

AValiação Numérica do Módulo de Elasticidade em Vigas Rolijas de Madeira da Espécie *Pinus elliottii*

NUMERICAL EVALUATION OF THE BENDING MODULUS OF ELASTICITY IN *Pinus elliottii* ROUND TIMBER BEAMS

André Luis Christoforo¹ Tulio Hallak Panzera² Márcio Eduardo Silveira³
Diogo Aparecido Lopes Silva⁴ Roberto Vasconcelos Pinheiro⁵ Francisco Antonio Rocco Lahr⁶

RESUMO

Este trabalho objetivou apresentar uma metodologia numérica de cálculo, fundamentada no Método dos Elementos Finitos e no Método dos Mínimos Quadrados, para obtenção do módulo de elasticidade longitudinal em vigas roliças de madeira de dimensões estruturais, considerando a influência das irregularidades na geometria das peças por aproximações lineares ao longo dos elementos finitos. Além do modelo numérico desenvolvido (1D), foram utilizados em conjunto outros dois, um analítico (simplificado 1D), que considera um único valor de diâmetro (geometria cilíndrica), medido no ponto médio da peça, e outro numérico (3D), que também permite delinear, de forma mais precisa, a geometria dos elementos estruturais roliços, possibilitando verificar as diferenças entre ambos. Para tanto, as vigas foram ensaiadas segundo o modelo de flexão estática a três pontos, sendo testadas 24 peças roliças de madeira da espécie *Pinus elliottii*, com comprimento médio de 630 cm, diâmetro médio das peças de 21 cm, madeira verde (saturada), conicidade média de 6% e fator de forma médio da seção de 0,82. Os resultados do intervalo de confiança entre os módulos de elasticidade do modelo numérico 1D (E_o) e analítico (E_{dq}) revelaram a equivalência estatísticas entre as metodologias, justificadas pela pequena conicidade das peças avaliadas, podendo ser diferentes para outras conicidades. O emprego dos módulos de elasticidade obtidos do modelo numérico 1D nas simulações dos elementos roliços em três dimensões conduziram a valores de deslocamentos equivalentes aos obtidos nas experimentações, comprovando a eficiência do modelo numérico 1D, mostrando ser este último mais interessante por exigir menor esforço computacional.

Palavras-chave: madeira roliça; método dos elementos finitos; método dos mínimos quadrados.

ABSTRACT

This research aimed to present a numerical methodology of calculation, based on the Finite Element Method and the Least Squares Method, to determine the longitudinal modulus of elasticity in structural round timber beams, considering the irregularities in the geometry of the elements by linear approximation along the

1 Engenheiro Civil, Dr., Professor da Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luís, km 235 - SP310, CEP 13565-905, São Carlos (SP), Brasil. alchristoforo@yahoo.com.br

2 Engenheiro Mecânico, Dr., Professor da Universidade Federal de São João Del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro, CEP 36307-352, São João del-Rei (MG), Brasil. tuliopanzera@ufsj.edu.br

3 Engenheiro Mecânico, Dr., Professor da Universidade Federal de São João Del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro, CEP 36307-352, São João del-Rei (MG), Brasil. mesilveira@ufsj.edu.br

4 Engenheiro Industrial Madeireiro, MSc., Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Pq. Arnold Schmidt, CEP 13566-590, São Carlos (SP), Brasil. diogo.apls@gmail.com

5 Engenheiro Civil, Dr., Professor da Universidade do Estado de Mato Grosso, Av. dos Ingás, 3001, Jd. Imperial, CEP 78555-000, Sinop (MT), Brasil. rpinheiro@unemat-net.br

6 Engenheiro Civil, Dr., Professor da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Pq. Arnold Schmidt, CEP 13566-590, São Carlos (SP), Brasil. frocco@sc.usp.br

finite elements. In addition with the numerical model (1D), together, two others were used, one analytical (1D simplified), which considers a single value of diameter (cylindrical geometry), measured at the midpoint of the elements, and another numerical model (3D), allows more accurately to delineate the geometry of the element, enabling check the difference between them. Therefore, the beams were evaluated according to the static three-point bending test, being tested twenty four elements of *Pinus elliottii* wood species, with average length of 630 cm, breast height diameter around 21 cm, green wood (saturated), tape average of 6% and mean of factor form section of 0,82. The results of the confidence interval between the modulus of elasticity of the 1D numerical model (E_o) and analytical (E_{deq}) showed statistical equivalence between the methodologies, justified by the small taper of the elements, may be different for others tapers. The use of the longitudinal modulus of elasticity obtained from the numerical 1D model in the 3D simulations of the round timber beams lead to displacement values equivalent to those obtained in the tests, proving the efficiency of 1D numerical model, requiring less computational work.

