

INFLUÊNCIA DA MUDANÇA DA POSIÇÃO DE PEÇAS ROLIÇAS ESTRUTURAIS DE EUCALYPTUS NO CÁLCULO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL

André Luis Christoforo¹, Túlio Hallak Panzera², Paulo Henrique Ribeiro Borges³,
Francisco Antonio Rocco Lahr⁴

RESUMO

A madeira roliça possui grande emprego nas construções civis, desempenhando a função de vigas, colunas, fundações, postes para distribuição de energia elétrica entre outras, apresentando a vantagem de não ser processada, como é o caso da madeira serrada. O projeto envolvendo elementos roliços requer, além de outras variáveis estruturais, o conhecimento do módulo de elasticidade longitudinal. No Brasil, os documentos normativos que tratam da determinação das propriedades de rigidez e resistência para peças roliças de madeira estão em vigência há mais de vinte anos sem revisão técnica. As peças roliças por mais próximas de uma geometria tronco-cônica podem apresentar eixo com curvatura não nula, conduzindo a valores de elasticidade diferentes para posições distintas do elemento estrutural. Este trabalho tem como objetivo, através do ensaio de flexão a três pontos, avaliar a influência da mudança da posição das peças estruturais roliças de Eucalyptus no cálculo do módulo de elasticidade longitudinal. Os resultados encontrados indicaram a necessidade da realização do ensaio para pelo menos duas posições distintas da peças.

Palavras-chave: Madeira roliça. Módulo de elasticidade. Ensaio de flexão.

INFLUENCE ON CHANGE POSITION OF EUCALYPTUS STRUCTURAL TIMBER ON CALCULATION OF LONGITUDINAL MODULUS OF ELASTICITY

ABSTRACT

The round timber has great employ in civil construction, performing the function of beams, columns, foundations, poles for power distribution among others, with the advantage of not being processed, such as lumber. The projects with round timber require, among other structural variables, knowledge of the modulus of longitudinal elasticity. In Brazil, the standards that deal with the determination of the properties of strength and rigidity for round timber are in place for at least twenty years without a technical review. The elements closer to plump for a truncated cone geometry may present axis with nonzero curvature, leading to different values of elasticity for different positions of the structural element. This paper aims, by testing a three-point bending to assess the influence of the changing position of structural parts of Eucalyptus plump in calculating the longitudinal modulus. The results indicated the need to testing for at least two different positions of the parts.

Key words: Round timber. Modulus of longitudinal elasticity. Bending test.

¹ Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) - alchristoforo@yahoo.com.br

² Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) - tuliopanzera@hotmail.com

³ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - pborges@civil.cefetmg.br

⁴ Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São paulo (EESC/USP) - frocco@sc.usp.br

1. INTRODUÇÃO

Em razão da versatilidade e da disponibilidade, há séculos a madeira vem sendo utilizada como material estrutural. Com o passar dos tempos, a necessidade de novas tecnologias motivou o desenvolvimento de estudos sobre este material, tanto em sua forma original como processada, proporcionando aumento do conhecimento sobre as suas propriedades físicas e químicas, assim como das suas possibilidades de uso.

Em países com tradição no emprego da madeira em estruturas é comum a utilização de sistemas mistos, tanto de madeira maciça quanto dos seus derivados. Entretanto, as demandas associadas aos custos do processamento motivam pesquisas por busca de soluções que aliem alta eficiência da madeira como elemento estrutural a baixo custo de produção. Uma alternativa a este problema é a utilização desse material em sua forma roliça original, decorrente do crescimento natural da árvore, como demonstra Partel (1999), num estudo que consistiu em levantamento dos principais sistemas estruturais de habitações, edificações, torres de eletrificação e pontes de madeira roliça no Brasil e no exterior.

A Norma Brasileira para o Projeto de Estruturas de Madeira, NBR 7190:1997, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especifica os elementos roliços a partir dos diâmetros de base e de topo, independentemente da espécie utilizada. Este documento determina que as propriedades de resistência e rigidez sejam obtidas por meio de ensaios em corpos-de-prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, mesmo sendo a madeira um material não homogêneo e anisotrópico.

