o sinal, facilitando a compreensão de suas características e propriedades.

O Gráfico 7a apresenta o deslocamento vertical (direção Z) no domínio do tempo e o Gráfico b domínio da frequência (*Power Spectral Density*) para uma viga com modo predominante de flexão.

Gráfico 7. (a) Domínio do tempo e (b) Domínio da frequência.



Fonte: Autor.

Existem diversas formas de explicar uma transformada, equações (48) e (49) apresentam a forma clássica da transformada.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (48)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cdot e^{-i\omega t} d\omega \quad (49)$$

A equação (49) permite a operação inversa da transformação, ou seja, o sinal processado, que representa o sinal no domínio da frequência, pode ser convertido novamente no sinal bruto, que representa o sinal no domínio do tempo.

França et al. (2018) enfatizam importância de seguir o padrão ASTM, que recomenda a realização de testes de vibração transversal de amostras de madeira na orientação plana. Essa abordagem tende a induzir vibrações verticais em baixas frequências, limitando o número de modos de vibração e facilitando a interpretação dos resultados. Em contrapartida, a realização de testes na orientação de borda aumenta a complexidade, pois a amostra pode apresentar múltiplos modos de vibração, tanto verticais quanto horizontais, o que pode comprometer a precisão dos resultados.

Para considerar a massa concentrada do *smartphone* durante o ensaio, será utilizada a equação (50). Nessa condição, o módulo de elasticidade na flexão obtido pela técnica de vibração transversal é denominado Módulo de Elasticidade na Flexão por Vibração Transversal (MOE_{tv}).

$$MOE_{tv} = \frac{f_r^2 \cdot (W_{viga} + W_{smartphone}) \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad (50)$$

Sendo:

f_r frequência natural fundamental (Hz)

W_{viga} massa da viga (kg)

$W_{smartphone}$ massa do *smartphone* (kg)

L vão da peça (m)

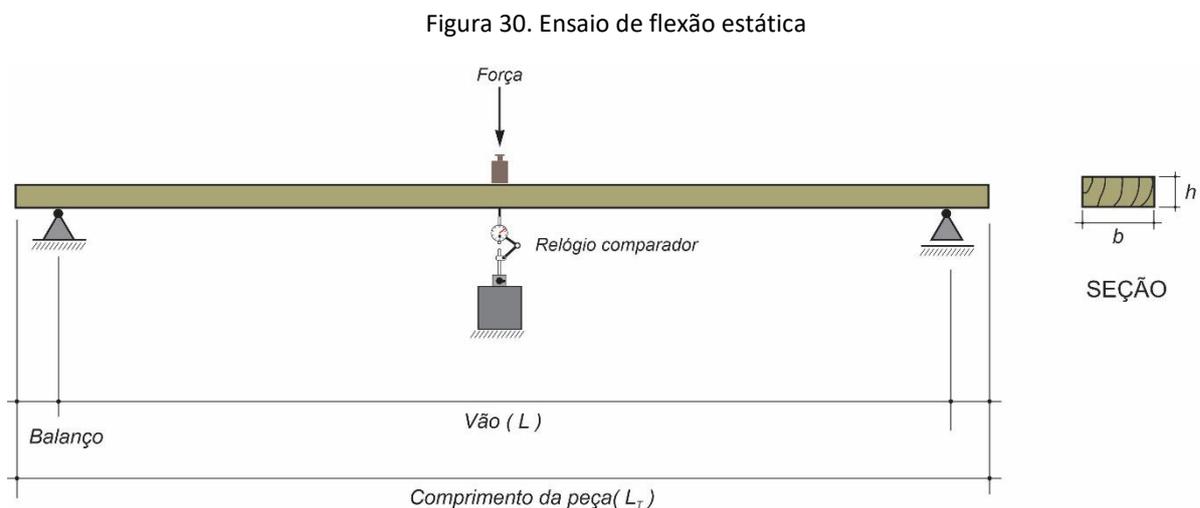
I momento de inércia em relação ao plano de flexão considerado (cm⁴);

g aceleração da gravidade (9,8 m/s²)

As condições de configuração adotada permitem o uso do modelo de Bernoulli, no qual o efeito de cisalhamento é desprezível para vigas com uma razão vão/altura superior a 20, conforme pode ser observado na Tabela 4.

3.5 Teste de flexão estática para a obtenção do Módulo de elasticidade longitudinal (MOE_e)

Após a realização do ensaio dinâmico, foi conduzido o ensaio de flexão estática para a determinar o módulo de elasticidade das peças estruturais por meio do ensaio de 3 pontos. Justifica-se a escolha deste ensaio, pois as relações (L/h) encontradas nas amostras ensaiadas foram sempre maiores que 20. A Figura 30 ilustra o esquema do ensaio estático e uma visão geral do procedimento. A distância entre os apoios (L) corresponde ao comprimento total da peça. No centro dos apoios, foi posicionado um relógio comparador com resolução de 0,01 mm e curso máximo de 30 mm, utilizado para medir o deslocamento gerado pela aplicação gradual de três pesos-padrões de 10 N cada, totalizando 30 N.



Fonte: Takazono e Cheung (2018).