Keywords: round wood; finite element method; least square method.

INTRODUÇÃO

Em função da versatilidade e disponibilidade, há séculos, a madeira vem sendo utilizada como material estrutural. 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 um baixo custo de produção. Uma alternativa a este problema consiste na utilização desse material em sua forma roliça original, decorrente do crescimento natural da árvore (PARTEL, 1999).

Pesquisas com intuito de ampliar o leque de conhecimentos técnicos e científicos relacionados à madeira roliça vêm sendo desenvolvidas por cientistas em diversas regiões do mundo. Cerda e Wolfe (2003) avaliaram a resistência à flexão em 45 vigas de madeira roliça da espécie *Pinus radiata* com comprimento médio de 12 metros e isentas de nós (menores que 25 mm). As amostras foram submetidas a testes de flexão estática seguindo os padrões da norma ASTM D 1036 (1998). Observou-se que os resultados obtidos se assemelharam aos de outras espécies de *Pinus*, concluindo que a espécie em estudo se qualifica para ser incluída no grupo ASNI 05.1 de especificação padrão para vigas de madeira.

Larson et al. (2004) avaliaram as propriedades de resistência e rigidez em peças de madeira roliça da espécie *Pinus ponderosa* a partir do ensaio de flexão estática padronizado pela norma ASTM D 198 (1997). Dentre os resultados obtidos, os autores discutem que a resistência à flexão das

vigas roliças apresentou reduções sucessivas com o aumento dos diâmetros das peças.

Green et al. (2004) avaliaram resistência e rigidez em peças de madeira roliça das espécies *Abies lasiocarpa* e *Pinus contorta*, com comprimento médio de 4,9 m e diâmetro de aproximadamente 23 cm. As toras foram submetidas aos testes de flexão e compressão paralela seguindo as premissas do documento normativo ASTM D 198 (2003). Os módulos de elasticidade foram também obtidos pelos métodos de vibração transversal e tensão de onda, sendo obtidas boas correlações entre os módulos de ruptura com os de elasticidade.

Miná et al. (2004) avaliaram propriedades de resistência e rigidez de postes de madeira roliça com o auxílio do ensaio de flexão estática a três pontos e de ultrassom. Para caracterização das amostras foram utilizados um total de 50 postes de madeira da espécie *Corymbia Citriodora*, sendo 15 postes com 7,5 m de comprimento e diâmetro médio de 210 mm, e 35 postes com 9m de comprimento e diâmetro médio de 135 mm. Depois de ensaiadas pelo método de ultrassom, as peças foram testadas mecanicamente. Através dos ensaios foram determinados os módulos de elasticidade estático e dinâmico. Observaram-se, após análises dos resultados, boas correlações entre as propriedades mecânicas calculadas pelos métodos de ultrassom e flexão estática, o que permite concluir que o método de ultrassom pode ser aplicado em postes de madeira com o objetivo da determinação da sua rigidez.

Green et al. (2006) avaliaram propriedades de resistência e rigidez em madeiras roliças. Para tanto, foram selecionadas 110 árvores, sendo 42 da espécie Alpine fir (*Abies lasiocarpa*), 40 de Lodgepole pine (*Pinus contorta*), 23 de Engelmann

spruce (*Picea engelmannii*), 2 de Western white pine (*Pinus monticola*) e 1 de Grand fir (*Abies grandis*). As árvores foram processadas originando amostras com diâmetro de 2,28 cm e comprimento variando de 4,3 a 4,9 m. As amostras foram submetidas aos testes de vibração transversal, flexão estática a três pontos (ASTM D 198, 1997) e compressão paralela, obtendo assim os módulos de elasticidade dinâmico e estático. Os módulos de elasticidade dinâmicos apresentaram ser próximos dos estáticos pelas boas correlações encontradas.

