

Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso

Evaluation of mechanical characteristics of wood by means of impulse excitation

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco¹, Caio Brant Vargas²,
Marina de Faria Souza³, Judy Norka Rodo Mantilla⁴

¹ Escola de Arquitetura – TAU/UFMG, Belo Horizonte, MG. mantilla@dees.ufmg.br

² Escola de Arquitetura – TAU/UFMG, Belo Horizonte, MG. caiobranstvargas@gmail.com

³ Escola de Arquitetura – TAU/UFMG, Belo Horizonte, MG. marinafaria25@gmail.com

⁴ Faculdade de Engenharia e Arquitetura – Universidade FUMEC, Belo Horizonte, MG. judy.mantilla@fumec.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é determinar as características mecânicas: módulo de elasticidade, resistência à compressão, resistência à tração paralelo à grã e resistência ao cisalhamento, de 29 espécies de madeiras brasileiras por meio de ensaios não destrutivos. Foram usados 29 corpos de prova de 29 espécies de madeiras. Os corpos de prova foram preparados cuidadosamente de maneira que estejam isentos de defeitos. O aparelho utilizado foi o Sonelastic. Ele serve para realizar ensaios não destrutivo utilizando ondas acústicas provocadas por impacto. Por meio de um *software*, que analisa a onda acústica, é determinado o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de deformação transversal dinâmico. Utilizando os valores das características mecânicas, das 29 espécies de madeiras, fornecidas pela norma NBR 7190 e pelo IPT, foi realizado uma análise de regressão entre as características mecânicas e o módulo de elasticidade dinâmico. Conclui-se que o uso da técnica de excitação por impulso, para estimativa do módulo de elasticidade, apresenta uma alta correlação entre as variáveis estudadas ($R^2 = 97,54\%$). O módulo de elasticidade dinâmico é em média 5,81% maior do que o módulo de elasticidade estático. Para estimativa da resistência à compressão é uma alternativa promissora. O nível de significância é bom, com coeficiente de determinação de $R^2 = 74,53\%$. Já a estimativa da resistência à tração e ao cisalhamento poderiam levar a valores não muito confiáveis.

Palavras-chave: Madeira, características mecânicas, ensaios não destrutivos, excitação por impulso.

ABSTRACT

The objective of this paper is to determine the mechanical characteristics: modulus of elasticity, compressive strength, tensile strength parallel to fibers and shear strength, of 29 Brazilian wood species through nondestructive tests. Twenty-nine specimens of 29 species of wood were used. The specimens have been prepared carefully so they are free from defects. The device used was the Sonelastic. It serves to perform non-destructive tests using acoustic waves caused by an impact. By means of software, which analyzes the acoustic wave, the dynamic modulus of elasticity and the dynamic transverse deformation modulus are determined. Using the values of the mechanical characteristics, of the 29 species of wood, provided by NBR 7190 and IPT, a regression analysis was performed between the mechanical characteristics and the dynamic modulus of elasticity. It is concluded that the use of the impulse excitation technique, to estimate the modulus of elasticity, presents a high correlation between the studied variables ($R^2 = 97.54\%$). The dynamic modulus of elasticity is on average 5.81% higher than the static modulus of elasticity. To estimate the compressive strength is a promising alternative. The level of significance is good with coefficient of determination of $R^2 = 74.53\%$. On the other hand, the estimation of tensile strength and shear strength may lead to not very reliable values.

Keywords: Wood, mechanical characteristics, nondestructive testing, impulse excitation.

1. INTRODUÇÃO

A madeira foi um dos primeiros materiais utilizados pelo homem para fins estruturais, é um composto sólido, orgânico, formado essencialmente por celulose, cuja principal função é manter a sustentação das árvores [1].

É um material proveniente de caules que crescem anualmente em diâmetro e comprimento. Além de sua função estrutural, também serve como matéria-prima para processos diversificados como produção de papel, móveis e carvão vegetal. Devido às características microestruturais de origem natural, a madeira apresenta propriedades físicas distintas de acordo com a orientação (anisotropia) [1,2]. Entretanto, podem ser consideradas 3 direções principais e a madeira pode ser classificada como um material ortotrópico, ou seja, apresenta planos ortogonais de simetria que fazem com que suas propriedades sejam constantes de acordo com estes planos [3]. Esta classificação pode ser considerada uma simplificação, pois dependendo da propriedade que se está avaliando, verifica-se que há uma variação de valores ao longo das direções. A caracterização das propriedades elásticas se faz importante para materiais como a madeira, pois os resultados são utilizados na seleção de materiais, em simulações numéricas e em cálculos estruturais. Dada essa importância, os módulos elásticos também são largamente utilizados na classificação e no controle de qualidade de madeiras. Estas aplicações são possíveis devido à sensibilidade destas propriedades à presença de descontinuidades, defeitos, rachaduras, nós, microestrutura e composição química [3]. Os ensaios não destrutivos utilizando principalmente ondas ultrassônicas já são utilizados para determinar os módulos elásticos da madeira [4, 5, 6].

Os módulos elásticos são parâmetros fundamentais para a engenharia e aplicação de materiais, já que estão relacionados à descrição de várias outras propriedades mecânicas, como por exemplo, a tensão de escoamento, a tensão de ruptura, a variação de temperatura crítica para a propagação de trincas sob ação de choque térmico, entre outras. São propriedades intrínsecas do material que descrevem a lei constitutiva do material (relação entre tensão e deformação no regime elástico) e que dependem da sua composição química, microestrutura, estrutura (poros e fibras) e defeitos como por exemplo fissuras e trincas. Os módulos elásticos podem ser caracterizados por métodos quase-estáticos, métodos dinâmicos ou por ultrassom. Os métodos quase-estáticos ou isotérmicos são baseados em ensaios mecânicos usualmente destrutivos, e os dinâmicos ou adiabáticos, em técnicas de ressonância não destrutivas. Os valores determinados pelos métodos dinâmicos são maiores que aqueles determinados pelos estáticos em um percentual típico de 0,5% para metais. Para outros materiais, a diferença pode ser grande dependendo dos efeitos inelásticos presentes [18, 20].