A observação das diferenças existentes nas propriedades mecânicas entre corpos-de-prova e peças de dimensões estruturais é tema para desenvolvimento de novas pesquisas. Batista et al. (2000) desenvolveram pesquisa experimental comparando valores do módulo de elasticidade obtidos de corpos-de-prova isentos de defeitos e de peças serradas de dimensões estruturais. Das três espécies estudadas, duas delas, Eucalipto e Cambará, apresentaram resultados fiéis, o mesmo não ocorrendo para a madeira Cupiúba, tendo apresentado valores para os modelos reduzidos cerca de 30% inferiores aos dos modelos estruturais.

Miná et al. (2004) avaliaram a resistência e a rigidez de postes roliços de madeira do gênero *Eucalyptus citriodora* em comparação com corpos-de-prova. Os

resultados de módulos de elasticidade encontrados para as peças estruturais foram superiores nos ensaios de flexão, sendo inferiores na compressão paralela.

Corsini et al. (2004) utilizaram a classificação visual e mecânica de corpos-de-prova isentos de defeitos e de peças estruturais do gênero *Eucalyptus citriodora*. As peças de madeira foram classificadas visualmente com base no texto da revisão da NBR 7190:1997 e ensaiadas a compressão, tração, cisalhamento e flexão. Como parte final da conclusão do trabalho, os autores chamam a atenção para a necessidade da normalização de ensaios de peças estruturais de madeira.

No Brasil, os documentos que tratam de elementos estruturais roliços são direcionados principalmente para atender ao mercado de postes, estando vigentes há pelo menos 20 anos sem revisão técnica. A norma NBR 6231:1980 (Postes de Madeira: Resistência à Flexão) prescreve o modo pelo qual deve ser feito o ensaio de resistência à flexão de postes de madeira. Uma das extremidades do elemento é engastada e na outra extremidade é aplicada uma força concentrada, gerando um deslocamento. Por meio de equação em que são considerados fatores como a força aplicada, características geométricas e o deslocamento medido, determina-se o módulo de elasticidade da peça.

A norma NBR 8456:1984 (Postes de Eucalipto Preservado para Redes de Distribuição de Energia Elétrica) estabelece as condições para a preparação e o recebimento de postes de Eucalipto preservados sob pressão, para serem empregados em redes aéreas de distribuição de energia elétrica.

A norma NBR 8457:1984 (Postes de Eucalipto Preservado para Redes de Distribuição de Energia Elétrica: Dimensões) padroniza os postes de eucalipto preservado também para serem utilizados em redes aéreas de distribuição de energia elétrica. São especificados: comprimento do poste, tipo, resistência nominal, flecha máxima, comprimento e diâmetro de engastamento, diâmetros a 20 centímetros do topo (mínimos e máximos) e perímetros de topo e de base.

A norma técnica NBR 6122:1996 (Projeto e Execução de Fundações) recomenda o uso da norma NBR 7190:1997 para a o cálculo da resistência de estacas de madeira, sendo que esta última limita-se a ensaios de resistência em corpos-de-prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, mesmo sendo conveniente o uso da peça estrutural para a determinação de suas propriedades mecânicas. Com relação ao emprego e ao estudo das propriedades de resistência e rigidez para peças roliças estruturais de madeira, destacam-se os trabalhos de

Ranta-Maunus (2000), Wolf e Moseley (2000), Ross et al. (2001), Calil et al. (2004), Pinto et al. (2004), Sales et al. (2004), Larson et al. (2004), Miná (2005), Miná e Dias (2008), Zangiácomo e Lahr (2008), Carreira e Dias (2009) e Sales et al. (2010).

Assim, faz-se necessário o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa para que sejam determinadas, de modo confiável, as propriedades de resistência e rigidez de elementos estruturais roliços como subsídios fundamentais para produtores e engenheiros.

Este trabalho objetiva empregar uma metodologia experimental alternativa juntamente com a mudança de posição da peça na determinação do módulo de elasticidade longitudinal em madeiras roliças de *Eucalyptus citriodora*, permitindo avaliar a influência da geometria no seu cálculo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal, foram utilizadas 24 peças roliças estruturais de madeira do gênero *Eucalyptus citriodora*, com comprimento médio de 750 cm e diâmetro médio à altura do peito em torno de 30 cm.

