



ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM CORPOS DE PROVA DE COMPOSTOS DE MADEIRA

WAVE PROPAGATION TEST ON SPECIMENS OF WOOD COMPOSITES

ENSAYO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS EN CUERPOS DE PRUEBA DE COMPUESTOS DE MADERA

Adriana Braga Guimarães¹, Matheus Barreto de Góes², Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco³

e463112

<https://doi.org/10.47820/recima21.v4i6.3112>

PUBLICADO: 06/2023

RESUMO

O objetivo deste artigo é apresentar teorias e metodologias aplicáveis à madeira para determinação dos módulos de elasticidade, através de ensaios não destrutivos de Excitação por impulso. Foram utilizadas 5 amostras de compensado de madeira, em dimensões e massas similares e os ensaios realizados através de *software* e equipamentos da Sonelastic, da ATCP. No decorrer do processo são realizados pequenos impactos nas peças, provocando ondas acústicas que são analisadas e medidas pelo *Software*. As amostras foram caracterizadas com relação aos principais modos de vibração (flexional, torcional e longitudinal) e ao final dos testes foi possível estabelecer relações comparativas entre as médias dos módulos de elasticidade estático e de ruptura obtidos por meio da técnica.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira. Ensaio não destrutivo. Excitação por impulso. Módulos Elásticos.

ABSTRACT

The aim of this article is to present theories and methodologies applicable to wood to determine the modulus of elasticity, through non-destructive tests of impulse excitation. 5 plywood samples were used, in similar dimensions and weights, and the tests were carried out using software and equipment from Sonelastic, from ATCP. During the process, small impacts are made on the parts, causing acoustic waves that are analyzed and measured by the Software. The samples were characterized in relation to the main modes of vibration (flexional, torsional and longitudinal) and, at the end of the tests, it was possible to establish comparative relationships between the means of the static modulus of elasticity and rupture obtained through the technique.

KEYWORDS: Wood. Non-destructive rehearsal. Impulse excitation. Elastic Modules.

RESUMEN

El objetivo de este artículo es presentar teorías y metodologías aplicables a la madera para determinar el módulo de elasticidad, a través de ensayos no destructivos de impulso de excitación. Se utilizaron 5 muestras de madera contrachapada, de dimensiones y pesos similares, y los ensayos se realizaron con software y equipos de Sonelastic, de la ATCP. Durante el proceso se producen pequeños impactos en las piezas, provocando ondas acústicas que son analizadas y medidas por el Software. Las muestras fueron caracterizadas en relación a los principales modos de vibración (flexión, torsión y longitudinal) y, al final de los ensayos, fue posible establecer relaciones comparativas entre las medias de los módulos estáticos y de ruptura obtenidos a través de la técnica.

PALABRAS CLAVE: Madera. Ensayo no destructivo. Excitación de impulsos. Módulos Elásticos.

¹ Arquiteta e Urbanista. Universidade Federal de Minas Gerais.

² Doutorando em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável na Universidade Federal de Minas Gerais.

³ Docente do Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM CORPOS DE PROVA DE COMPOSTOS DE MADEIRA
Adriana Braga Guimarães, Matheus Barreto de Góes, Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

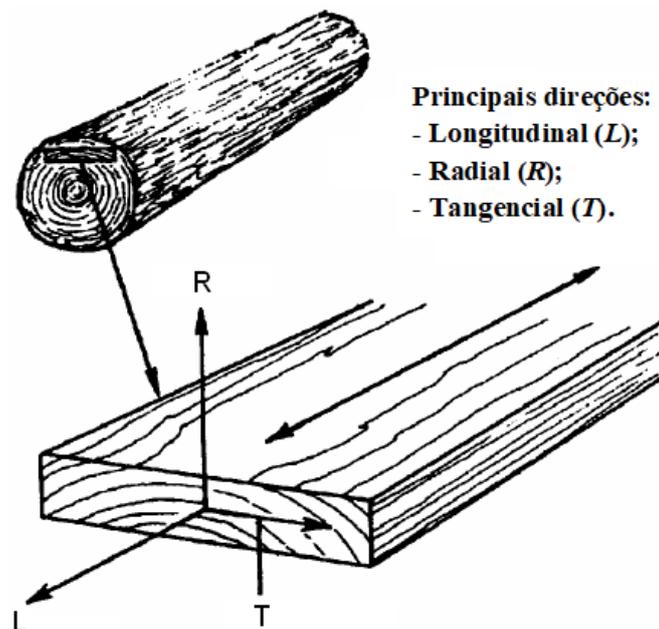
INTRODUÇÃO

O estudo da anisotropia implica no conhecimento da lei constitutiva que rege o material e, conseqüentemente, na determinação do tensor constitutivo e dos elementos presentes nesse tensor. Nesse contexto, a adequação de um material a um determinado modelo está balizada na existência de eixos de simetria elástica. Nesses eixos há constâncias nas propriedades de elasticidade do material. Evidentemente, não havendo coincidência entre eixos geométricos e eixos de simetria elástica, o problema recairá em soluções mais complexas e trabalhosas.