O módulo de elasticidade das peças estruturais será determinado utilizando a Equação (51). Este módulo é calculado com base no deslocamento vertical no centro da peça, resultante da deformação por flexão restrita ao trecho central da amostra.

$$MOE = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot \Delta f \cdot I} \quad (51)$$

Sendo:

MOE módulo de elasticidade (MPa)

ΔF =acrécimo de carga (N);

L =vão entre os apoios (mm)

Δf =acrécimo de deslocamento (mm)

I = momento de inércia da área da seção transversal (mm^4)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliar a precisão do uso de smartphones na medição do módulo de elasticidade de elementos estruturais de madeira, foram analisadas 215 vigas de madeira com variações em seção transversal, espécie e comprimento, conforme descrito na Tabela 3. A Tabela 4 apresenta os valores previstos do MOE (Módulo de Elasticidade) de flexão estática, que são baseados nos valores do MOE_{tv} de vibração transversal para 215 amostras de madeira serrada. As espécies de madeira foram agrupadas em dez categorias: Grupo 1: Peroba do Norte (*Goupia glabra*); Grupo 2: Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*); Grupo 3: Pinus (Pinus sp.); Grupo 4: Pinus (*Pinus elliottii*); Grupo 5: Cedrim (*Erisma uncinatum Warm*); Grupo 6: Cambará (*Gochnatia paniculata*); Grupo 7: Garrote - Tatajubá (*Bagassa guianensis*); Grupo 8: Cupiúba - Peroba do Norte (*Goupia glabra*); Grupo 9: Peroba Pariri (*Pouteria pariry*); e Grupo 10: Canelão (*Nectandra megapotamica*).

Os valores de Módulo de Elasticidade foram identificados como MOE_e para os resultados obtidos por flexão estática e como MOE_{tv} para os resultados obtidos na vibração transversal, abrangendo uma faixa de 3,5 e 31,81 GPa. Essa ampla variação valida a aplicabilidade do método proposto.

Observou-se que os valores do módulo de elasticidade obtidos por vibração transversal (MOE_{tv}) são superiores aos obtidos por flexão estática (MOE_e), confirmando os resultados encontrados por França *et al.* (2018), Carreira *et al.* (2003), Ballarin *et al.* (2002), Bartolomeu *et al.* (2004), Pellerin (1965), O'Halloran (1969), Wang *et al.* (1993), Ross (2015) e Jayne (1959).

Tabela 4. Resumo das propriedades da madeira avaliada (coeficientes de variação (%) entre parênteses).

Espécies de Madeira	Grupo	Módulo de Elasticidade MOE_e (GPa)	Vibração Transversal MOE_{tv} (GPa)	$\frac{MOE_e}{MOE_{tv}}$
Peroba do Norte (<i>Goupia glabra</i>)	1	15,22 (15,5%)	18,01 (15,6%)	0,85
<i>Pinus sp</i>	2	7,48 (23,5%)	7,91 (27,0%)	0,94
Peroba Rosa (<i>Aspidosperma polyneuron</i>)	3	8,85 (25,1%)	9,17 (25,3%)	0,96
Pinus (<i>Pinus elliottii</i>)	4	9,71 (32,7%)	9,74 (32,8%)	0,99
Cedrim (<i>Erisma uncinatum</i> Warm)	5	16,37 (48,4%)	16,98 (47,7%)	0,964
Cambará (<i>Gochnatia paniculata</i>)	6	12,22 (23,7%)	12,8 (20%)	0,955
Garrote - Tatajubá (<i>Bagassa guianensis</i>)	7	16,41 (11,3%)	16,77 (11,1%)	0,979
Cupiúba - Peroba do Norte (<i>Goupia glabra</i>)	8	15,53 (21,6%)	16,78 (19,2%)	0,925
Peroba Pariri (<i>Pouteria pariry</i>)	9	16,91 (13,5%)	16,825 (13,3%)	1,00
Canelão (<i>Nectandra megapotamica</i>)	10	17,86 (11,1%)	18,49 (10,7%)	0,97

Para avaliar a eficácia da técnica proposta com o uso de dispositivos móveis, foi realizada uma análise inicial de regressão linear individual para cada uma das espécies testadas. Os resultados, apresentados nos Gráficos 8 a 17, indicam que o coeficiente de determinação varia entre $0,49 \leq R^2 \leq 0,98$, sugerindo uma correlação linear significativa. As variações observadas entre as diferentes espécies podem ser atribuídas à presença de

irregularidades ao longo do comprimento das amostras, que se encontram em estado bruto, sem qualquer tipo de acabamento superficial.

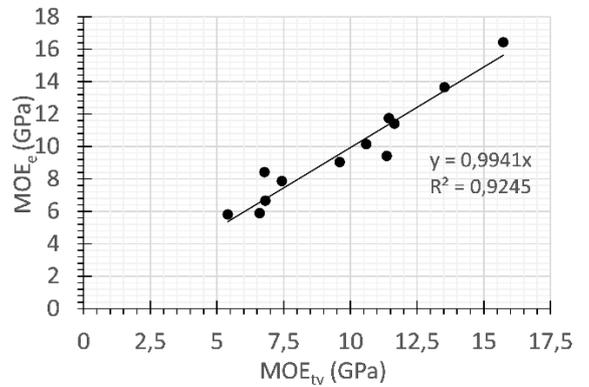
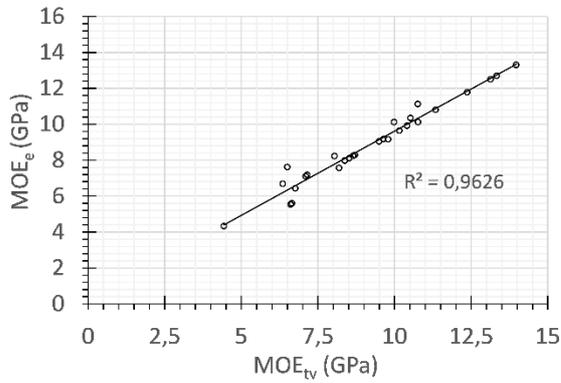
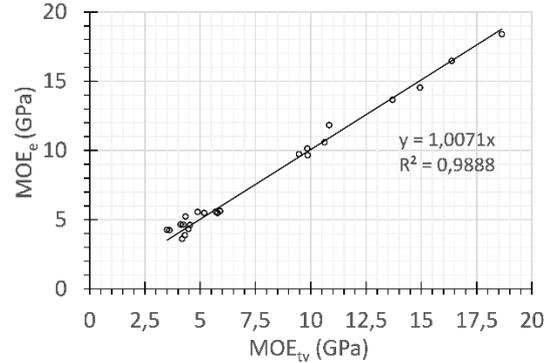
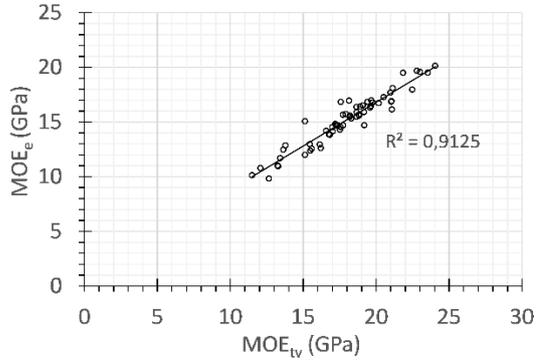


