III CBCTEM
Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira
Florianópolis - 2017

COMPARAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE EM DIFERENTES IDADES DETERMINADOS POR VIBRAÇÃO EM PEQUENAS PEÇAS ESTRUTURAIS

Thais de Souza Marcchiori[1]
Marcos Oliveira de Paula[2]
Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho[1]
Ana Boa[3]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo - Centro de Ciências Agrárias e Engenharias/ Departamento de Ciências Florestais e da Madeira.
[2] Universidade Federal de Viçosa/ Departamento de Engenharia Florestal.
[3] Universidade Federal do Espírito Santo - Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais / Departamento de Ciências Florestais e da Madeira

COMPARAÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE EM DIFERENTES IDADES DETERMINADOS POR VIBRAÇÃO EM PEQUENAS PEÇAS ESTRUTURAIS

Resumo: A fim de incrementar os estudos existentes sobre a pouca utilização da madeira e ampliar os conhecimentos sobre estas, o trabalho objetiva a utilização de uma técnica eficiente para a determinação do módulo de elasticidade levando em conta a relação comprimento/altura (L/h) e verificar a influência do cisalhamento no módulo de elasticidade por meio da comparação de ensaios destrutivos e não destrutivos. A madeira ensaiada no trabalho é o *Eucalyptus* sp. Os ensaios não destrutivos foram realizados com a técnica de vibração longitudinal e os destrutivos pela flexão estática. Com base nos resultados apresentados conclui-se que: O teor de umidade dos corpos de provas estão dentro do estipulado pela norma para a execução dos ensaios; A densidade aparente média apresentou valores inferiores aos encontrados em literaturas. Os resultados obtidos a partir desse trabalho proporcionaram condições para o aperfeiçoamento dos projetos de estruturas de madeira, cujos elementos estejam submetidos à solicitação de flexão. Apenas as relações L/h = 21 e L/h = 23 mostraram-se adequados ao estudar a relação L/h e o módulo de elasticidade. Não sendo, portanto, indicado a utilização de corpos de prova com a relação L/h inferior a 21.

Palavras-chave: estrutura de madeira, ensaio não destrutivo, resistência dos materiais.

COMPARISON OF ELASTICITY MODULES IN DIFFERENT AGES DETERMINED BY VIBRATION IN SMALL STRUCTURAL PARTS

Abstract: In order to increase existing studies on the low utilization of wood and to increase the knowledge about wood, the objective of this work is to use an efficient technique to determine the modulus of elasticity, taking into account the length / height ratio (L / h) and verify the influence of shear on the modulus of elasticity by comparing destructive and non-destructive tests. The wood tested at work is *Eucalyptus sp*. The non-destructive tests will be carried out with the technique of longitudinal vibration and the destructive ones by the static bending. Based on the results presented it is concluded that: The moisture content of the test bodies is within the stipulated by the standard for the execution of the tests; The mean apparent density presented lower values than those found in literatures. The results obtained from this work provided conditions for the improvement of the projects of wood structures, whose elements are subject to the request of flexion. Only the relations L / h = 21 and L / h = 23 were adequate when studying the relation L h and the modulus of elasticity. Therefore, the use of test bodies with the L / h ratio below 21 is not indicated.

Keywords: wood structure, non-destructive test, material resistance.

1. INTRODUÇÃO

Considerando a grande diversidade de madeiras existentes no país, bem como das importadas, e frente a sua disponibilidade, tanto provenientes de florestas naturais como plantadas, inúmeros estudos são realizados com o material, devido a suas propriedades físicas, mecânicas e anatômicas favoráveis para o fim estrutural. Segundo Marques (2008) a madeira é um material complexo, heterogêneo, anisotrópico, higroscópico, poroso e de origem biológica. Proporciona uma ótima resistência mecânica e se comparada ao seu peso se torna o melhor dentre os materiais utilizados nas construções.

A madeira é renovável, de características próprias e tem limitações como os demais produtos e matérias primas de mesma origem. É um material de ampla utilização podendo ser empregado na construção civil, combustível para geração de energia, fabricação de móveis e utensílios, suportes, moldes, dentre outros mais. Quanto à utilização de madeira maciça na construção civil apresenta inúmeras restrições, como as dimensões das peças dependerem do tamanho e diâmetro da árvore, além de outras anatômicas. Por essas restrições a madeira maciça tem perdido certa fatia de mercado para os produtos derivados, como os laminados colados, painéis OSB, entre outros. Soluções para muitos problemas práticos já foram obtidas com a utilização racional da madeira (LAHR, 1983).