Fernández-Golfín et al. (2007) realizaram classificação mecânica em madeiras roliças da espécie *Pinus nigra*. Para tanto, foram utilizadas 445 peças de madeira roliça com diâmetros de 8,0; 10,0; 12,0 e 14,0 cm e comprimentos de 2; 2,5 e 3 m. As peças foram submetidas a ensaios mecânicos até o ponto de falha, como preconiza a norma europeia EN 14251 (2004), obtendo assim os valores da resistência à flexão e do módulo de elasticidade.

Green et al. (2008) avaliaram as propriedades mecânicas de resistência e rigidez na flexão e compressão paralela em peças de madeira roliça segundo abordagens de cálculo estática e dinâmica, utilizando 160 árvores da espécie *Pseudotsuga menziesii* e 218 da espécie *Pinus ponderosa*. As dimensões (aproximadas) das vigas testadas foram de 4 m de comprimento e diâmetro variando entre 10,0 a 20,0 cm. Da abordagem estática, os módulos de elasticidade e de ruptura foram obtidos seguindo os padrões de cálculo norma ASTM D 198 (2003), sendo os módulos de elasticidade dinâmicos calculado pelo método de vibração transversal. Após análise dos dados, foram observadas boas correlações entre os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos e boas relações entre as resistências mecânicas.

Zangiácomo e Lahr (2008) estudaram a relação entre o comprimento (L) e diâmetro (d_{eq}) em vigas roliças de madeira para o qual o efeito das forças cisalhantes se torna desprezível no cálculo dos deslocamentos, chegando às relações L/d_{eq} de 12 e 15 para as madeiras *Pinus elliottii* e *Pinus caribaea*, respectivamente.

Morgado et al. (2009) avaliaram propriedades mecânicas de peças de madeira roliça da espécie *Pinus pinaster*, sendo utilizadas 500 peças de dimensões estruturais. Uma nova seleção foi realizada baseada no diâmetro das peças, no diâmetro do nó, na largura dos anéis de crescimento e nos sinais de degradação biológica, restando apenas 200 peças com diâmetros variando de 7,0 a 9,0 cm.

Os módulos de elasticidade e resistência à flexão foram obtidos por intermédio da norma europeia BS EN408 (2003), adaptada para seções roliças. Os resultados encontrados entre as propriedades investigadas apresentaram boas correlações entre ambas.

Vestøl e Høibø (2010) avaliaram a densidade, resistência à flexão e módulo de elasticidade de peças de madeira roliça da espécie *Pinus sylvestris*. Foram utilizadas 533 amostras com diâmetros variando de 7,5 a 25,0 cm e comprimento de 2,10 a 6,10 m. A resistência à flexão e o módulo de elasticidade foram obtidos de acordo com a norma EN 14251 (2004). Os autores concluem, além de outras, que as madeiras roliças podem apresentar valores de resistência à flexão e módulos de elasticidade consideravelmente diferentes dependendo da região de extração das árvores.

Christoforo et al. (2011) avaliaram a influência da posição de peças roliças estruturais de madeira da espécie *Eucalyptus grandis* no cálculo do módulo de elasticidade à flexão, sendo utilizadas 24 peças com 7,50 m de comprimento e diâmetro médio a altura do peito de 30,0 cm. Os módulos de elasticidade foram obtidos de acordo com a norma ABNT NBR 7190 (1997) (Projeto de Estruturas de Madeira), adaptada para peças de dimensões estruturais e para ensaios não destrutivos. O momento de inércia utilizado no cálculo do módulo de elasticidade das peças foi o equivalente, obtido no ponto médio da peça. A mudança de posição das peças no ensaio de flexão conduziu a valores de rigidez distintos, concluindo ser importante que o ensaio de flexão seja realizado considerando pelo menos duas posições distintas da peça (giros em torno do seu eixo).