Neste trabalho, de forma alternativa às propostas apontadas por documentos normativos nacionais, o módulo de elasticidade foi obtido segundo o modelo de flexão estática a três pontos, por se tratar de um ensaio de fácil execução, se comparado com o de engastamento fixo, sendo o mesmo modelo de ensaio utilizado para o cálculo do módulo de elasticidade em corpos-de-prova de madeira proposto pela NBR 7190:1997 (ver Figura 1).

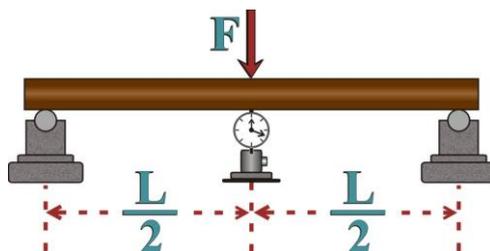


FIGURA 1. Ensaio de flexão estática segundo a norma NBR 7190:1997.

Para esta norma, o módulo de elasticidade é determinado por intermédio da Equação 1,

$$E = \frac{\Delta F \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad (1)$$

em que:

ΔF - incremento de carga;

E - módulo de elasticidade;

L - vão livre do elemento;

I - momento de inércia da seção transversal.

δ - flecha no meio do vão;

O momento de inércia da peça é calculado com base na circunferência medida no ponto de aplicação da força no ensaio de flexão, dando origem ao diâmetro equivalente (D_{eq}), sendo este aproximadamente igual à média aritmética entre diâmetros de topo e base. Esta aproximação é válida assumindo-se que as seções das peças estruturais são perfeitamente circulares, que os diâmetros variam linearmente no comprimento e que o deslocamento máximo do elemento ocorre no ponto de aplicação da força (pequena conicidade).

Neste trabalho, o módulo de elasticidade é calculado pela Equação 2. Para tanto, o valor limite do deslocamento medido abaixo do ponto de aplicação da força é igual a $L/200$, sendo L expresso em cm. Este valor garante o comportamento elástico-linear do material, tratando-se de uma medida para pequenos deslocamentos.

$$E = \frac{3 \cdot \Delta F \cdot L^3}{4 \cdot \pi \cdot \delta \cdot D_{eq}^4} \quad (2)$$

Vale ressaltar que as peças roliças estruturais de madeira respeitam a relação $L/D_{eq} > 21$, evitando-se a influência do cisalhamento no cálculo das deflexões e validando o emprego das Equações 1 e 2.

Para cada uma das 24 peças são realizados dois experimentos, ambos sendo diferentes apenas pela posição do elemento roliço no ensaio de flexão, assim como ilustra a Figura 2. Cabe ressaltar que a metodologia utilizada para a escolha das posições foi baseada na observação de assimetrias na seção transversal.

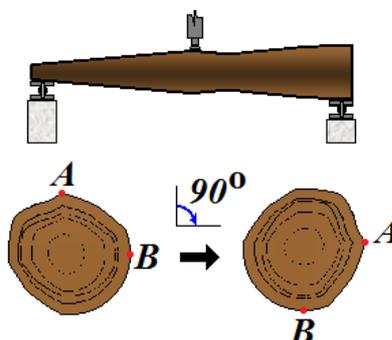


FIGURA 2. Mudança de posição da peça roliça no ensaio de flexão.

Com o objetivo de se acompanharem as diferenças existentes entre os valores dos módulos de elasticidade calculados com e sem a mudança de posição da peça, foi utilizado o teste estatístico da análise do intervalo de confiança da diferença entre duas médias. A verificação da equivalência estatística entre os valores obtidos do módulo de elasticidade longitudinal (E) e do módulo de elasticidade longitudinal segundo o giro (E_{90°) é realizada por intermédio da Equação 3.

$$\bar{x}_m - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{S_m}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x}_m + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{S_m}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Em que:

μ – média populacional das diferenças;

\bar{x}_m – média aritmética amostral das diferenças;

n – tamanho da amostra;

S_m – desvio padrão amostral das diferenças;

α – nível de significância;

$t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$ – valor tabelado pela distribuição “t” de Student com n-1 graus de liberdade e

nível de significância α .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores do E e E_{90° obtidos para as peças estruturais roliças de madeira do gênero *Eucalyptus citriodora* são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Valores de elasticidade obtidos para os elementos roliços.