A madeira, com suas peculiaridades, se torna um material interessante para o emprego no setor de construção. Dentre algumas vantagens principais podemos destacar o seu encaixe no conceito de material ecoeficiente, suas boas propriedades mecânicas, fácil trabalhabilidade de forma que exige ferramentas simples, ótimo isolamento térmico e baixa energia de processamento (REMADE, 2001).

Assim como acontece com todos os materiais empregados na construção civil, a madeira para uso estrutural deve ser classificada pelas suas propriedades físicas e mecânicas (SEGUNDINHO et al., 2012). Atualmente a norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) estabelece o uso da madeira pelo sistema de classes de resistência, isto é, a norma prescreve possíveis classes de resistência ao engenheiro, atribuindo a cada uma delas sua resistência característica, módulo de elasticidade e densidades. No projeto de revisão da NBR 7190 que se encontra em análise, a partir de 2011 foram incluídas regras de classificação visual para distribuição da madeira em lotes de uso estrutural, conforme sugerido por Carreira e Dias (2005), a partir da qual poderá ser feita a classificação mecânica. Dessa forma o processo se inicia por meio de métodos não destrutivos, onde é feita uma inspeção visual a fim de examinar algumas características intrínsecas (inclinação das fibras, nós, empenamento, anéis de crescimento, encurvamento, racha anelar e fenda), agrupando-as em lotes menos heterogêneos (FIORELLI; DIAS; COIADO, 2009) e, em seguida, faz-se a classificação mecânica da madeira com equipamentos capazes de quantificar adequadamente o módulo de elasticidade das peças.

Quando se quer avaliar a resistência mecânica de peças estruturais de madeira, deve-se ter em mente que há diversas formas diferentes de ensaiar. De acordo com Segundinho et al. (2012), algumas das técnicas utilizadas podem ser classificadas como não destrutivas, dentre elas podemos citar a de ultrassom, vibração transversal, vibração longitudinal, raio X e stress wave ou ondas de tensão. Uma das principais vantagens de utilização dessa técnica é o reaproveitamento do corpo de prova em outro ensaio. Os métodos não destrutivos são capazes de oferecer rápidas respostas e correlações lineares elevadas, tendo custos de equipamentos baixos, o que torna viável a execução desses ensaios.

Este trabalho teve por finalidade apresentar uma técnica eficiente, no que se refere à confiabilidade de resultados, para determinação do módulo de elasticidade longitudinal, por meio de vibração longitudinal, levando em conta a relação comprimento/altura (L/h) dos corpos de prova, e verificar a influência do cisalhamento no módulo de elasticidade por meio da comparação de ensaios não destrutivos (vibração longitudinal) com ensaios destrutivos (flexão estática).

2. MATERIAL E MÉTODOS

A presente investigação foi conduzida no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, em Jerônimo Monteiro - ES. A madeira utilizada foi o *Eucalyptus* sp abatido de plantios homogêneos. Foram selecionadas seis árvores, de modo aleatório, com bom fuste e grã reta, das quais foram retiradas toras de 1 m de comprimento cada. Com auxílio de uma serra de fita, as toras foram desdobradas em tábuas. Posteriormente, de cada tábua foram retirados os corpos de prova para realização dos ensaios, de acordo com as especificações das normas. Para todos os ensaios foram utilizados entre 8 e 12 corpos de prova, tendo o cuidado em descartar o material que apresentar defeitos, como inclinação acentuada da grã, presença de nós e/ou medula.

Os ensaios mecânicos foram realizados seguindo-se as prescrições da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Antecedendo os ensaios, destrutivo e não destrutivo, os corpos de prova foram acondicionados em câmara climatizada (20º C de temperatura e 65 % de umidade relativa) até o momento em que os mesmos apresentaram um teor de umidade de equilíbrio equivalente a 12%, estipulado por norma.

Além do ensaio destrutivo e não destrutivo foi realizada caracterização do material com base nas propriedades físicas.

2.1 Dimensionamento das amostras

As peças de madeira processadas para obtenção dos corpos de prova utilizados para determinar o módulo de elasticidade longitudinal, tiveram dimensões de 30 mm x 30 mm (b x h) e comprimento variável (L) nas seguintes razões de L/h: 23 (T1), 21 (T2), 19 (T3), 17 (T4), 14 (T5), 11 (T6), 8 (T7), 5 (T8), respectivamente, considerando a Figura 1 de cima para baixo. Para cada razão de L/h foram feitas 12 repetições. Todas as peças de madeira foram armazenadas em local coberto e mantidas em equilíbrio higroscópico com o meio.