Em linhas gerais, as pesquisas envolvendo o emprego de ensaios mecânicos para a obtenção de propriedades de resistência e rigidez em peças roliças de madeira fazem uso de documentos normativos (ANSI O5.1 (2002); ASTM D198 (1997); ASTM D1036 (1998); DIN EN 14251 (2004); AS 2209 (1994); ABNT NBR 6231 (1980); ABNT NBR 8456 (1984); ABNT NBR 8457 (1984); ABNT NBR 6122 (1996)), que consideram a geometria da peça como sendo perfeitamente tronco-cônica, conduzindo a equações simplificadas para o cálculo do módulo de elasticidade à flexão.

Este trabalho objetiva apresentar uma metodologia numérica de cálculo, fundamentada no Método dos Elementos Finitos (numérico 1D) e no Método dos Mínimos Quadrados, para a

obtenção do módulo de elasticidade à flexão em peças roliças estruturais de madeira considerando as irregularidades existentes na forma (geometria). Para tanto, emprega-se o ensaio de flexão estática a três pontos, sendo utilizado em conjunto ao modelo numérico 1D, um modelo simplificado (analítico - 1D), que considera geometria da seção circular constante para a peça, e um outro numérico (3D), possibilitando os modelos numéricos aproximação da geometria da peça tronco-cônica por partes, permitindo avaliar a precisão da aproximação contida no modelo analítico simplificado.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a determinação do módulo de elasticidade na flexão foram utilizadas 24 peças roliças estruturais de madeira da espécie *Pinus elliottii*, com densidade aparente média de 0,57 g/cm³, comprimento médio de 6,30 m, diâmetro médio de 21 cm, madeira verde (saturada), conicidade média de 6% e fator de forma médio da seção de 0,82, sendo os ensaios realizados nas dependências do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

As peças roliças atenderam à relação $L/d_{eq} > 15$, sendo L o comprimento e d_{eq} o diâmetro equivalente (ZANGIÁCOMO; LAHR, 2008) medido no ponto de médio, assumindo-se que as seções 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).

O módulo de elasticidade neste trabalho é avaliado segundo dois modelos matemáticos de cálculo distintos, ambos fazendo-se o uso do esquema estrutural de flexão estática a três pontos.

Para o primeiro caso (Figura 1), o módulo de elasticidade é calculado com o auxílio da Equação 1.

$$E = \frac{4 \cdot F \cdot L^3}{3 \cdot \pi \cdot \delta \cdot d_{eq}^4}$$

(1)

Em que: E é o módulo de elasticidade à flexão (MPa), F é a força aplicada e δ é o deslocamento linear medido abaixo do ponto de aplicação da força.

O segundo caso, como forma alternativa

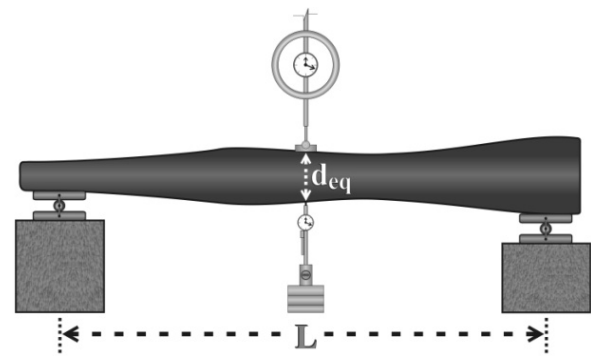


FIGURA 1: Ensaio de flexão estática a três pontos e localização do diâmetro equivalente (deq). Em que: F= força aplicada; L= comprimento.

FIGURE 1: Three-point static bending test with the equivalent diameter. Where: F = applied load; L= length.

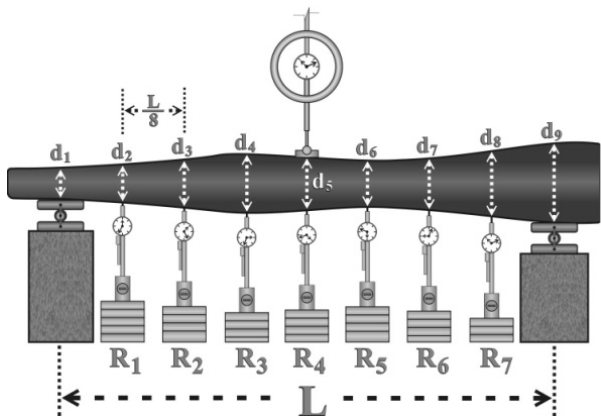


FIGURA 2: Ensaio alternativo para a determinação do módulo de elasticidade efetivo. Em que: L= comprimento; d = diâmetro; R = relógio comparador.