Os métodos dinâmicos permitem obter informações sobre a integridade de um material tanto quantitativas (módulos elásticos) quanto qualitativas, além do controle de suas propriedades. O corpo de prova não fica inutilizado após o ensaio e pode ser empregado em sua função normalmente ou ensaiado muitas outras vezes. Por exemplo, no estudo do dano por choque térmico, é possível avaliar a evolução da resistência mecânica medindo-se o módulo de Young simultaneamente com a aplicação sucessiva de ciclos de choque térmico. Se fosse utilizada outra técnica, a medição de módulo de ruptura, por exemplo, seria necessária uma amostra para cada medição. Os métodos dinâmicos são normatizados e amplamente utilizados, principalmente para materiais frágeis compostos. O primeiro método dinâmico de aplicação prática foi desenvolvido por Forster em 1937 [7]. Neste método uma barra de seção retangular do material a ser caracterizado é pendurada por dois fios, um deles conectado a um acionador e o outro a um sensor. As frequências de ressonância são determinadas com uma excitação senoidal de frequência variável associada à observação do pico de resposta do corpo de prova, captado pelo sensor. Este método ainda é utilizado, principalmente para ultra altas temperaturas em atmosfera controlada [8]. Outros métodos surgiram na mesma época, contudo não eram práticos pela necessidade de aplicação de alta tensão elétrica e de fixação de partes metálicas no corpo de prova [9].

Os fundamentos matemáticos para os cálculos dos módulos elásticos dinâmicos com precisão foram desenvolvidos entre as décadas de 1940 e 1960. [10] apresentou em 1945 as equações para o cálculo dos módulos elásticos e da razão de Poisson a partir dos modos de vibração fundamentais. As equações propostas contam com fatores de correção empíricos para barras e cilindros. Em 1960 [11] apresentou um refinamento para as equações de [10] generalizando-as para modos de vibração de qualquer ordem, e não apenas para os modos fundamentais. Na década de 1960 foi desenvolvido o método de excitação por impulso utilizando o equipamento Grindosonic [12], que popularizou a caracterização dos módulos elásticos dinâmicos e estendeu o método para o campo do controle de qualidade e inspeção. Neste método, a partir de determinadas condições de contorno mecânicas, o corpo de prova é excitado em um determinado modo de vibração por um impulso. O equipamento capta esta vibração com um sensor piezoelétrico ou microfone e informa ao usuário a respectiva frequência de ressonância, a partir da qual são calculados os módulos. O Grindosonic é comercializado com as mesmas funcionalidades até o presente momento, porém 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 [8, 13]. Estes sistemas são baseados em computador e apresentam diversas vantagens frente ao tradicional Grindosonic, principalmente na discriminação das frequências, como por exemplo o Sonelastic [17], que além da frequência fundamental, também lista as frequências harmônicas presentes e os respectivos amortecimentos. Devido à importância, os procedimentos de caracterização não-

destrutivos pelos métodos dinâmicos foram normatizados [14, 15] e realizados esforços interlaboratoriais e intertécnicas para harmonização [16].

Os métodos dinâmicos subdividem-se em: excitação por impulso e varredura de frequência. O princípio dos métodos dinâmicos ou adiabáticos consiste em calcular os módulos elásticos a partir das frequências naturais de vibração do corpo de prova e de seus parâmetros geométricos [10, 11]. Estas frequências, em conjunto com as dimensões e massa, possuem uma relação unívoca com os módulos elásticos. Os métodos dinâmicos possuem a vantagem de empregar pequenas amostras e serem rápidos e não-destrutivos além da aplicação de baixas cargas. Basicamente, são três os modos de vibração empregados, por exemplo, 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. Do ponto de vista experimental, a metodologia pode ser separada em duas partes: a primeira consiste na excitação, detecção e obtenção das frequências de ressonância, e a segunda, no emprego de relações matemáticas e dos procedimentos computacionais, para obtenção dos módulos elásticos a partir das frequências de ressonância [17].

No método de excitação por impulso, o corpo de prova sofre um impacto de curta duração e responde com vibrações em suas frequências naturais de vibração de acordo com as condições de contorno impostas [14]. A Figura 1 mostra um esquema básico do posicionamento da amostra para medida das frequências de ressonância flexional e torcional para este método. O pulsador é o equipamento que aplica o impacto no corpo de prova para gerar as vibrações mecânicas, sem danificá-lo; e o transdutor o que capta a resposta acústica e a transforma em sinal elétrico de maneira que se possa ler as frequências de ressonância. Notar que o corpo de prova deve ser apoiado na posição dos nós da ressonância fundamental (localizados em 0,224L de cada extremidade) e o impulso deve ser dado no local de maior amplitude (ventre) para excitação das frequências flexionais e torcionais, respectivamente. As frequências são então relacionadas aos módulos elásticos por métodos matemáticos.

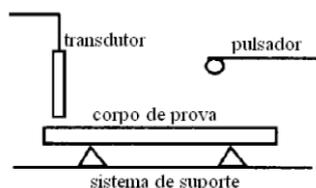


Figura 1: Corpo de prova para medida das frequências de ressonância flexional. Método de excitação por impulso [17].

Como foi visto, o método de excitação por impulso é amplamente utilizado para diversos materiais isotrópicos. O uso para materiais anisotrópicos como a madeira é restrito e ainda está em estudo. A referência [18] apresenta um estudo sobre a avaliação da degradação por microrganismos de vigas de madeira através de técnicas de vibração correlacionando com ensaios destrutivos à flexão. Já [19] apresentam um estudo sobre pilares de madeira de guarda corpos de estradas de rodagem. A técnica de excitação por impulso foi utilizada para detectar o estado fitossanitário dos pilares, os autores concluem que não existe uma correlação robusta entre as propriedades elásticas do material sadio e o atacado. Vários outros autores [20, 21, 22] também estudaram o estado fitossanitário das madeiras através de técnicas de excitação. A correlação entre as características mecânicas da madeira sadia com os módulos elásticos foi pouco estudada. Nesse sentido o objetivo deste trabalho é determinar os módulos elásticos dinâmicos de 29 espécies de madeiras brasileiras e correlacioná-los com as características mecânicas elásticas apresentadas pela norma brasileira NBR 7190 [24] e pelo IPT [25].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram estudadas 29 espécies de madeiras brasileiras, sendo: Cupiúba [*Goupia glabra*], Freijo [*Cordia goeldiana*], Eucalipto Citriodora [*Corymbia citriodora*], Lyptus [*Eucalyptus grandis*], Roxinho [*Peltogyne* spp.], Marinheiro [*Licania kunthiana*], Pinus oocarpa [*Pinus oocarpa*], Jatoba [*Hymenaea parvifolia*], Teca [*Tectona grandis*], Cambará [*Erisma uncinatum*], Breu vermelho [*Myroxylon balsamum*], Canelão [*Ocotea* spp.], Imbuia [*Mezilaurus itauba*], Cedro do Amazonas [*Cedrela* spp.], Sucupira amarela [*Diplotropis* spp.], Angelim pedra [*Hymenolobium excelsum*], Aroeira do sertão [*Astronium urundeuva*], Cedrinho [*Erisma uncinatum*], Cumarú [*Dipteryx odorata*], Eucalipto saligna [*Eucalyptus saligna*], Garapa [*Apuleia leiocarpa*], Ipê [*Tabebuia serratifolia*], Itaúba [*Mezilaurus itauba*], Jatobá [*Hymenaea* spp.], Macaranduba [*Manilkara* spp.], Peroba-rosa [*Aspidosperma polyneuron*], Pinho do Paraná [*Araucaria angustifolia*], pinus elliotti [*pinus elliotti*],