Gráfico 10. Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*)

Gráfico 11. Pinus (*Pinus elliotii*)

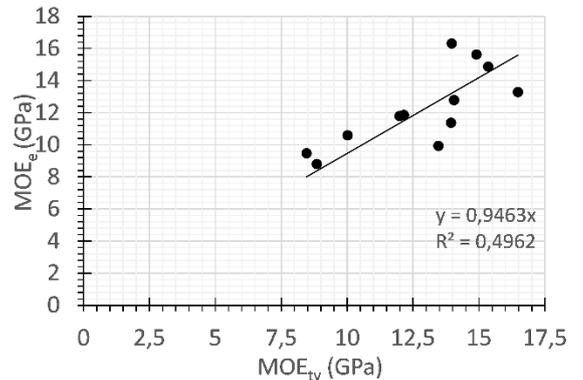
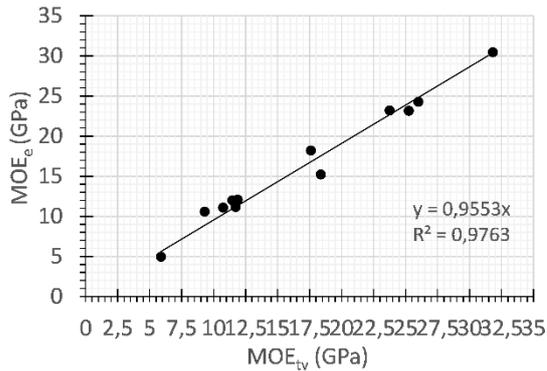
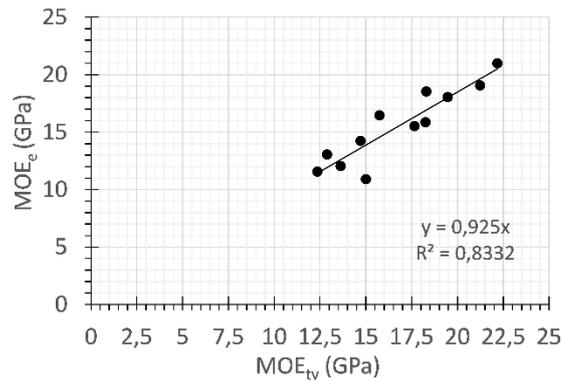
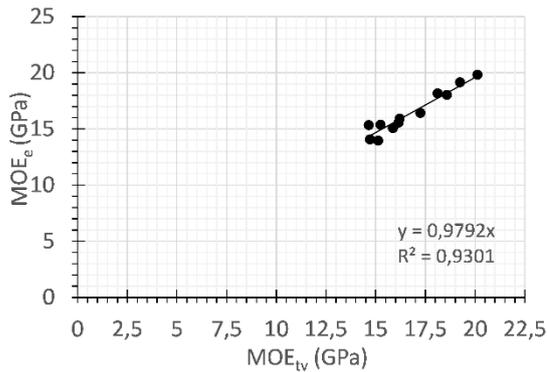
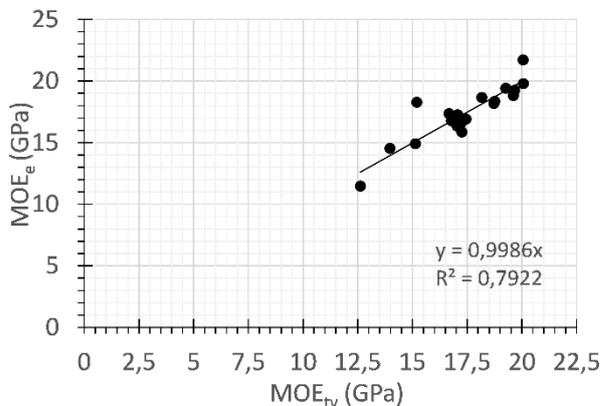
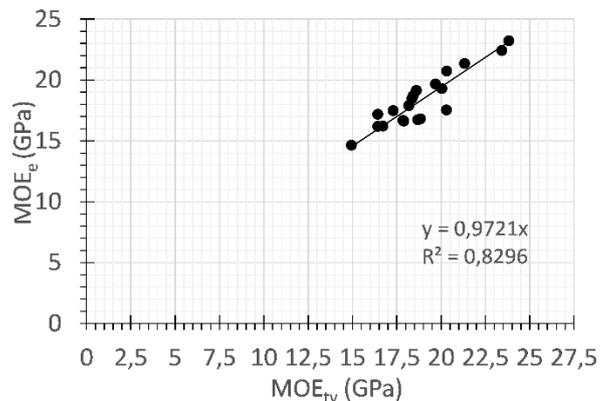


Gráfico 12. Cedrim (*Erismia uncinatum Warm*)

Gráfico 13. Cambará (*Gochnatia paniculata*)

Gráfico 14. Garrote - Tatajubá (*Bagassa guianensis*)Gráfico 15. Cupiúba - Peroba do Norte (*Goupia glabra*).Gráfico 16. Peroba Pariri (*Pouteria pariry*)Gráfico 17. Canelão (*Nectandra megapotamica*)

Os resultados apresentados nos gráficos evidenciam uma relação linear entre o Módulo de Elasticidade dinâmico (MOE_{tv}) obtido por vibração transversal e o Módulo de Elasticidade em flexão estática (MOE_e). A maioria dos gráficos demonstram uma alta correlação entre essas variáveis, conforme indicado pelos elevados coeficientes de determinação (R^2), sugerindo que a variabilidade do MOE_e pode ser amplamente explicada pela variabilidade do MOE_{tv} .