Peças	E (MPa)	E_{90° (MPa)	Peças	E (MPa)	E_{90° (MPa)
1	20432	19373	13	21928	22886
2	21986	25318	14	19399	20967
3	19799	20989	15	19250	20665
4	20014	23107	16	16822	18321
5	17857	17020	17	16209	17146
6	19453	18934	18	19121	21508

7	18320	16416	19	19344	21262
8	21126	19350	20	15598	15971
9	21207	22158	21	16595	17993
10	16855	20556	22	18896	19090
11	15506	18204	23	16512	20926
12	20227	20722	24	16468	16875

A média e o desvio padrão para os valores de elasticidade (E) das peças sem o giro em torno do eixo são respectivamente iguais a 18705,17 e 1954,24. O valor médio e o desvio padrão dos módulos de elasticidade considerando-se o giro das seções (E_{90}^0) são respectivamente iguais a 19823,21 e 2298,57.

O intervalo de confiança encontrado entre os valores do E e E_{90}^0 é $435,29 \leq \mu \leq 1800,80$. Como o zero não pertence ao intervalo, pode-se afirmar que estes não são estatisticamente equivalentes.

A Figura 3 ilustra a regressão linear obtida entre os valores de elasticidade apresentados na Tabela 1, sendo a reta de ajuste obtida $r(x) = 0,85 \cdot x + 3933,96$, de coeficiente $R^2 = 0,52$.

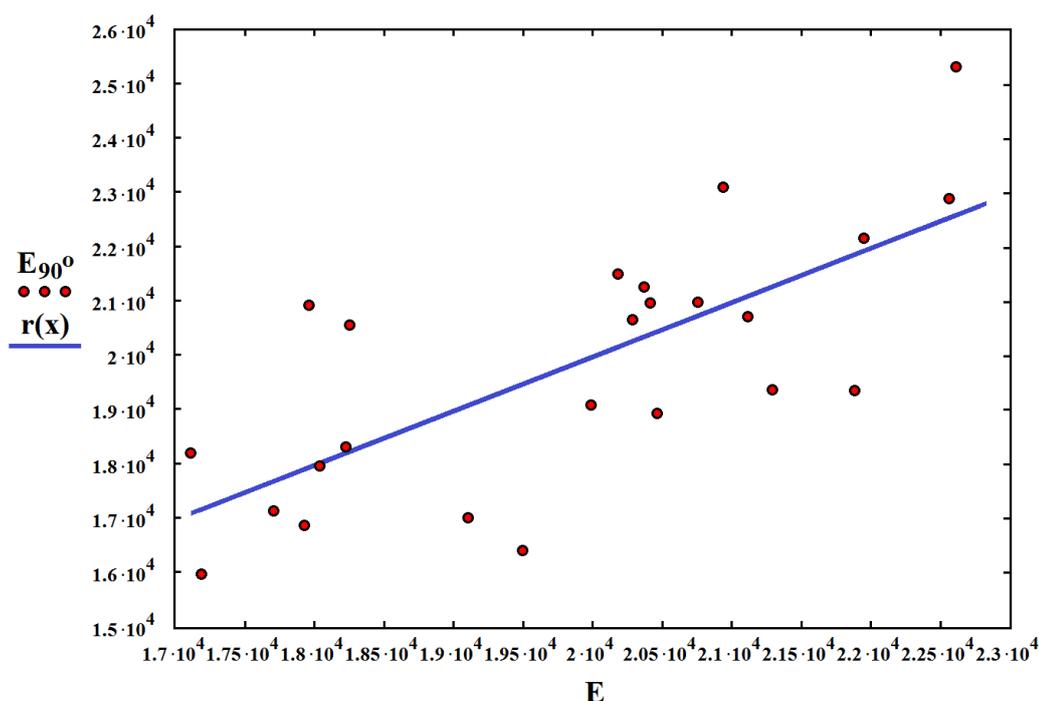


FIGURA 3. Regressão linear.

4. CONCLUSÕES

O modelo de flexão estática a três pontos apresentou ser de fácil empregabilidade, visto a norma NBR 8457:1984 recomendar o esquema estrutural de viga engastada em balanço.

A consideração da relação $L/D_{eq} > 21$ permitiu a obtenção do módulo de elasticidade longitudinal das peças roliças desconsiderando-se os efeitos das forças cisalhantes no cálculo das deflexões (teoria de vigas de Timoshenko).