Pinus taeda [*Pinus taeda*]. A identificação das espécies foi feita visualmente comparando com as especificações do IPT [25].

Os corpos de prova (CPs) tinham dimensões de 3,80 x 11,50 x 0,98 cm e foram confeccionados um CP de cada espécie, Figura 2. Os CPs eram isentos de defeitos, razão pela qual foram adotados CPs com dimensões pequenas devido a que os ensaios não destrutivos, utilizando excitação por impulso, são altamente dependentes dos defeitos existentes na madeira.



Figura 2: Corpos de prova.

A determinação da massa foi feita com uma balança digital marca marte, com capacidade de 5000 g. e sensibilidade de 0,01 g. Para a determinação das dimensões foi utilizado um paquímetro digital da marca Mitutoyo com sensibilidade de 0,01 cm.

A umidade de cada CP foi determinada com um medidor portátil magnético. A umidade relativa do ar e a temperatura durante a determinação da umidade foi, respectivamente 68,4 % e a 22,6° C. Os valores da umidade das madeiras variaram no intervalo de 11,5 % a 12,5 %

A determinação dos módulos dinâmicos de elasticidade e de deformação transversal foi realizada utilizando o sistema de ensaios da Sonelastic da ATPC que utiliza a técnica de excitação por impulso. O equipamento consiste em um suporte ajustável para barras no qual serão posicionados os CPs e estimulados mecanicamente por um pulsador, produzindo uma onda sonora que se propagará pelo CP e logo será captada por um microfone (captador direcional). As informações obtidas passaram por uma central de processamento e, por meio do software da ATPC serão determinadas as constantes elásticas (figura 3) . As amostras foram caracterizadas com relação aos modos de vibração flexional e torcional.



Figura 3: Vista do ensaio por excitação por impulso.

A técnica de excitação por impulso utiliza a norma [23] para determinar as características mecânicas

de um material isotrópico. Para determinar os módulos o software do aparelho Sonelastic utiliza as frequências naturais de vibração do CP. As frequências são excitadas por meio do pulsador, seguido da captação da resposta acústica por um sensor (capador direcional). Aplica-se um tratamento matemático ao sinal (transformada de Fourier) para a obtenção do espectro de frequências correspondente. A partir disso, são calculados os módulos elásticos dinâmicos. Para isso é necessário considerar a geometria do CP, a massa, as dimensões e a frequência obtida pelo equipamento utilizado.

2.1 Fundamentação teórica

Os CPs são marcados com traços distantes $0,224 L$ de cada extremidade, sendo L o comprimento do CP. Estas posições correspondem às linhas nodais do CP referentes ao modo de vibração fundamental flexional. Então o CP é posicionado num suporte ajustável para barras. A função do suporte é sustentar o CP, apoiando-o nas linhas nodais de tal forma que fique livre para vibrar ao receber o impulso mecânico de excitação. Os CPs são apoiados nas linhas nodais referentes à flexão, independente do modo de vibração que se deseja excitar. O que se altera para cada modo é a posição de excitação e de captação da resposta acústica.

Na Figura 4 é possível ver o posicionamento adequado dos CPs para a obtenção dos modos. Para a obtenção do modo flexional, Figura (A), o impulso e a captação do sinal devem ser realizados no centro do CP. Já para a obtenção do modo torcional, Figura (B), o impulso deve ser aplicado em uma região lateral do CP, próximo de sua aresta.

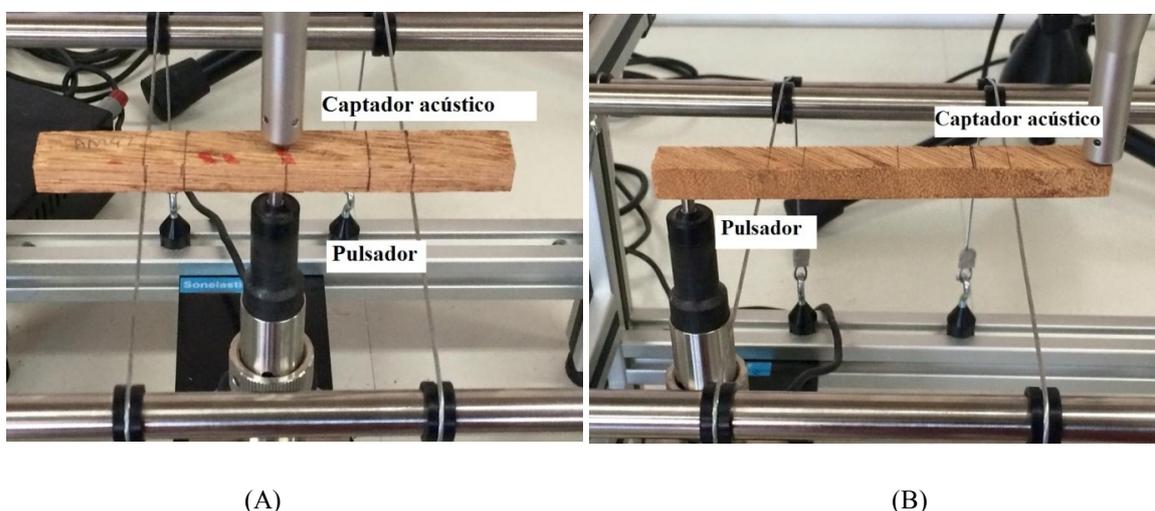


Figura 4: Posicionamento adequado dos CPs para a obtenção dos modos. (A) Para a obtenção do modo flexional. (B) Para a obtenção do modo torcional [17].