No entanto, alguns gráficos mostram valores menores de R^2 , indicando uma correlação menos intensa, o que sugere a influência de fatores adicionais, como variações nas propriedades intrínsecas das espécies de madeira, dimensões geométricas das amostras e condições de vinculação durante os testes. A variação nos coeficientes angulares das linhas de tendência reflete que a taxa de incremento de MOE_e em resposta a cada unidade de MOE_{tv} depende do material ou amostra analisada, destacando as diferenças intrínsecas nas propriedades mecânicas dos materiais estudados.

Os dados coletados, organizados em 215 amostras de madeira de diferentes espécies, comprimentos, espessuras e larguras, conforme apresentados nas Tabelas 4 e 6, mostram uma variabilidade significativa na correlação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico. Os gráficos de 8 a 17 indicam que o coeficiente de determinação (R^2) varia de 0,49 a 0,98. Esse intervalo reflete a heterogeneidade das respostas mecânicas das diferentes espécies de madeira, com algumas amostras apresentando uma correlação forte (R^2 próximo a 0,98) e outras mostrando correlações mais fracas (R^2 em torno de 0,49).

Essas variações indicam que, embora a técnica de vibração transversal utilizando o acelerômetro de um *smartphone* seja eficaz na determinação do módulo de elasticidade para a maioria das amostras, a precisão e consistência dos resultados dependem das características específicas de cada grupo de madeira. Portanto, esses resultados reforçam a necessidade de considerar essas variáveis ao aplicar este método para avaliar as propriedades mecânicas de materiais de madeira, assegurando sua validade em diferentes contextos e aplicações.

Para realizar uma avaliação mais abrangente da aplicabilidade da técnica de vibração transversal utilizando smartphones, os dez conjuntos de testes foram consolidados, representando uma ampla gama de valores do módulo de elasticidade à flexão.

O Gráfico 18 compara a relação entre o Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOE_{tv}), obtido por vibração transversal, e o Módulo de Elasticidade à Flexão Estática (MOE_e) em diferentes estudos sobre materiais de madeira, incluindo os de Tamazato (2017) – grupo 1, Takazono e Cheung (2018) – grupo 2, Pereira (2023) – grupo 3, além do presente estudo (grupos 4 a 10). Verifica-se uma tendência linear positiva entre essas variáveis, indicando que, de modo geral, os valores de (MOE_e) aumentam proporcionalmente aos de (MOE_{tv}).

Os resultados deste estudo confirmam a aplicabilidade da técnica de medição de MOE_{tv} em diferentes espécies e comprimentos de madeira, apresentando os maiores valores médios de MOE_e e MOE_{tv} em comparação aos estudos anteriores. Isso sugere uma maior diversidade de amostras ou condições experimentais mais amplas. A dispersão dos dados em torno da linha de tendência comum indica a influência de fatores adicionais, como variações nas propriedades intrínsecas dos materiais, métodos experimentais, condições ambientais e precisão instrumental.

Portanto, o alinhamento entre os resultados teóricos e experimentais confirma a validade dos métodos de cálculo de MOE_{tv} e demonstra consistência das propriedades

mecânicas identificadas nos diferentes estudos, reforçando a robustez dos modelos teóricos na previsão do comportamento mecânico de materiais de madeira em diversas condições.

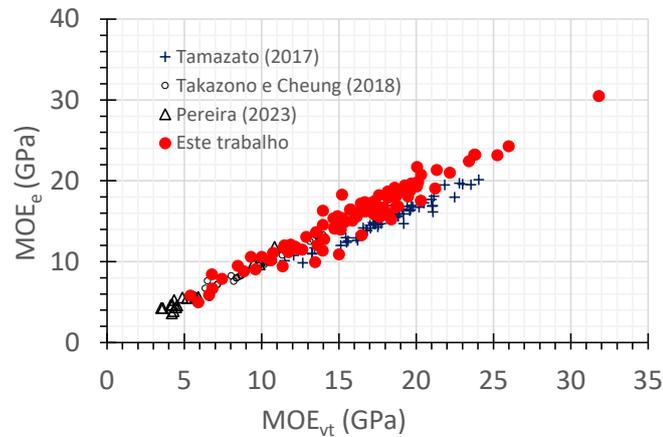


Gráfico 18. Dispersão dos dados para as espécies estudadas, como *Goupia glabra* – grupo 1 (Tamazato, 2017), *Aspidosperma polyneuron* – grupo 2 (Takazono e Cheung, 2018), *Pinus sp* – grupo 3 (Pereira, 2023) e grupos 4 a 10 (Santos e Cheung, 2024).

O Gráfico 18 apresenta os valores previstos do Módulo de Elasticidade à Flexão Estática (MOE_e) em função dos valores obtidos pelo Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOE_{tv}) por vibração transversal para os dados agrupados de Tamazato (2017), Takazono (2018), Pereira (2023) e deste trabalho. O gráfico evidencia uma forte correlação entre as duas variáveis, com um coeficiente de determinação de 0,89, indicando que o MOE_{tv} é uma estimativa do comportamento do material sob flexão estática. Observa-se que os dados obtidos por Tamazato (2017) diferem dos valores obtidos pelos outros autores e deste trabalho, o que pode ser atribuído às condições de apoio adotadas e à resolução do acelerômetro na época do ensaio. Cabe ressaltar que os acelerômetros atualmente são mais precisos do que os utilizados em 2017.