FIGURE 2: Alternative test to determine the effective modulus of elasticity. Where: L = length; d = diameter; R = dial gauge.

de cálculo, propõe-se que o valor do módulo de elasticidade efetivo (E_o) seja calculado de acordo com o esquema estrutural de ensaio ilustrado pela Figura 2.

Na determinação do módulo de elasticidade efetivo (numérico 1D), para cada ensaio estrutural realizado foram locados sete relógios comparadores ao longo das peças, distantes $L/8$ uns dos outros,

e também, foram medidos nove valores de circunferência ao longo do seu comprimento para a determinação dos seus respectivos diâmetros (d_i).

As leituras dos deslocamentos nos relógios 1, 2, 3, 5, 6 e 7 (Figura 2) foram realizadas quando o deslocamento no meio do vão é da ordem de $L/200$, sendo L expresso em centímetros. Este valor garante o comportamento elástico-linear do material e linearidade geometria para a peça, tratando-se de uma medida de pequenos deslocamentos (ABNT NBR 7190, 1997). A imposição desta relação permite que os ensaios de flexão sejam executados de forma não destrutiva (CHRISTOFORO et al., 2011).

Para o cálculo do módulo de elasticidade efetivo (E_o), foi desenvolvido um programa computacional “módulo de elasticidade efetivo” (Eotm) nos fundamentos do Método dos Elementos Finitos (MEF), segundo o emprego do modelo cinemático de deformação de vigas de Bernoulli no Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV), desconsiderando-se nesses cálculos, as forças por unidade de volume.

O elemento finito de barra possui dois graus de liberdade por nó, sendo duas translações e duas rotações, formulado com o uso de uma função polinomial interpolativa do terceiro grau.

A geometria aproximada para a peça é considerada linear por partes. Para cada duas circunferências sucessivas (Figura 2) utiliza-se um elemento finito de variação tronco-cônica, sendo o momento de inércia da seção definido pela Equação 2.

$$I(x) = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{r_f - r_i}{h_e} \cdot x + r_i \right)^4 \quad (2)$$

Em que: $I(x)$ = é o momento de inércia, r_i e r_f = raios calculados a partir das medidas de duas circunferências sucessivas; h_e = comprimento do elemento finito; x = número real compreendido no intervalo $[0, h_e]$.

Os valores dos deslocamentos experimentais, assim como os valores dos diâmetros medidos ao longo do elemento foram fornecidos ao programa Eotm, com o objetivo de se calcular o valor efetivo do módulo de elasticidade da peça.

O programa Eotm, tendo por base os fundamentos do MEF, determina um vetor de deslocamentos (numérico), contabilizando a influência das irregularidades existentes na geometria da peça, tendo como variável dependente

o módulo de elasticidade do elemento estrutural.

Com posse do vetor de deslocamentos determinados pelo programa ($U^{(n)}$) e do vetor de deslocamentos experimentais ($U^{(e)}$), uma função ($f(E)$) é construída, fundamentada no Método dos Mínimos Quadrados (Equação 3), cujo objetivo consiste em determinar o valor do módulo de elasticidade para que o resíduo gerado por ambas as soluções, numérica e experimental, seja mínimo, obtido pelo Método de Newton-Raphson.

$$f(E) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(U_i^{(e)} - U_i^{(n)} \right)^2 \quad (3)$$

De forma alternativa, depois de calculado o módulo de elasticidade efetivo (numérico 1D), estes valores, juntamente, com os referentes à geometria, condições de contorno, força e vinculações foram utilizados para a simulação numérica das peças com elementos finitos tridimensionais (numérico 3D), objetivando-se reproduzir os deslocamentos obtidos da experimentação, de maneira a se checar as possíveis diferenças. As simulações foram realizadas com o uso do *software* ANSYS14.0 - Workbench, com o uso do elemento finitos MESH200. Cabe ressaltar que as peças de madeira roliça quando não serradas (íntegras), como é o caso das madeiras aqui avaliadas, podem ser tratadas como material isotrópico (CHRISTOFORO et al., 2011). Pela falta de informações sobre a anisotropia da madeira no documento normativo ABNT NBR 7190 (1997) optou-se por considerar nulo o coeficiente de Poisson.