Segundo a norma ASTM E1876 [23], para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal dinâmico (E_d) é utilizada a frequência de vibração flexional (f_f) e pode ser determinado pela Equação 1, enquanto que para o módulo de deformação transversal dinâmico (G_d) é utilizada a frequência de vibração torcional (f_t) e pode ser determinado pela Equação 3.

$$E_d = 0,9465 \left(\frac{m f_f^2}{b} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T1 \quad (1)$$

Sendo que m é a massa da barra, L o comprimento, b a largura e t a altura da barra; f_f é a frequência de ressonância fundamental flexional e $T1$ é um fator de correção para o modo fundamental flexional dado pela Equação 2, sendo μ o coeficiente de Poisson.

$$T1 = 1 + 6,585 (1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2) - \left(\frac{t}{L} \right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L} \right)^4 - \left[\frac{8,34 (1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^4}{1 + 6,338 (1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^2} \right] \quad (2)$$

$$G_d = \left(\frac{4Lm f_t^2}{bt} \right) R \quad (3)$$

Onde f_t é a frequência de ressonância fundamental torcional e R é um fator dependente da relação entre a largura e altura da amostra dado pela Equação 4.

$$R = \left[\frac{1 + \left(\frac{b}{t}\right)^2}{4 - 2,521 \frac{t}{b} \left(1 - \frac{1,991}{e^{4\frac{t}{b}} + 1}\right)} \right] \left[1 + \frac{0,00851 n^2 b^2}{L^2} \right] - 0,060 \left(\frac{nb}{L}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{b}{t} - 1\right)^2 \quad (4)$$

O software do equipamento Sonelastic utiliza esta formulação para determinação dos módulos elásticos.

2.2 Resultados apresentados pelo software Sonelastic

O software Sonelastic está estruturado em módulos (ACQUISITION, ELASTIC PROPERTIES, TIME-DAMPING, TIME-FREQUENCY DAMPING, EXPORTED RESULTS e 3D) que realizam o processamento sequencial da resposta acústica.

Após introdução das dimensões e massa do CP, inicia-se a aquisição, o sistema aciona o pulsador para realizar um impacto e o sinal do pulso é captado pelo captador acústico e logo feito um pré-processamento do sinal adquirido. Na Figura 5 é apresentado o espectro capturado pré-processado, nele pode-se observar os diversos harmônicos indicando a frequência com maior amplitude que corresponderá à frequência que dará origem ao Ed.

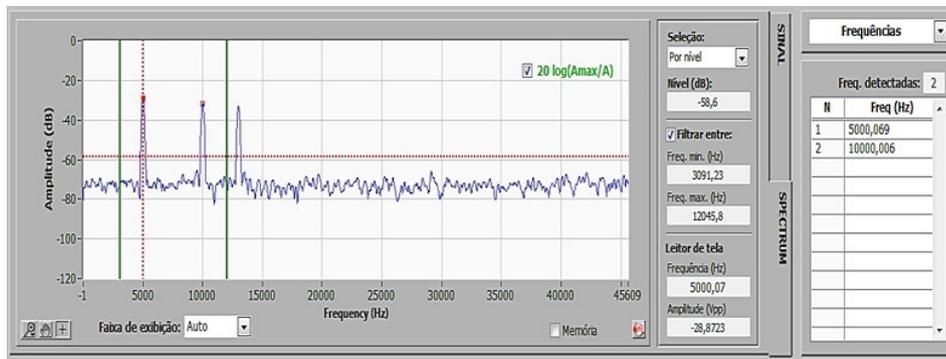


Figura 5: Tela de exibição do espectro gerado e dos comandos para tratamento do mesmo [17].

Logo inicia-se o processamento para obtenção dos módulos de elasticidade, ELASTIC PROPERTIES, primeiramente no modo flexional e em seguida no modo torcional, escolhe-se as maiores amplitudes tanto para o modo flexional como torcional, tendo cuidado em não escolher uma harmônica. Na figura 6 é mostrada uma tela com o espectro das frequências e o cálculo dos módulos.