Figura 1. Esquema de corpos de prova de ensaios de flexão.
Fonte: O autor (2014)

2.2 Caracterização das propriedades da madeira (física e mecânica)

2.2.1 Caracterização física

Os ensaios para a determinação da umidade, densidade e retratibilidade foram realizados no Laboratório Ciência da Madeira (LCM/UFES). Os procedimentos para a determinação da retratibilidade, da densidade e umidade seguiram a NBR 7190 (1997), para tanto, foram utilizadas 12 amostras para cada ensaio.

2.2.2 Caracterização mecânica

- Ensaio Destrutivo

Para caracterização das propriedades mecânicas foi utilizada a norma americana ASTM D 143 – *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber* (ASTM, 2000) para determinar às resistências à compressão paralela às fibras e cisalhamento paralelo às fibras.

- Ensaio de flexão estática

Os ensaios de flexão estática nas peças de madeira foram realizados com o objetivo de se obter o módulo de elasticidade à flexão. O ensaio é feito a três pontos nas peças de madeira, conforme a norma ASTM D 198 (2009). O deslocamento é medido por meio de relógio comparador, resolução 0,01 mm e curso de 50 mm, na face oposta à superfície de aplicação da força até atingir um limite (L/200), conforme ABNT NBR 7190 (1997). A força é medida por meio de um anel dinamométrico de capacidade igual a 4,7 KN. O módulo de elasticidade à flexão E_M é dado pela Equação 1.

$$E_M = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \qquad (1)$$

Em que:

E_M = módulo de elasticidade à flexão (MPa);
P = incremento de força (N);
L = distância entre apoios (mm);
δ = deslocamento vertical devido à força aplicada (mm);
I = momento de inércia da seção transversal (mm^4).



Figura 2. Ensaio de flexão estática.
Fonte: O autor (2014)

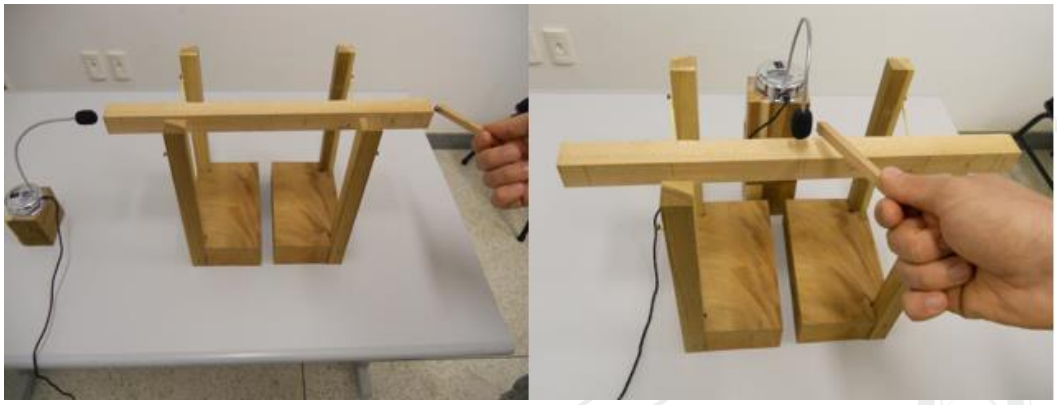
- Ensaio não destrutivo

No ensaio de vibração longitudinal, obtém-se uma resposta acústica composta por uma ou mais frequências naturais de vibração a partir das quais é calculado o módulo de elasticidade. O corpo de prova sofre um impacto na direção longitudinal conforme instruções da norma ASTM E 1876 (2007), no qual a direção do movimento da onda ocorre na mesma direção do modo de vibração longitudinal. O cálculo do módulo de elasticidade devido à primeira frequência de ressonância de vibração longitudinal E_l é dado pela Equação 2.

$$E_l = 4 \cdot \left(\frac{m \cdot f_l^2}{b} \right) \cdot \left(\frac{l}{h} \right) \quad (2)$$

Em que:

E_l = módulo de elasticidade (MPa);
m = massa (kg);
f_l = frequência de vibração longitudinal (Hz);
b = largura (mm); h = altura (mm); l = comprimento (mm).



(a) (b)

Figura 3. Ensaio de vibração longitudinal (a). Ensaio de vibração transversal (b).
Fonte: O autor (2014).