A partir da análise dos dados, excluindo-se os valores obtidos por Tamazato (2017), verifica-se um coeficiente de determinação de 0,967, Gráfico 19. Este valor indica uma forte correlação linear entre os resultados obtidos pela técnica de vibração transversal e a flexão estática em peças estruturais.

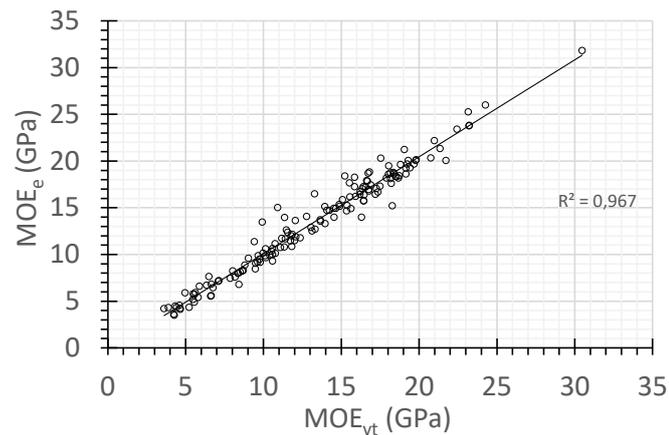


Gráfico 19. Mostra os valores de MOE à flexão estática utilizando os valores de MOE por vibração transversal.

Portanto, para a verificação da homocedasticidade, foi utilizado um gráfico dos resíduos contra os valores estimados. A partir dos resíduos analisados no Gráfico 20, observa-se uma distribuição quase uniforme dos resíduos.

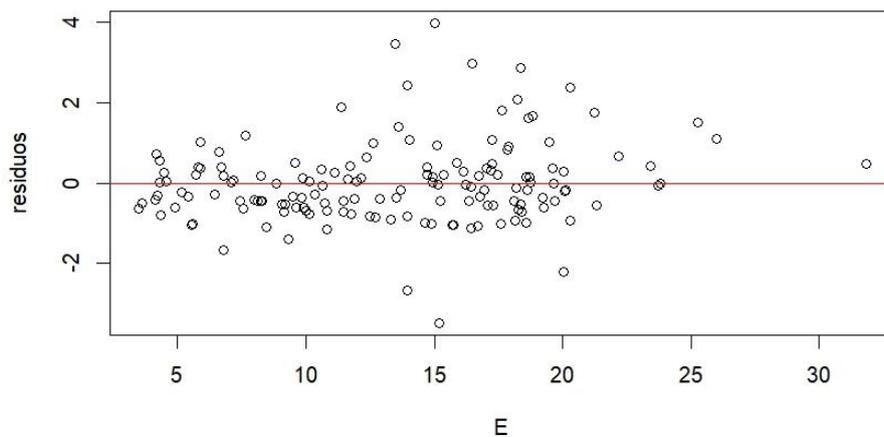


Gráfico 20. Resíduos vs. valores estimados.

Ao comparar os resultados obtidos por diversos pesquisadores que utilizaram o método de vibração transversal em elementos estruturais de madeira, conforme apresentado na Tabela 5, foi observada uma forte correlação ao empregar o método com smartphone. Os coeficientes de correlação (R) reportado pelos diversos pesquisadores variam entre 0,85 e 0,99.

Esses valores situam-se dentro da faixa descrita na literatura e são comparáveis aos resultados obtidos por Pellerin (1965), O'Halloran (1969), Wang *et al.* (1993) e Carreira *et al.* (2003). Além disso, esses resultados corroboram com estudos sobre a aplicação de

smartphones a problemas, assim como com os estudos de Zhao *et al.* (2015) e Di Matteo *et al.* (2022).

Tabela 5. Resumo das propriedades da madeira avaliada (coeficientes de variação (%) entre parênteses).

Referências	Espécies de madeiras	Coefficiente de correlação (R)
Pellerin (1965)	<i>Inland Douglas-fir dimension lumber</i>	0,98
O'Halloran (1969)	<i>Lodgepole pine dimension lumber</i>	0,98
Wang et al. (1993)	<i>Spruce-Pine-Fir Dimension lumber</i>	0,96-0,98
Yang et al. (2015)	<i>Southern Pine dimension lumber</i>	0,86-0,97
Green e MacDonald (1993a)	<i>Northern red oak lumber</i>	0,92
Green e MacDonald (1993b)	<i>Red Maple lumber</i>	0,85
Carreira et al. (2003)	<i>Pinus sp</i>	0,98
França et al. (2018)	Southern Pine	0,89 – 0,92
Tamazato (2017)	Peroba do Norte (<i>Goupia glabra</i>)	0,96
Takazono (2018)	Peroba Rosa (<i>Aspidosperma polyneuron</i>)	0,98
Pereira (2023)	<i>Pinus sp</i>	0,99
	<i>Pinus (Pinus elliottii)</i>	0,96
	Cedrim (<i>Erismia uncinatum warm</i>)	0,99
	Cambará (<i>Gochnatia paniculata</i>)	0,70
Este trabalho	Garrote - Tatajubá (<i>Bagassa guianensis</i>)	0,96
	Cupiúba - Peroba do Norte (<i>Goupia glabra</i>)	0,91
	Peroba Pariri (<i>Pouteria pariry</i>)	0,89
	Canelão (<i>Nectandra megapotamica</i>)	0,91

5 CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a eficácia do uso do acelerômetro de um *smartphone*, em conjunto com o método de vibração transversal, na determinação do módulo de elasticidade em flexão de componentes estruturais de madeira. Esta abordagem inovadora apresenta diversos benefícios em relação aos métodos convencionais, destacando-se por ser mais econômica, de fácil aplicação, eficiente e de execução simplificada, o que torna uma ferramenta promissora para a avaliação das propriedades elásticas da madeira. Com base nessas vantagens, foi conduzida uma série abrangente de testes para verificar a efetividade do método proposto na identificação dinâmica de elementos estruturais de madeira, com ênfase na medição do módulo de elasticidade longitudinal.