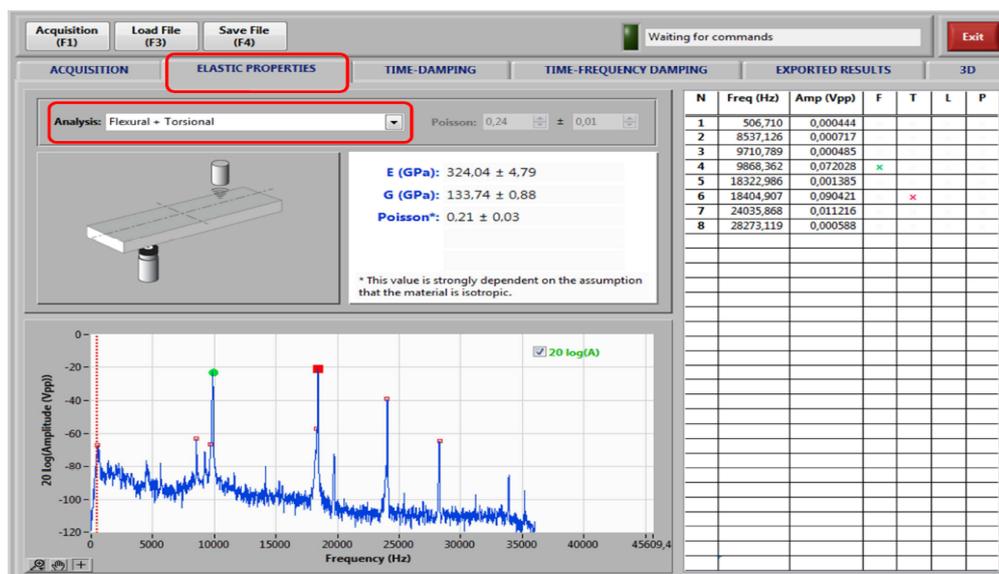


Figura 6: Tela do software Sonelastic exibindo o espectro de frequências e o cálculo dos módulos elásticos[17].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados experimentais dos módulos elásticos dinâmicos para todas as 29 madeiras e os valores das características mecânicas retiradas da norma NBR 7190 [24] e do IPT [25]. O resultado da média dos valores experimentais, da relação E_d/G_d , foi de 5,69, um valor muito inferior à norma brasileira [24] que é de 20, como também de vários outros autores como [2-3], que apresentam valores de 11 e 14 respectivamente. Isto pode ser explicado ao fato de que o ensaio de excitação por impulso, no modo torcional, é amplamente dependente da estrutura da madeira. O percurso das ondas mecânicas é modificado pelos poros da madeira elevando o amortecimento, aumentando a amplitude de vibração na ressonância e o tempo de persistência da vibração depois de cessada a excitação. Segundo [26] o amortecimento é particularmente sensível à presença de trincas e micro trincas. Assim os resultados do G_d são influenciados por uma outra variável, e que provavelmente seja o amortecimento. Além disso, o resultado de G_d é influenciado também pelo fato da madeira ser um material ortotrópico, com G variável conforme o plano (LR, LT, RT) analisado. Os valores determinados pelo *software* consideram o material isotrópico.

Tabela 1: Resultados experimentais e valores tabelados das madeiras estudadas

NOME DA MADEIRA	RESULTADOS EXPERIMENTAIS		VALORES DA NORMA NBR 7190 [24] E DO IPT [25]				
	E_d (GPa)	G_d (GPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	f_v (MPa)	E (GPa)
Angelim pedra	15,29	2,69	717	52,60	96,07	9,23	14,22
Aroeira do sertão	22,77	4,75	1255	114,67	207,68	27,27	20,89
Breu vermelho	14,57	2,51	950	71,10	132,60	18,00	15,23
Cambará	10,30	1,73	791	50,46	101,28	13,85	11,00
Cedrinho	12,24	2,42	590	42,2	80,20	7,40	12,12
Canelão	15,67	2,22	770	49,50	93,90	8,50	16,16
Cedro do amazonas	13,02	1,78	559	43,81	98,11	10,39	11,84
Cumaru	18,33	4,22	1090	94,20	178,30	14,20	19,31
Cupiuba	14,58	3,09	838	54,40	62,10	10,40	13,63
Eucalipto citriodora	19,71	2,94	999	62,00	123,60	10,70	18,42
Eucalipto saligna	15,08	2,65	731	46,80	95,50	8,20	14,93
Freijo	15,68	3,56	590	46,10	93,7	8,30	14,63
Garapa	19,82	3,63	892	78,40	108,00	11,90	18,36
Imbuia	9,33	1,64	650	44,10	91,60	9,60	8,83
Ipê	19,39	3,25	1068	76,00	96,80	13,10	18,01
Itaúba	18,34	3,63	960	68,4	126,50	12,10	16,39
Jatoba	24,85	4,09	1074	93,30	157,50	15,70	23,61
Jatobá	24,47	4,39	1074	93,30	157,50	15,70	23,61
Lyptus	12,98	1,95	640	40,30	70,20	7,00	12,81
Macaranduba	23,46	4,12	1143	82,90	138,50	14,90	22,73
Marinheiro	22,73	3,79	1010	81,90	144,60	10,60	23,23
Peroba rosa	13,61	2,48	823	64,98	138,12	17,46	13,11
Pinho do parana	16,53	3,00	580	40,90	93,10	8,80	15,23
Pinus elliotti	12,93	2,28	560	40,40	66,00	7,40	11,89
Pinus oocarpa	11,34	1,73	538	43,60	60,90	8,00	10,90
Pinus taeda	13,54	2,87	645	44,40	82,80	7,70	13,30
Roxinho	18,91	3,08	890	84,10	134,50	14,90	17,72
Sucupira amarela	16,20	2,68	940	92,30	147,60	13,60	16,06
Teca	10,93	1,92	660	47,00	92,00	9,20	9,31

Na figura 7 é apresentado um gráfico de $E \times E_d$ com uma síntese da análise de regressão e de variân-

cia realizada. Foi realizada uma regressão linear entre E e Ed, com a finalidade de obter uma relação matemática que permitisse prever o E das madeiras brasileiras a partir do Ed (É importante ressaltar que os valores de Ed, obtidos no Sonelastic, são na flexão, enquanto que os E retirados da NBR 7190 e do IPT são valores de E na compressão). O resultado encontra-se no gráfico E x Ed. Ainda neste gráfico são mostradas as faixas do intervalo de confiança da predição (IP) sobre a linha de regressão ajustada no nível de confiança de 95%, este IP representa um intervalo em que uma única nova observação esteja propensa a recair. Este IP é amplo devido à incerteza adicional envolvida na predição de uma única resposta versus a média de resposta. Nota-se no gráfico que o IP tem pequena amplitude indicando que existe uma excelente correlação entre as variáveis. Ainda neste gráfico pode-se observar o intervalo de confiança da predição (IC). Este IC representa um intervalo em que a resposta média esteja propensa a recair com um nível de confiança de 95%, notar que alguns valores estão fora deste intervalo, entretanto isso não indica que a qualidade da regressão é fraca. Na Equação 5 é apresentado o modelo de regressão matemática que ilustra a relação entre a variável preditora (Ed) e a variável de resposta, neste caso, o E. A análise de regressão indicou o grau com o qual o modelo prediz respostas para novas observações, o coeficiente de determinação foi $R^2 = 97,54\%$.

$$E = 0,2109 + 0,9419 \cdot Ed \quad (5)$$

A análise de variância juntamente com a análise de resíduos mostra a existência da regressão. O p-value $< 0,05$ indica uma alta significância da existência da relação entre E e Ed, a correlação entre E e Ed é positiva e altamente significativa ($r = 0,99$) e a distribuição de resíduos é aleatória e segue uma distribuição normal indicando que grande parte da influência da variável foi levada em consideração.

O coeficiente da Equação 5 indica a diferença entre E x Ed, neste caso o Ed é 5,81% maior do que E. Os autores [3, 4, 5, 27] indicam que esta diferença para apenas uma espécie de madeira varia entre 5% e 10%. No caso em estudo a diferença de 5,81% é para as 29 espécies de madeira.