2.3 Análise dos dados

O delineamento estatístico adotado foi o inteiramente casualizado, no esquema fatorial (3 x 8), sendo três níveis referentes aos módulos de elasticidades (módulo de elasticidade estático – MOE_{est}, módulo de elasticidade por vibração longitudinal – MOE_{vl} e módulo de elasticidade por vibração transversal – MOE_{vt}) e oito níveis da relação L/h (5, 8, 11, 14, 17, 19, 21 e 23). Sempre que a análise de variância detectou diferenças entre os tratamentos a 95% de probabilidade foi utilizado o teste de Tukey também a 95% de probabilidade para a comparação dos módulos de elasticidade e regressão para a análise do efeito da relação L/h.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Física

Na Tabela 1, são apresentados os valores de densidade aparente (ρ), umidade (U), resistência média à compressão paralela às fibras (fc0,m) e resistência média ao cisalhamento paralelo às fibras (fv0,m) da madeira em estudo.

Tabela 1. Valores encontrados na caracterização física

Eucalyptus sp.	*U(%)*	*ρ(g.cm-3)*	*fc0,m (kgf/cm2)*
Média	**12,2**	**0,42**	**470,4**

(ρ) = Densidade aparente. (U) = Umidade. (fc0,m) = Resistência média à compressão paralela às fibras.

Os resultados dos ensaios possibilitaram demonstrar que a madeira encontra-se com umidade média de aproximadamente 12%, conforme especificado pela NBR 7190 como umidade ideal.

Em relação à densidade aparente média, observa-se que o valor obtido foi inferior aos resultados apresentados por diversos autores como Shimoyama e Barrichello (1991), Carmo (1996), Lima(1996) e Oliveira et al. (2005), fato esse justificado pelo fato de estarmos trabalhando com uma árvore jovem com idade de 10 anos, uma vez que é sabido que a relação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* tende a aumentar com a idade em consequência do aumento da espessura da parede celular e diminuição das larguras das células.

3.2 Caracterização mecânica

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios obtidos para o Módulo de elasticidade estático (MOE_{est}), o Módulo de elasticidade por vibração longitudinal (MOE_{vl}) e o Módulo de elasticidade por vibração transversal (MOE_{vt}), pelo teste Tukey a nível de 5% de probabilidade.

Tabela 2. Valores médios obtidos para o Módulo de elasticidade estático (MOE_{est}), o Módulo de elasticidade por vibração longitudinal (MOE_{vl}) e o Módulo de elasticidade por vibração transversal (MOE_{vt})

Tratamentos (L/h)	**MOE_{est} (GPa)**	**MOE_{vl} (GPa)**	**MOE_{vt} (GPa)**
5	1,44Cb	14,35Aab	8,55Bb
8	4,68Cb	13,02Aab	9,20Bb
11	10,53Ca	17,78Aa	14,31Ba
14	11,44Ba	16,82Aab	14,24ABa
17	12,59Ba	16,47Aab	14,66ABa
19	12,63Ba	17,88Aa	15,31ABa
21	14,52Aa	17,66Aa	15,93Aa
23	14,29Aa	17,36Aa	15,48Aa

(MOE_{est}) = Módulo de elasticidade estático. (MOE_{vl}) = Módulo de elasticidade por vibração longitudinal. (MOE_{vt}) = Módulo de elasticidade por vibração transversal.
*As médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Segundo Carreira (2012), conforme recomendação da norma NBR 7190 (ABNT, 1997), o esforço cortante pode ser desvalido no cálculo do módulo de elasticidade dinâmico pelo ensaio de vibração transversal para valores de L/h = 21.

Para o trabalho em questão, o módulo de elasticidade pelo ensaio de flexão para a relação L/h=21 foi de 14,52 GPa. Observa-se que os três tratamentos adotados não apresentaram diferença significativa para a relação L/h=21. Fato similar foi observado para relação L/h=23. No entanto, as demais relações L/h apresentaram diferença significativa para os três tratamentos estudados.

Segundo Lahr (1983) não há influência da relação vão livre-altura no módulo de ruptura de peças de madeira submetidas a esforços de flexão. Com isto, torna-se indiferente a adoção de corpos de prova com quaisquer valores de L/h para a determinação da resistência da madeira à flexão, podendo ser aproveitados para este objetivo, os mesmos corpos de prova utilizados para se estabelecerem os valores do módulo de elasticidade longitudinal real e o módulo de elasticidade transversal na flexão. No entanto, esse fato não foi observado para o Módulo de elasticidade estático.