Os resultados deste estudo levaram às seguintes conclusões significativas:

- A técnica de vibração transversal produziu resultados consistentes com os testes de flexão estática, apresentando um aumento médio de 2,5% nos valores do Módulo de Elasticidade para as diferentes geometrias testadas. A maior amplitude dos valores de MOE obtidos, em comparação com pesquisas anteriores, reforça a robustez e a abrangência da metodologia utilizada;
- A validação da técnica de medição dinâmica é corroborada pela forte correlação observada entre o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{tv}) e o módulo de elasticidade à flexão estática (MOE_e), com um coeficiente de correlação de 0,88. Esse resultado confirma a eficácia do método de vibração transversal para estimar o comportamento mecânico dos materiais de madeira;
- Apesar da robustez da correlação entre MOE_{tv} e MOE_e , a dispersão dos dados sugere a influência de fatores adicionais, como variabilidade nas propriedades intrínsecas dos materiais, condições ambientais, métodos experimentais e precisão instrumental. Portanto, ao aplicar essa técnica, é importante considerar essas possíveis fontes de variabilidade;
- A confirmação da relação linear entre o MOE_{tv} e MOE_e também contribui para a validação de modelos teóricos que utilizam medições dinâmicas para prever

- o comportamento de materiais sob condições de carga estática, fortalecendo a aplicabilidade desse modelo na caracterização mecânica de peças de madeira;
- O uso do acelerômetro de *smartphone* demonstrou ser uma ferramenta confiável para estimativa do módulo de elasticidade em diferentes espécies e tamanhos de madeira, revelando-se uma solução mais econômica e rápida para a classificação da qualidade da madeira.

As conclusões deste estudo indicam que a técnica de vibração transversal, aplicada com o uso do acelerômetro de um *smartphone*, apenas demonstra uma boa correlação com os métodos de testes tradicionais, mas também resulta em um aumento nos valores medidos, possivelmente devido à natureza dinâmica do ensaio. A precisão do acelerômetro na determinação da elasticidade de diferentes espécies e dimensões de madeira destaca sua versatilidade e adaptabilidade, sugerindo seu potencial para revolucionar a avaliação da qualidade da madeira, especialmente em situações em que o uso de equipamentos tradicionais é inviável ou impraticável.

Essa inovação pode ter implicações significativas para indústrias que dependem da madeira, onde a classificação rápida e precisa dos materiais é fundamental. Os resultados e conclusões do estudo confirmam o alcance dos objetivos específicos propostos, incluindo a validação do uso do acelerômetro do *smartphone*, o desenvolvimento de um procedimento para sua aplicação, e a identificação dos fatores críticos que influenciam a técnica de vibração transversal. Essas realizações reforçam a inovação e a aplicabilidade do método para a avaliação das propriedades mecânicas da madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUÑA, L.; MARTÍNEZ, R.; SPAVENTO, E.; CASADO, M.; ÁLVAREZ-MARTÍNEZ, J.; O'CEALLAIGH, C.; HARTE, A. M.; BALMORI, J. A. Modulus of elasticity prediction through transversal vibration in cantilever beams and ultrasound technique of different wood species. **Construction and Building Materials**, v. 371, 130750, 2023.

ARAÚJO, V. A.; MACHADO, S. N.; SOUZA, R. H.; PEREIRA, A. C. S.; OLIVEIRA, F. M. Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 189-200, 2017.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. 1. Ed. São Paulo: SP, 2001.

ARAÚJO, V. A.; MACHADO, S. N.; SOUZA, R. H.; PEREIRA, A. C. S.; OLIVEIRA, F. M. Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 189-200, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO (ABENDI). **Guia ABENDI 2018: Ensaio Não Destrutivos e Inspeção**. São Paulo: ABENDI, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-1**: Projeto de estruturas de madeira Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-2** Projeto de estruturas de madeira Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-3** Projeto de estruturas de madeira Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos de defeitos de madeira de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento com uso do método não destrutivo de vibração transversal. **Anais [...] Encontro Regional em Madeiras em Estruturas de Madeira**, 3., 2011, São Carlos. São Carlos: EREMEM, 2011.

BALLARIN, A. W.; TARGA, L. A.; PALMA, H. A. Ensaio não-destrutivo de vibração transversal na avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento. **Anais [...] VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**. Uberlândia, 2002.

BARTOLOMEU, A.; MORAES, P. D.; SILVA, R. F.; SOUZA, L. A. Metodologia simplificada para o ensaio de vibração transversal em vigas estruturais de Angelim Araroba. **Anais [...]** Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 10., 2004, Cuiabá. Anais... Cuiabá: UFMT, 2004. p. 29-29.

BERNDT, H.; SCHNIEWIND, A. P.; JOHNSON, G. C. Ultrasonic energy propagation through wood: where, when, how much. **Proceedings [..]** SYMPOSIUM NDT OF WOOD, 12., 2000, Sopron. Proceedings... Sopron: University of Western Hungary, 2000. p. 57-65.

BALLARIN, A. W.; TARGA, L. A.; PALMA, H. A. Ensaio não-destrutivo de vibração transversal na avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento. **Anais [...]** VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Uberlândia, 2002.