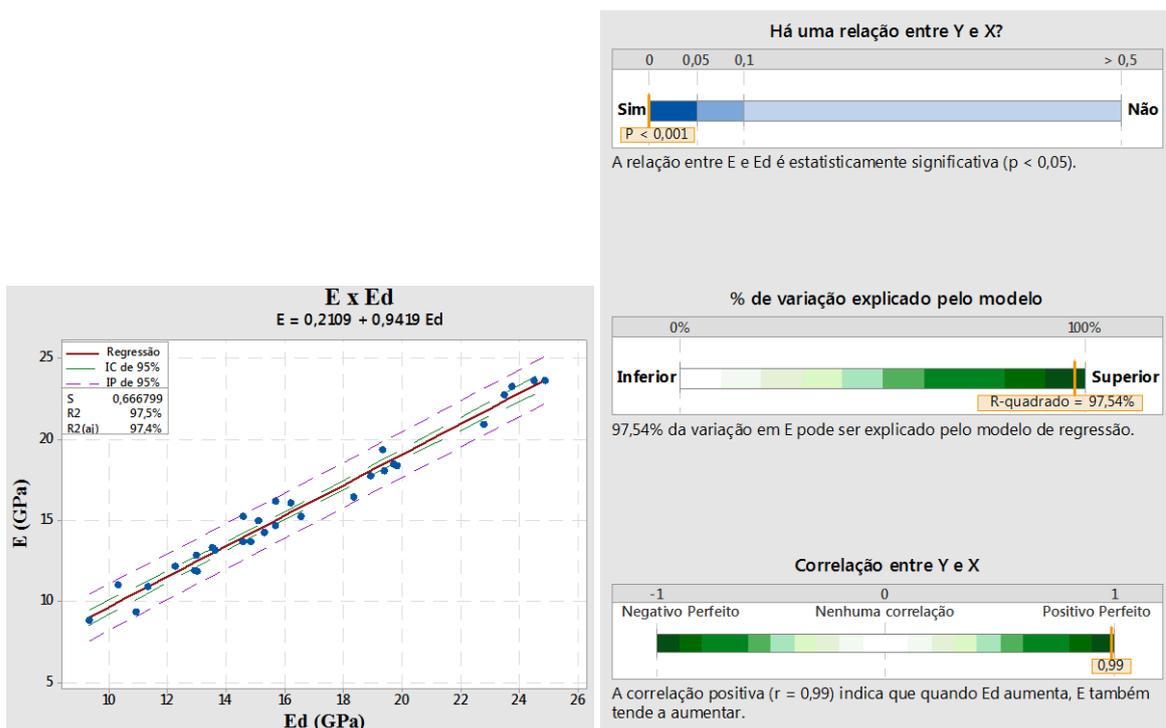


Figura 7: Resultados da análise de regressão entre E x Ed.

Nas figuras 8, 9 e 10 são apresentados os gráficos relacionando Ed com as variáveis resistência à compressão (f_c), à tração (f_t) e ao cisalhamento (f_v), respectivamente e outro gráfico, em cada figura, apresentando uma síntese da análise de regressão e da análise de variância realizada.

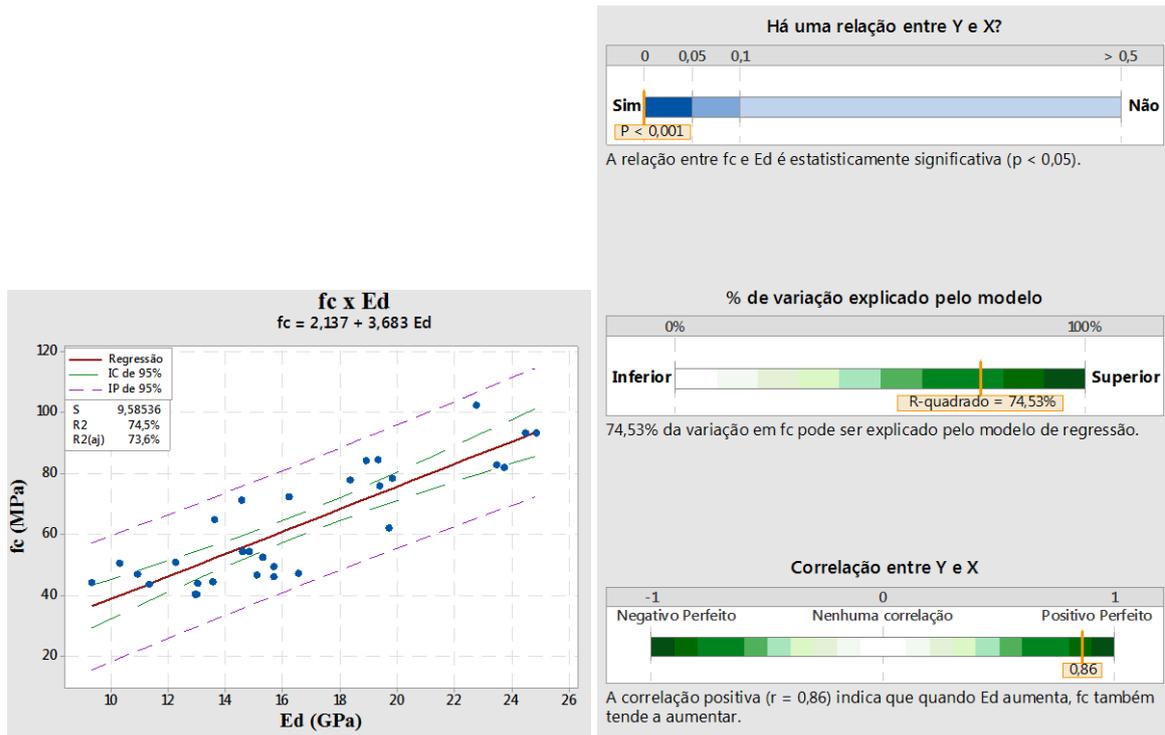


Figura 8: Resultados da análise de regressão entre fc x Ed.