O conhecimento destas relações permitirá a previsão, sem ensaios destrutivos, dos parâmetros de ruptura à flexão e à compressão paralela às fibras, possibilitando aproveitamento mais racional da madeira, através da prévia classificação das peças a serem empregadas estruturalmente Lahr (1983).

Ao analisar os valores do Módulo de elasticidade estático (MOEest) pelo método destrutivo, observa-se influência da relação L/h no cálculo do Módulo de elasticidade. Fato similar também foi observado no Módulo de elasticidade por vibração transversal (MOEvt). Exceto para a relação L/h = 21 e L/h = 23.

Na Figura 4 observa-se o comportamento dos módulos de elasticidade longitudinal (A), transversal (B) e flexão estática (C) em função da relação L/h.

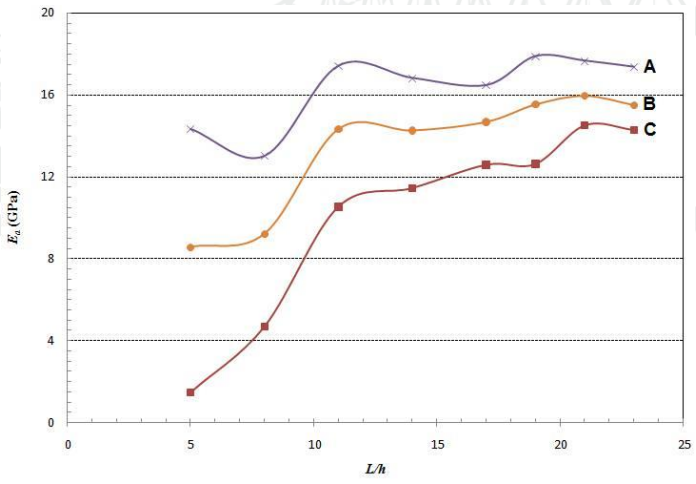


Figura 4. Módulos de elasticidade longitudinal (A), transversal (B) e flexão estática (C) em função da relação L/h.

Observa-se que os três tratamentos estudados apresentaram comportamento semelhante, no entanto, apenas as relações L/h=21 e L/h=23 apresentaram valores próximos ao valor real (curva B).

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados conclui-se que:

- O teor de umidade dos corpos de provas estão dentro do estipulado pela norma para a execução dos ensaios;

- A densidade aparente média apresentou valores inferior aos encontrados em literatura, o que pode ser justificado pelo fato de estarmos trabalhando com uma árvore jovem com idade de 10 anos, uma vez que, é sabido que a relação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* tende a aumentar com a idade em consequência do aumento da espessura da parede celular e diminuição das larguras das células;

- Os resultados obtidos a partir desse trabalho proporcionaram condições para o aperfeiçoamento dos projetos de estruturas de madeira, cujos elementos estejam submetidos à solicitação de flexão.

- Apenas as relações L/h = 21 e L/h = 23 mostraram-se adequados ao estudar a relação L/h e o Módulo de elasticidade. Não sendo, portanto indicado a utilização de corpos de prova com a relação L/h inferior a 21.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio do Programa Institucional de Iniciação Científica (PIIC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de iniciação científica, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) pelo financiamento da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials. ASTM D 143 – Standard test methods for small clear specimens of timber**.** Philadelphia, PA, 2000.

American Society for Testing and Materials. ASTM D 198: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. Philadelphia: ASTM, 2009.

American Society of 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. West Conshohocken, Pennsylvania, USA. 2007.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190: 1997 **–** Projeto de Estruturas de Madeira: 1997**.** Rio de Janeiro, 1997.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de *Pinus* sp plantadas no Brasil. Scientia Forestalis**,** n.67, p.78-87, 2005.

CARREIRA, M. R. Avaliação da Rigidez à Flexão de Toras de Madeira por meio de Vibração Transversal. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A.; COIADO, B. Propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais de *Pinus* sp: correlação entre resistência à tração e classificação visual. Revista Árvore, Viçosa – MG, v.33, n.4, p.741-750, 2009.

LAHR, F. A. R. Sobre a Determinação de propriedades de Elasticidade da Madeira. 1983. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 1983.

Madeira de Eucalipto na construção civil. Revista da Madeira. Ed. N° 59. Set. 2001. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=7&subject=Constru%E7%E3o%20Civil&title=Madeira%20de%20Eucalipto%20na%20Constru%E7%E3o%20Civil#>. Acesso em: 16 mar. 2013.

MARQUES, L. E. M. M. O papel da madeira na sustentabilidade da construção. 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

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