Num modelo completamente anisotrópico e elástico existem 81 constantes a se conhecer. Num modelo ortotrópico (três planos de simetria elástica) há 9 elementos presentes no tensor constitutivo, enquanto em um modelo monotrópico há 5, e assim por diante.

A madeira, devido à sua própria constituição (interna e externa), pode ser considerada ortotrópica. Os eixos de simetria elástica (Figura 1) são os eixos longitudinal L, tangencial T, e radial R (MASCIA; TODESCHINI; NICOLAS, 2013).

Figura 1 - Principais direções adotadas para madeiras



Fonte: Adaptado de CALIL, (2003)

O módulo de elasticidade é a capacidade do material resistir às deformações produzidas pela força aplicada e tornar-se completamente recuperável após as cargas serem removidas, e o módulo de ruptura que reflete a capacidade máxima de um material suportar um dado esforço.

A determinação dos módulos elásticos é crucial para o desenvolvimento, a seleção e o controle de qualidade de madeiras e derivados, assim como para simulações e cálculos estruturais. Estas aplicações são possíveis devido à sensibilidade dos módulos elásticos à presença de descontinuidades, defeitos, rachaduras, nós, alterações microestruturais e à composição química (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM CORPOS DE PROVA DE COMPOSTOS DE MADEIRA
Adriana Braga Guimarães, Matheus Barreto de Góes, Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

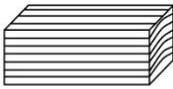
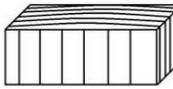
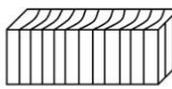
CARACTERIZAÇÃO DOS MÓDULOS ELÁSTICOS

Na década de 1990 foram desenvolvidos sistemas de medição automatizados para a caracterização dos módulos elásticos de materiais refratários em função do tempo e da temperatura. Estes sistemas são baseados em computador e apresentam diversas vantagens, principalmente na discriminação das frequências, como por exemplo o Sonelastic, que além da frequência fundamental, também lista as frequências harmônicas presentes e os respectivos amortecimentos. Os métodos dinâmicos subdividem-se em: excitação por impulso e varredura de frequência (CARRASCO *et al.*, 2017).

O método de propagação de onda de excitação por impulso baseia-se essencialmente na determinação dos módulos elásticos de um material a partir das frequências naturais de vibração de um corpo de prova de geometria regular. Estas frequências são excitadas por meio de um impacto mecânico de curta duração, posteriormente seguido da captação da resposta acústica por meio de um sensor. No final, um tratamento matemático é feito no sinal para a obtenção do espectro de frequências, em seguida são calculados os módulos elásticos dinâmicos através de equações previstas em norma, considerando nestas equações a massa, geometria, dimensões do corpo de prova e a frequência obtida pelo equipamento. A vibração do corpo de prova pode variar em diferentes modos, e para cada um desses destes modos existirá uma frequência fundamental característica (HEYLIGER *et al.*, 2001).

Basicamente, são três os modos de vibração empregados em corpos de prova prismáticos: longitudinal, flexional ou transversal e torcional. Os dois primeiros permitem o cálculo do módulo de elasticidade e o último possibilita a determinação do módulo de deformação transversal e o coeficiente de Poisson.