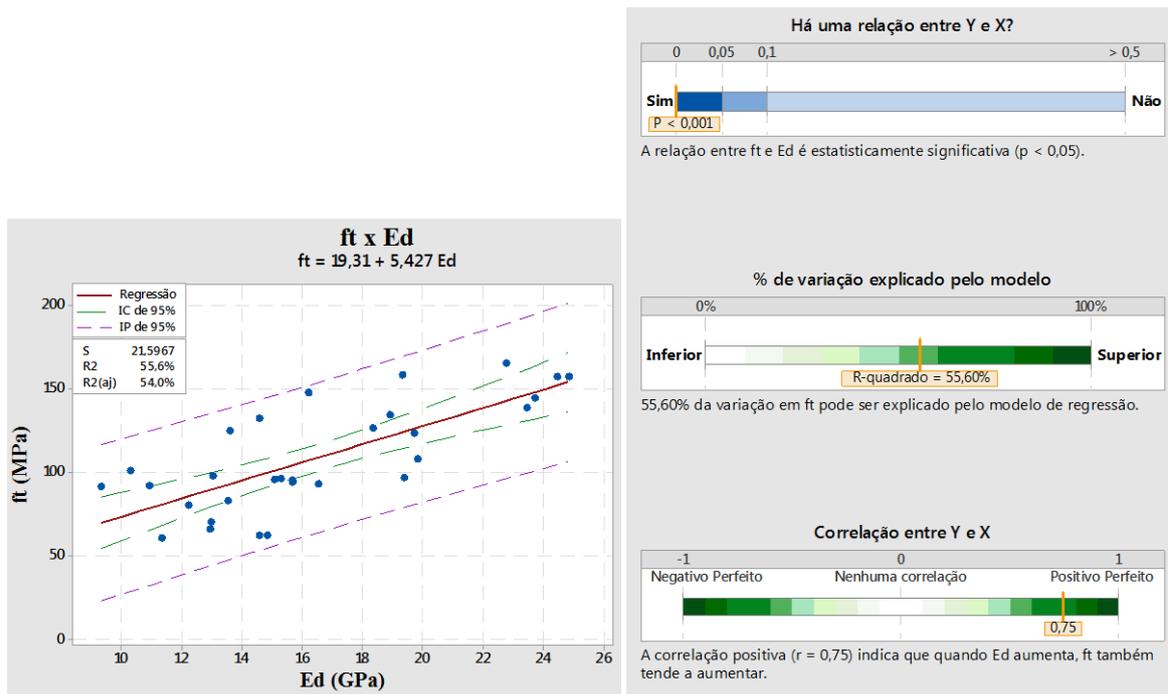


Figura 9: Resultados da análise de regressão entre ft x Ed.

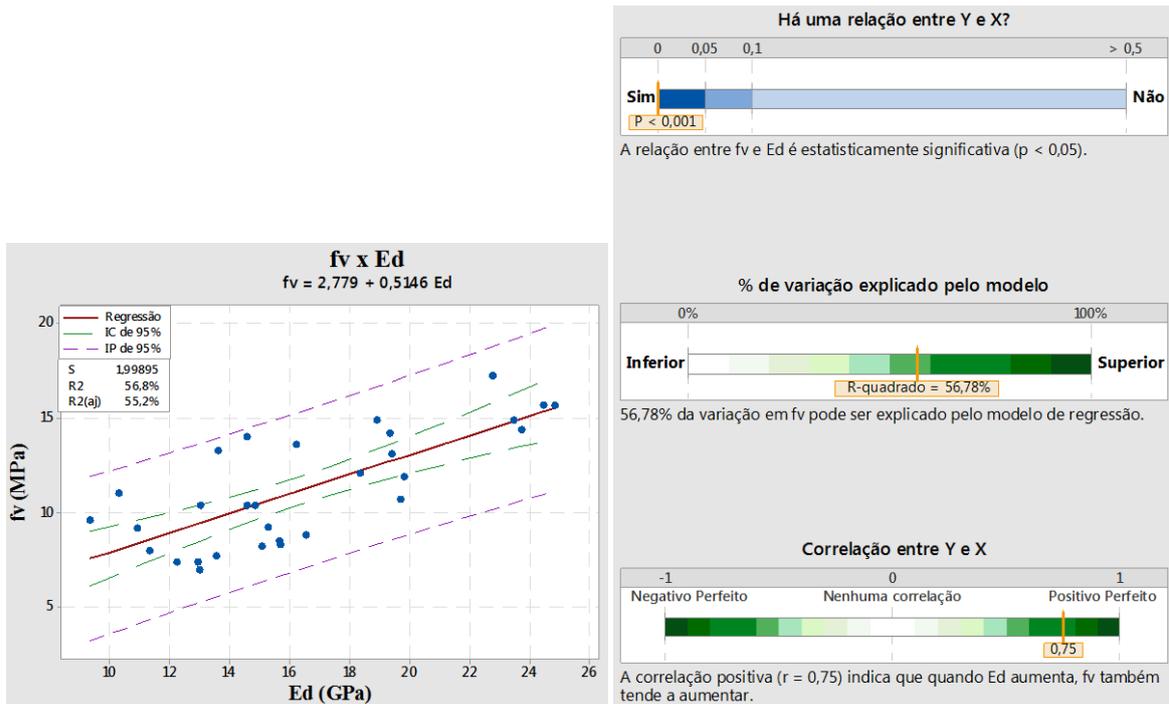


Figura 10: Resultados da análise de regressão entre fv x Ed.

Na Equação 6, 7 e 8 são apresentados os modelos de regressão explicitando a relação entre a variável preditora (Ed) e a variável de resposta, neste caso, o fc, ft e fv. O coeficiente de determinação foi de $R^2 = 74,53\%$, $R^2 = 55,60\%$ e $R^2 = 56,78\%$, respectivamente.

$$fc = 2,137 + 3,683 \cdot Ed \quad (6)$$

$$ft = 19,31 + 5,429 \cdot Ed \quad (7)$$

$$fv = 2,779 + 0,5146 \cdot Ed \quad (8)$$

A análise de variância juntamente com a análise de resíduos indicam a existência da regressão para fc, ft e fv, com a variável preditora Ed. O p-value < 0,05, para as 3 regressões, indica um nível bom de significância da existência da relação entre Ed e fc, Ed e ft, Ed e fv. A correlação entre Ed e cada uma das variáveis fc, ft e fv é positiva e significativa ($r = 0,86$, $r = 0,75$, $r = 0,75$, respectivamente) e a distribuição de resíduos é aleatória e segue uma distribuição normal indicando que grande parte da influência da variável foi levada em consideração.