A restrição de pequenos deslocamentos permitiu o desenvolvimento dos ensaios de flexão de forma não destrutiva, apresentando-se como solução alternativa na determinação do módulo de elasticidade em peças roliças de dimensões estruturais.

Os resultados da análise estatística para as madeiras *Eucalyptus citriodora* revelaram a não equivalência encontrada entre os valores de elasticidade obtidos para os elementos roliços com as respectivas mudanças nas suas posições. Mesmo sendo este um resultado válido apenas para as madeiras aqui avaliadas, ainda com a pequena diferença de 6% obtida entre os valores médios de elasticidade, por questões de segurança e confiabilidade do projeto estrutural sugere-se que o módulo de elasticidade seja obtido mediante os ensaios das peças em duas posições distintas. Pela possibilidade de erros decorrentes da montagem da estrutura, visando maior segurança para a construção, indica-se a escolha do menor entre os valores elasticidade obtidos do ensaio de flexão estática.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6122 – *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, 1996.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6231 – *Postes de madeira – resistência à flexão*. Rio de Janeiro, 1980.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190 – *Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro. 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8456 – *Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição de energia elétrica*. Rio de Janeiro, 1984.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 8457 – *Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição de energia elétrica – dimensões*. Rio de Janeiro. 1984.

Batista, A. M.; Rossi, N.; Mascia, N. T.; Furlani, J. E. *Estudo da flexão estática: relação entre peças de madeira com dimensões estruturais e dimensões reduzidas*. In: 7º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, São Carlos - SP, 2000.

Carreira, M. R.; Dias, A. A. *Avaliação da rigidez à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal*. Cadernos de Engenharia de Estruturas (Online), v. 11, p. 75-79, 2009.

Corsini, T. A.; Fonte, T. F.; Calil Jr, C. *Propriedades mecânicas de peças estruturais versus corpos-de-prova isentos de defeitos*. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 9, Cuiabá – MT, 2004.

Larson, D.; Mirth, R.; Wolfe, R. *Evaluation of small-diameter ponderosa pine logs in bending*. Forest Products Journal, Madison, WI, v.54, p.52-58, dezembro, 2004.

Miná, A. J. S. *Estudo de estacas de madeira para fundações de pontes de madeira*. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), 117 p., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Miná, A. J. S.; Dias, A. A. *Estacas de madeira para fundações de pontes de madeira*. Cadernos de Engenharia de Estruturas (Online), v. 10, p. 129-155, 2008.

Miná, A. J. S.; Dias, A. A.; Calil Jr., C. *Avaliação da rigidez e da resistência de postes de madeira para uso como estacas para fundações*. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 9, Cuiabá – MT, 2004.

Partel, P. M. P. *Sistemas estruturais e construtivos utilizando madeira roliça de reflorestamento*. 1999. 134 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

Pinto Neto, J.; Calil Júnior, C.; Espinoza, M. M. *Propriedades de resistência e rigidez de peças estruturais roliças de pequeno diâmetro*. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 9, Cuiabá – MT, 2004.

Ranta-Maunus, A. *Bending and compression properties of small diameter round timber*. In: World Conference on Timber Engineering, Whistler, Canada, 2000.

Ross, R. J.; Wang, X.; Mattson, J. A.; Erickson, J. R.; Forsman, J. W.; Geske, E. A.; Wehr, M. A. *Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs*. Research Paper. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2001.

Sales, A.; Candian, M.; Salles, V. C. *Nondestructive evaluation of timber: the new Brazilian code for the design of timber structures*. Materials and Structures, v. 43, p. 213-221, 2010.

Sales, A.; Pelizan, T. R.; Oliveira, F. G. R.; Candian, M.; Lucchette, F. F.; Salgon, J. L.; Miller, K. P. *Avaliação de propriedades mecânicas de peças roliças de Eucalipto por meio de ultra-som*. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 9, Cuiabá – MT, 2004.

Wolfe, R.; Moseley, C. *Small-diameter log evaluation for value-added structural applications*. Forest Products Journal. Madison, WI. v.50. p. 48-58. Outubro, 2000.

Zangiácomo, A. L.; Rocco Lahr, F. A. *Avaliação do efeito de cisalhamento na flexão de elementos roliços da espécie Eucalyptus citriodora*. In: XI EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Londrina – PR, 2008.