Tabela 1 – Módulos elásticos determináveis pela Técnica de Excitação por Impulso de acordo com a orientação das fibras e em função dos modos de vibração

		Orientação do corpo de prova		
		Longitudinal	Tangencial	Radial
				
Modo de vibração	Flexional	E_L	E_T	E_R
	Torcional	$G_{ef} (G_{LT}, G_{LR})$	$G_{ef} (G_{LT}, G_{RT})$	$G_{ef} (G_{LR}, G_{RT})$
	Longitudinal	E_L	E_T	E_R

Fonte: ATCP Engenharia Física



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM CORPOS DE PROVA DE COMPOSTOS DE MADEIRA
Adriana Braga Guimarães, Matheus Barreto de Góes, Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

A Tabela 1 indica os módulos elásticos de madeiras. Nesta tabela os termos utilizados são definidos por:

EL – Módulo de Young na direção longitudinal;

ET – Módulo de Young na direção tangencial;

ER – Módulo de Young na direção radial;

Gef – Módulo de cisalhamento efetivo determinado pelo Sistema Sonelastic®, corresponde a uma combinação dos módulos G_{ij} entre parênteses [5];

GLT – Módulo de rigidez associado a deformações de cisalhamento no plano tangencial (LT) resultante do cisalhamento nos planos LR e RT;

GRT – Módulo de rigidez associado a deformações de cisalhamento no eixo transversal (RT) resultante do cisalhamento nos planos LR e LT;

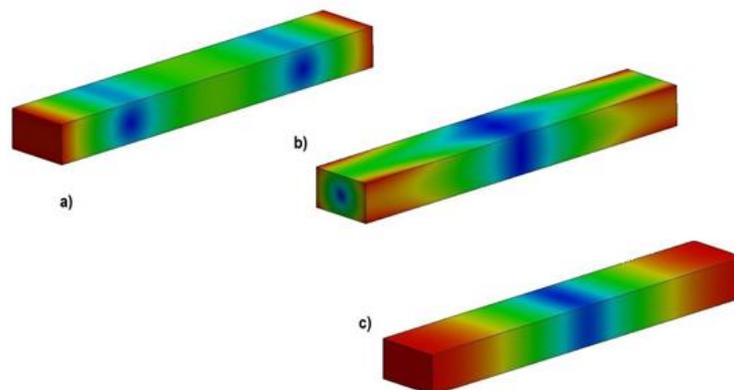
GLR – Módulo de rigidez associado a deformações de cisalhamento no plano radial (LR) resultante do cisalhamento nos planos LT e RT.

MATERIAIS E MÉTODOS

Um corpo de prova pode vibrar em diferentes modos e para cada um desses há uma frequência fundamental.

O que determina qual modo de vibração será excitado são as condições de contorno impostas ao corpo de prova. A frequência fundamental destes modos é uma função da geometria, da massa, das dimensões e dos módulos elásticos. Na Figura 2 são ilustradas as condições de contorno para os principais modos de vibração de uma barra. A partir das frequências de ressonância do corpo de prova em determinados modos de vibração são calculados os módulos elásticos dinâmicos correspondentes (Tabela 2).

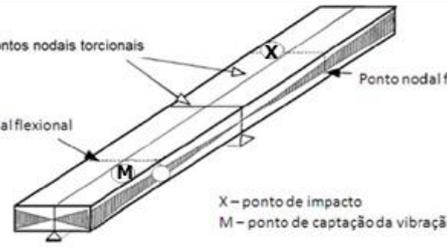
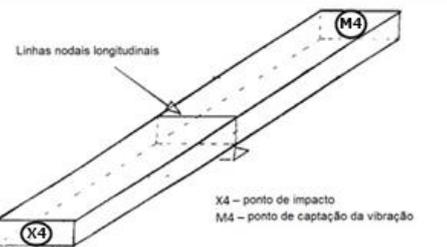
Figura 2 - Modos fundamentais de vibração



Fonte: ASTM (2007)

Na figura 2 as indicações são: a) flexional, b) torcional, c) longitudinal. As regiões em azul representam os pontos em que a amplitude de vibração é mínima, enquanto as regiões em vermelho representam as regiões em que a amplitude de vibração é máxima.

Tabela 2 - Condições de contorno impostas ao corpo de prova de madeira ou derivado para a excitação do modo de vibração fundamental (a) flexional, (b) torcional e (c) longitudinal

<p>a) Apoio, excitação e captação para o modo de vibração flexional</p>	 <p>Pontos nodais flexionais X1 – ponto de impacto M1 – ponto de captação da vibração</p>
<p>b) Apoio, excitação e captação para o modo de vibração torcional</p>	 <p>Pontos nodais torcionais Ponto nodal flexional X – ponto de impacto M – ponto de captação da vibração</p>
<p>c) Apoio, excitação e captação para o modo de vibração longitudinal</p>	 <p>Linhas nodais longitudinais X4 – ponto de impacto M4 – ponto de captação da vibração</p>

Fonte: ASTM (2007)