BRANCHERIAU, L.; BAILLÈRES, H. Análise de vibrações naturais em vigas de madeira transparente: uma revisão teórica. **Ciência e Tecnologia da Madeira**, v. 4, p. 347-365, 2002.

CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira**. 2006. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

CALIL JUNIOR, C.; BRITO, L. D. **Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. São Carlos, 2011.

CARREIRA, M. R.; CHEUNG, A. B.; DE OLIVEIRA, F. G. R.; DIAS, A. A.; CALIL JR, C.; SALES, A.; STAMATO, G. C. Avaliação de Técnicas Não Destrutivas Aplicadas à Madeira de Pinus sp. **Anais [...]** CONFERÊNCIA PAN-AMERICANA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 2003.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus Sp. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 8, n. 34, p. 17-43, 2006.

CASTRO-PALACIO, J. C.; VERA, F.; GARCÍA-SOUTO, J. A.; MONREAL, R. A. Quantitative analysis of coupled oscillations using mobile accelerometer sensors. **European Journal of Physics**, v. 34, n. 3, p. 737, 2013.

CHANG, W.-S.; REYNOLDS, T.; HARRIS, R.; MOSALAM, K. Using smartphone to identify dynamic characteristics of timber bridges. **Proceedings [..]** COST – TIMBER BRIDGES CONFERENCE, 2014, Biel. Anais... Biel: [s.n.], 2014.

CHURKINA, G.; ORGANSCHI, A.; REYER, C. P. O.; RUFF, A.; VINKE, K.; LIU, Z.; SCHELLNHUBER, H. J. Buildings as a global carbon sink. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 4, p. 269–276, 2020.

DEMARZO, M. A; PORTO, A. L. G. Indicadores de Sustentabilidade (LCA) e Análise do Ciclo de Vida para Madeira de Reflorestamento na Construção Civil. 21. ed. São Carlos: **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, 2017.

DI MATTEO, A.; FIANDACA, D.; PIRROTA, A. Smartphone-based bridge monitoring through vehicle-bridge interaction: analysis and experimental assessment. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 12, p. 1329-1342, 2022.

EMERSON, R. N.; POLLOCK, D. G.; KAINZ, J. A.; FRIDLEY, K. J.; MELEAN, D.; ROSS, R. J. Nondestructive evaluation techniques for timber bridges. **Proceedings [..] V WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING**, 1998, Montreux, Switzerland. p. 670-677.

FAO. 2021. FAO Yearbook of Forest Products 2019. Roma, No. 73, 436 p. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb3795m>

FENG, M.; FUKUDA, Y.; MIZUTA, M.; OZER, E. Citizen sensors for SHM: use of accelerometer data from smartphones. **Sensors**, v. 15, n. 2, p. 2980-2998, 2015.

FERREIRA, F. F. M.; SOARES, E. B.; BARBOSA, R. C.; BARBOSA, P. P.; NETO, G. D. A.; MIOTTO, J. L. COLETÂNEA ESPECIAL DE ENGENHARIA URBANA. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, p. 08-82, 2022.

FRANÇA, F. J.; SEALE, R. D.; ROSS, R. J.; SHMULSKY, R.; FRANÇA, T. S. A. Using transverse vibration nondestructive testing techniques to estimate stiffness and strength of southern pine lumber. **US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory**, 2018.

FREITAS, Roberto Ramos de. **Classificação de peças estruturais de *Pinus spp* pela MSR (*Machine Stress Rate*)**. 2004. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

FREITAS, V. P.; SILVA, J.R.M; MENDES, L. M. Durabilidade de mourões de *Eucalyptus grandis* preservados por substituição de seiva. **Anais [..] Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, 6., 2018. Anais... p. 260-269.

GALLIGAN, W. L.; MCDONALD, K. A. Machine grading of lumber: practical concerns for lumber producers. Madison, WI: *US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory*, 2000.

GONÇALEZ, J. C.; VALLE, A. T.; COSTA, A. F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 81-92, 2001.

GONG, Meng. Lumber-based mass timber products in construction. **Proceedings [..] Timber buildings and sustainability**. IntechOpen, 2019.

HARRIS, N. L.; GIBBS, D. A.; BACCINI, A.; BIRDSEY, R. A.; DE BRUIN, S.; FARINA, M.; FATOYINBO, L.; HANSEN, M. C.; HEROLD, M.; HOUGHTON, R. A.; POTAPOV, P. V.; REQUENA SUAREZ, D.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S. S.; SLAY, C. M.; TURUBANOVA, S. A.; TYUKAVINA, A. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 3, p. 234-240, 2021.

HIGA, R. C. V.; MORA, A. L.; HIGA, A. R. **Plantio de eucalipto na pequena propriedade rural**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 31 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Florestas plantadas no Brasil ocuparam 9,5 milhões de hectares em 2021. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-09/florestas-plantadas-no-brasil-ocuparam-95-milhoes-hectares-2021>. Acesso em: 18 abr. 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DA ÁRVORE. Relatório Anual IBÁ 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf> Acesso em: 10 agosto 2024.

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

JUNIOR, Jose de Almendras Freitas. **Materiais de construção com madeira para mitigação de gases de efeito estufa na execução de edificações**. 2017. Tese (Doutorado) – Curso em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

KAMRANFAR, P.; LATTANZI, D.; SHEHU, A.; STOFFELS, S. Pavement Distress Recognition via Wavelet-Based Clustering of Smartphone Accelerometer Data. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 36, n. 4, p. 04022007, 2022.

KOUROUSSIS, G.; FEKIH, L. B.; DESCAMPS, T. Using experimental modal analysis to assess the behaviour of timber elements. **Mechanics & Industry**, v. 18, n. 8, p. 804, 2017.

KRETSCHMANN, D. E.; GREEN, D. W. Lumber stress grades and design properties. Chapter 6. In: Wood Handbook: Wood as an engineering material. **General Technical Report FPL-GTR-113**. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 1999. p. 6.1-6.14.