A estimativa da resistência à compressão por meio do módulo de elasticidade dinâmico tem um nível bom de significância ($R^2 = 74,53\%$), já a estimativa da resistência à tração e ao cisalhamento não é muito significativa, este fato foi comprovado por vários autores [1,3].

4. CONCLUSÕES

O uso da técnica de excitação por impulso para estimativa do módulo de elasticidade das madeiras brasileiras mais utilizadas na construção civil, é plenamente justificável. O coeficiente de determinação $R^2 = 97,54\%$ é altamente significativo indicando apenas que 2,46% das previsões estarão fora da estimativa, isso com nível de significância de 95%.

O módulo de elasticidade dinâmico é em média 5,81% maior do que o módulo de elasticidade estático à compressão paralela às fibras.

A técnica de excitação por impulso para estimativa da resistência à compressão paralela das madeiras brasileiras mais utilizadas é uma alternativa promissora. O nível de significância é aceitável com coeficiente de determinação de $R^2 = 74,53\%$. Já para estimar a resistência à tração e ao cisalhamento poderá levar a valores não muito confiáveis.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro dado a esta pesquisa.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] DİNÇKAL, Ç. “Analysis of Elastic Anisotropy of Wood Material for Engineering Applications”, *Journal of Innovative Research in Engineering and Science*, Global Research Publishing, pp. 67-80, Abr. 2011.
- [2] LEKHNITSKII, J. *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*, Moscow, Mair. Pleblishers, 1981.
- [3] BODIG, J., JAYNE, B.A. *Mechanics of wood and wood composites*, Malabar (EUA), Krieger Publishing Company, 1993.
- [4] ALVES, R.C., MANTILLA, J.N.R, BREMER, C.F., *et al.* “Application of Acoustic Tomography and Ultrasonic Waves to Estimate Stiffness Constants of Muiracatiara Brazilian Wood”, *Bioresources*, v. 10, n. 1, pp. 1845-1856, 2015.
- [5] CARRASCO, E.V.M., MANTILLA, J.N.R. “Applying failure criteria to shear strength evaluation of bonded joints according to grain slope under compressive load”, *International Journal of Engineering & Technology*, v. 13, n. 4, pp. 19-25, 2013.
- [6] CARRASCO, E.V.M., MANTILLA, J.N.R., “Failure criteria for shear strength evaluation of bonded joints according to grain slope under tension load”, *BioResources*, v. 10, n. 2, pp. 3602-3614, 2015.
- [7] FORSTER, F.Z. “Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitäts-moduls und der Dämpfung”, *Zeitschrift Für Metallkunde*, v. 29, n. 109, pp. 325-335, jul. 1937.
- [8] LINS, W., KAINDL, G., PETERLIK, H., *et al.*, “A novel resonant beam technique to determine the elastic moduli in dependence on orientation and temperature up to 2000°C”, *Review of Scientific Instruments*, v.70, n.7, pp. 3052-3058, Apr.1999.
- [9] IDE, J.M., “Some Dynamic Methods for Determination of Young’s Modulus”, *Review of Scientific Instruments*. v. 6, pp. 296-298, May1935.
- [10] PICKETT, G., “Equations for Computing Elastic Constants from Flexional and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders”, *Am. Soc. Test. Mater.*, v. 45, pp. 846-865, 1945.
- [11] KANEKO, T., “Relation Between Flexional Resonant Frequency Equations for the Flexional Vibration of Cylindrical Rods”, *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, v. 64B, pp. 237, Feb.1960.
- [12] GRINDOSONIC, <http://www.grindosonic.com/index.htm>. Acessado em julho de 2016.
- [13] ROEBBEN, G., BOLLEN, B., BREBELS, A., “Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature”, *Rev. Sci. Instrum.*, v.68, pp. 4511-4515, Mar.1997.
- [14] ANÔNIMO (2007), E 1876-07: Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration; designation. ASTM International, 15 p.
- [15] ANÔNIMO (2000), E 1875-00: Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Sonic Resonance; designation. ASTM International, 7 p.
- [16] WOLFENDEN, A., HARMOUCHE, M.R., BLESSING, G.V., “Dynamic modulus measurements in metallic materials: results of an interlaboratory testing program”, *J. Testing and Evaluation*, v. 17, n. 1, pp. 2-13, Jan. 1989.
- [17] ATCP, <http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/sonelastic.html>. Acessado em janeiro de 2016.
- [18] MACHEK, L., MILITZ, V., SIERRA-ALVAREZ, R., “The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests”, *Wood Science and Technology*, v. 34, n. 6, pp. 467-472, Feb. 2001.
- [19] ARIJIT SINHA, MORRELL, J.J., CLAUSON M. “Use of acoustic assessment to detect decay and assess condition of wooden guardrail posts”, *Forest Products Journal*, v. 65, n. 7-8, pp. 314-219, Feb. 2015.
- [20] JUN-LI YANG, JUGO ILIC, TIM WARDLAW, “Relationships between static and dynamic modulus of elasticity for a mixture of clear and decayed eucalypt wood”, *Journal Australian Forestry*, v. 66, n. 3, pp 193-196, Apr 2003.

- [21] KIBET, S., SIRMAH, P., MBURU, F., *et al.*, “Wood dimensional stability and extractives as reasons for termite and fungal resistance of the lesser known *Albizia malacophylla* Kenyan wood species”, *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, v. 10, n. 1, pp. 48-54, Jun. 2013.
- [22] YANG, Z., JIANG, Z., HSE, C.Y. “Assessing the impact of wood decay fungi on the modulus of elasticity of slash pine (*Pinus elliottii*) by stress wave non-destructive testing”, *Journal: International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 117, pp. 123-127, Feb. 2017.
- [23] ANÔNIMO (2006), E1876: Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration. ASTM International, 15 p.
- [24] ANÔNIMO (1979), NBR 7190: *Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [25] IPT, http://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca. Acessado em 05 de maio de 2016.
- [26] TONNESEN, T., TELLE, R. “Thermal Shock Damage in Castables: Microstructural Changes and Evaluation by a Damping Method”, *Ceramic Forum Internacional*, v. 84, n. 9, pp. E132-136, 2007.
- [27] OTANI, L.B., SEGUNDINHO, P.G.A., MORALES, E. A. M. *Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a Técnica de Excitação por Impulso*, In: Informativo técnico-científico ITC-05 /ATCP, São Paulo, 2014.