PROCESSO LABORATORIAL

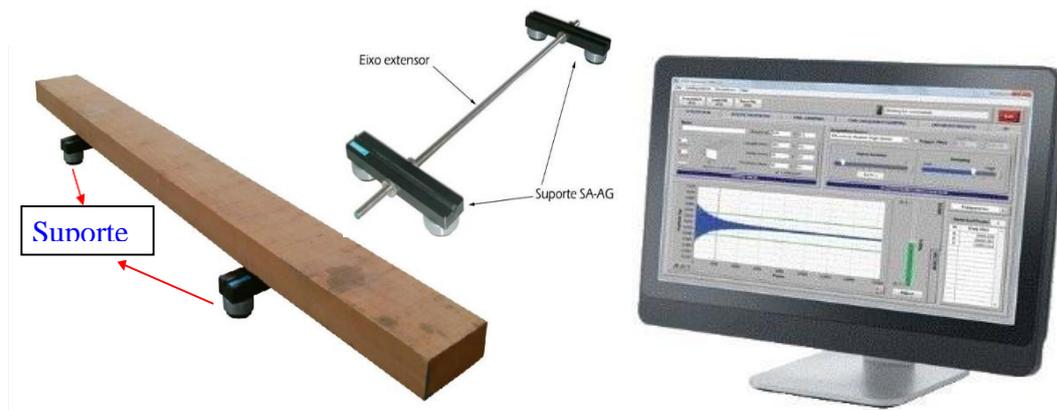
A Técnica de Excitação por Impulso determina os módulos elásticos do material a partir das frequências naturais de vibração de um corpo de prova de geometria regular (barra ou cilindro). Estas frequências são excitadas por meio de um impacto mecânico de curta duração, seguido da captação da resposta acústica por um sensor acústico. Um tratamento matemático é aplicado no sinal para a obtenção do espectro de frequências. A partir disso, são calculados os módulos elásticos dinâmicos considerando a geometria, a massa, as dimensões do corpo de prova e as frequências obtidas com o processamento da resposta acústica.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM CORPOS DE PROVA DE COMPOSTOS DE MADEIRA
Adriana Braga Guimarães, Matheus Barreto de Góes, Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Figura 3. Viga de madeira apoiada sobre o suporte ajustável para amostras grandes e visualização do software Sonelastic



Fonte: ATCP Engenharia Física (2013)

As amostras possuíam dimensões indicadas na tabela 3. Ao todo foram ensaiados 05 corpos de prova. As dimensões foram mensuradas utilizando um paquímetro e a massa, uma balança de precisão. Estes parâmetros são necessários para a realização dos cálculos de cada módulo.

Para a realização da caracterização por meio da Técnica de Excitação por Impulso foi empregado o equipamento Sonelastic. As amostras foram caracterizadas com relação aos principais modos de vibração (flexional, torcional e longitudinal) utilizando o suporte de precisão para barras retangulares, o atuador eletromagnético ajustável, um captador direcional e um software específico.

Tabela 3 – Dimensões e massa dos corpos de prova

Corpo de prova	Comprimento, L (mm)	Largura, W (mm)	Espessura, T (mm)	Massa (g)
AM - 01	575,67	150,00	25,00	783,2
AM - 02	575,00	149,67	25,00	858,9
AM - 03	575,67	150,00	25,00	741,9
AM - 04	575,67	150,00	25,33	787,7
AM - 05	575,33	150,00	24,33	791,9

Fonte: Arquivo pessoal (2022)



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM CORPOS DE PROVA DE COMPOSTOS DE MADEIRA
Adriana Braga Guimarães, Matheus Barreto de Góes, Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Figura 4 – Corpos de prova analisados



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

Figura 5 - Ensaio utilizando o método de propagação de ondas de excitação



Fonte: Arquivo pessoal, (2022)