LIU, Ming. A study of mobile sensing using smartphones. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 9, n. 3, p. 272916, 2013.

LOPES, D. P.; SANTOS, G. S.; MARCOMINI, L. H. de B.; MELO, R. A. de; PEDROSO, V. A. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, p. 10–98, 2023. Disponível em: <https://www.periodicorease.pro.br/rease/article/view/8360>. Acesso em: 29 maio 2023.

LOURENÇO, P. B.; BRANCO, J. **Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI**. História da Construção: Arquiteturas e Técnicas Construtivas, p. 199–211, 2012.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Florestas do Brasil em resumo: 2019. Serviço Florestal Brasileiro. Brasília: MAPA, 2019. 207 p.

MATOS, J. L. M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** 1997. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

METRIGUARD INC. Metriguard Model 239 A Stress Wave Timer: manual care and instructions, theory and data reduction. Pullman, 1997.

MORGENTHAL, G.; HÖPFNER, H. The application of smartphones to measuring transient structural displacements. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 2, n. 3-4, p. 149-161, 2012.

MURPHY, J. F. Commentary on factors affecting transverse vibration using an idealized theoretical equation. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000. 4 p. **Research note FPL-RN-0276.**

MURPHY, J. F. Transverse vibration of a simply supported beam with symmetric overhang of arbitrary length. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 25, p. 522-524, 1997.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL - ONU BR. 17 Objetivos para transformar o mundo. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/>. Acesso em: 25 maio 2023.

ODS BRASIL Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>. Acesso em: 04 out. 2022.

O'HALLORAN, M.R. **Nondestructive Parameters for Lodgepole Pine.** Dimension Lumber. Colorado State University, Fort Collins, CO, 1969.

OLIVEIRA, M.; SOUSA, H. S.; BRANCO, J. M.; LOURENÇO, P. B. Análise comparativa do desempenho de ultrassons na avaliação não destrutiva da madeira de castanho. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, n. 14, p. 31-43, 2015.

PELLERIN, R. F. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. **Forest Products Journal**, v. 15, n. 3, p. 93-101, 1965.

PEREIRA, G. A. A. **Nova metodologia para classificação de peças de madeira por meio do incremento de massa na técnica de vibração transversal.** 2023. 8 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2023.

PUNHAGUI, K. R. G. **Potencial de redução das emissões de CO2 e da energia incorporada na construção de moradias no Brasil mediante o incremento do uso de madeira.** São Paulo,

2014. 289 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

RAMPAZZO, S. E.; SPONCHIADO, M. O. uso da madeira de reflorestamento na construção civil com enfoque na habitação. **Revista de Pesquisa e Pós-Graduação**, v. 2000, n. 1, p. 131-148, 2000.

ROSS, R. J. **Nondestructive evaluation of wood**. Madison: Forest Products Laboratory, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-238>. Acesso em: 19 mar. 2024.

ROSS, R. J. **Transverse vibration nondestructive testing using a personal computer**. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991.

SEGUNDINHO, P. G. D. A.; CARREIRA, M. R.; REGAZZI, A. J.; DIAS, A. A. Influência do teor de umidade na determinação do módulo de elasticidade de vigas de Pinus sp. **Ambiente Construído**, v. 17, p. 319-329, 2017.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Estimativas de propriedades da madeira de pinus taeda através do método não-destrutivo emissão de onda de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado**. 2005. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SIGA - SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA DO AGRONEGÓCIO. 45 anos de desenvolvimento do estado por meio da agropecuária. Campo Grande: SIGA, 2022. Disponível em: <https://portal.sistemafamasul.com.br/noticias/mato-grosso-do-sul-45-anos-de-desenvolvimento-do-estado-por-meio-da-agropecu%C3%A1ria>. Acesso em: 18 abr. 2023.

TAKAZONO, J. G.; CHEUNG, A. B. Utilização de Smartphone para a classificação mecânica do Pinus sp pelo método de vibração transversal. **Anais [...] Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, 16., 2018. Anais eletrônicos... Disponível em: <<http://eventos.eesc.usp.br/eboramem2018>>. Acesso em: 01 ago. 2023.

TAMAZATO, M. A. H. **Classificação mecânica da madeira pela técnica não-destrutiva de vibração transversal por meio de smartphone**. 2017. 20 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2017.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. UNEP and Biodiversity. 2020. Disponível em: <https://www.unep.org/unep-and-biodiversity>. Acesso em: 29 maio de 2023.

WANG, Z.; ROSS, R. J.; MURPHY, J. F. A comparison of several NDE techniques for determining the modulus of elasticity of lumber. **World Forestry Research**, v. 6, n. 4, p. 86-88, 1993.

WANG, X.; ROSS, R. J.; MCCLELLAN, M.; BARBOUR, R. J.; ERICKSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; MCGINNIS, G. D. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. **Wood and Fiber Science**, p. 522-533, 2001.

WU, C.; WANG, Z.; HU, S.; LEPINE, J.; NA, X.; AINALIS, D.; STETTLER, M. An automated machine-learning approach for road pothole detection using smartphone sensor data. **Sensors**, v. 20, n. 19, p. 5564, 2020.

ZHANG, S.; ZHOU, J.; CHUI, Y. H. Simultaneous evaluation of bending and shear stiffness of wood I-joists by transverse vibration tests. **Engineering Structures**, v. 243, p. 112643, 2021.

ZHAO, X.; HAN, R.; DING, Y.; YU, Y.; GUAN, Q.; HU, W.; LI, M.; OU, J. Portable and convenient cable force measurement using smartphone. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 5, p. 481-491, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-015-0132-9>.

ANEXO

Fluxograma referente ao processo do Teste de Vibração Transversal em viga de madeira usando smartphone