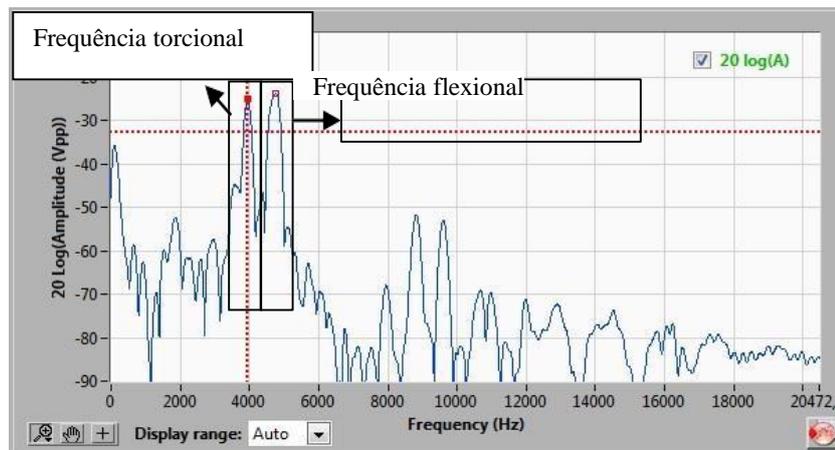


RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM CORPOS DE PROVA DE COMPOSTOS DE MADEIRA
Adriana Braga Guimarães, Matheus Barreto de Góes, Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Conforme a norma ASTM E1876 (2006) realizou-se a técnica de excitação por impulso. As frequências são excitadas por meio do pulsador, seguido da captação da resposta acústica por um sensor. Aplicado um tratamento matemático ao sinal (transformado de Fourier), para a obtenção do espectro de frequências correspondentes. Em conseguinte, calculados os módulos elásticos dinâmicos (OTANI; PEREIRA, 2013).

Figura 6 - Espectro de frequências obtido pelo Sonelastic (frequências de ressonância do modo flexionale torcional em destaque)



Fonte: OTANI; PEREIRA (2013)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 4 - Valores obtidos de módulos elásticos em função do modo de vibração

Corpo de prova	Modo longitudinal	Modo flexional	Modo torcional
	E_{ef} (GPa)	E_{ef} (GPa)	G_{ef} (GPa)
AM - 01	3,17	2,81	0,15
AM - 02	7,89	5,68	0,33
AM - 03	4,67	4,18	0,29
AM - 04	4,28	3,31	0,18
AM - 05	5,78	5,82	0,31

Foi observado em relação as frequências obtidas a partir do ensaio de propagação de ondas de excitação, que as frequências do modo de vibração longitudinal das cinco peças foram maiores que as frequências do modo de vibração flexional, que por sua vez, foram maiores que as frequências obtidas para o modo de vibração torcional, a Tabela 4 demonstra tal afirmação.

Chamou atenção o fato de os Módulos de elasticidade, entre peças de dimensões e massa similares apresentar variabilidade apesar da similaridade das peças.

Carrasco *et al.*, (2017) avaliaram em seu estudo as características mecânicas de 29 espécies de madeiras por meio de excitação por impulso. Em tal estudo diferenças como estas, segundo Carrasco *et al.* (2017), pode ser justificada devido ao fato de os poros, a superfície e a presença de trincas ou micro trincas nos corpos de prova poderem modificar o percurso das ondas mecânicas.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM CORPOS DE PROVA DE COMPOSTOS DE MADEIRA
Adriana Braga Guimarães, Matheus Barreto de Góes, Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C - 215**: standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards, 2008. 7 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D - 198**: standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards, 2008. 20 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E - 1876**: standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards, 2007. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003. 152 p.

CARRASCO, E. V. M.; BREMER, C. F. Estudo experimental dos elementos estruturais de madeira laminada colada de Eucalipto, *In: V Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras, Anais [...] do V Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras*, p. 559-568, julho, 1995.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. *In: Informativo Técnico – ATCP Engenharia Física*, 2010.

HEYLIGER, Paul; UGANDER, Pontus; LEDBETTER, Hassel. Anisotropic elastic constants: measurement by impact resonance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 13, n. 5, p. 356-363, 2001. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:5(356)

MASCIA, N. T.; TODESCHINI, R.; NICOLAS, E. A. Avaliação de critério de resistência de materiais anisotrópicos aplicado à madeira utilizando ensaios uniaxiais e biaxiais. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, Passo Fundo, v. 10, n. 2, p. 5-30, jul./dez. 2013.

MELO, A. V.; CARRASCO, E. V. Análise de Adesivos em Madeira Laminada Colada. *In: Anais [...] do IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras*, Cuiabá, julho, 2004.

OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. Guia de caracterização dos módulos elásticos e do amortecimento de madeiras e derivados utilizando as soluções SONELASTIC. Ribeirão Preto: ATCP Engenharia Física, 2013.

OTANI, L. B.; SEGUNDINHO, P. G. A.; MORALES, E. A. M.; PEREIRA, A. H. A Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a Técnica de Excitação por Impulso, *In: Informativo técnico-científico ITC05 /ATCP*, São Paulo, 2017.