Com o objetivo de se verificar as diferenças existentes entre os valores dos módulos de elasticidade calculados considerando o modelo simplificado (E_{deq}) e a metodologia alternativa de cálculo proposta (E_o) foi utilizado o intervalo de confiança da diferença entre duas médias, expresso pela Equação 4.

$$\bar{x}_m - t_{\alpha/2, n-1} \cdot S_m / \sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{x}_m + t_{\alpha/2, n-1} \cdot S_m / \sqrt{n} \quad (4)$$

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 e $t_{\alpha/2, n-1}$ = valor tabelado da distribuição t de Student com $n-1$ graus de liberdade e nível de significância α .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos módulos de elasticidade E_{deq} e E_o obtidos para as peças roliças estruturais de madeira de *Pinus elliottii* são apresentados na Tabela 1, sendo DP o desvio padrão e CV o coeficiente de variação.

A Figura 3 apresenta os resultados do teste de normalidade de Anderson-Darling para módulos de elasticidade da Tabela 1.

O intervalo de confiança encontrado entre os valores do E_{deq} e E_o é $-1246 \leq \mu \leq 1205$ e, como o zero pertence ao subconjunto, constata-se que estes são estatisticamente equivalentes.

A regressão linear entre os valores do E_{deq} e E_o é ilustrada pela Figura 4.

Para as simulações com elementos finitos tridimensionais, *a priori*, foi avaliada a influência da malha no cálculo dos deslocamentos. Para tanto, utilizaram-se os dados de ensaio da peça 1 (Tabela 1), sendo: $E_o = 9111$ MPa, $F = 5$ kN, $L = 5700$ mm e diâmetros (d_i): 206 mm (base); 217 mm; 206 mm; 198 mm; 194 mm; 191 mm; 178 mm; 185 mm; 181 mm (topo). Os elementos finitos foram definidos com tamanhos de arestas de 10 mm e 20 mm, sendo as malhas geradas apresentadas nas Figuras 5a e 5b, respectivamente.

As Figuras 6a e 6b ilustram os deslocamentos da peça estrutural em função das malhas utilizadas com arestas de 10 mm e 20 mm, respectivamente.

As simulações da peça estrutural com elementos finitos com aresta de 10 mm conduziu a uma malha com cerca de 399.116 elementos, sendo 60.920 o número de elementos com aresta de 2 mm. A diferença percentual relativa entre os deslocamentos no ponto médio para ambas as malhas foi de 0,22%. Por este motivo, todas as simulações foram realizadas com o elemento finito de 20 mm de aresta.

O deslocamento experimental medido no ponto de aplicação da força (ponto médio) da peça 1 foi de 28,50 mm, enquanto que o numérico no mesmo ponto foi de 30,36 mm, conferindo um erro percentual relativo de 6,53% entre ambos. Em todas as peças, quando comparados os deslocamentos nos relógios com os respectivos deslocamentos do modelo numérico tridimensional, as maiores diferenças percentuais ocorreram sempre no ponto médio. Este erro nas 24 peças simuladas variou de 4,36% a 7,49%. Os resultados dos intervalos de confiança entre os deslocamentos do modelo numérico e os respectivos do experimental por peça comprovaram a equivalência estatística em todos os casos.

TABELA 1: Valores dos módulos de elasticidade obtidos para as madeiras roliças.

TABLE 1: Values of the modulus of elasticity for the round timber beams.

Peça	E_{deq} (MPa)	E_o (MPa)	Peça	E_{deq} (Mpa)	E_o (MPa)
1	9111	9428	13	11631	12382
2	9793	10473	14	5361	5867
3	6837	6491	15	11088	10861
4	8484	8313	16	14655	13823
5	6645	6452	17	8910	8436
6	8010	8469	18	10489	10814
7	6639	6274	19	12342	11752
8	9453	9680	20	9699	10491
9	6804	6527	21	10426	9807
10	10893	11091	22	9595	10121
11	7968	7452	23	10233	10639
12	8254	8723	24	10904	10349
Média				9342	9363
DP				2116	2099
CV(%)				23	22

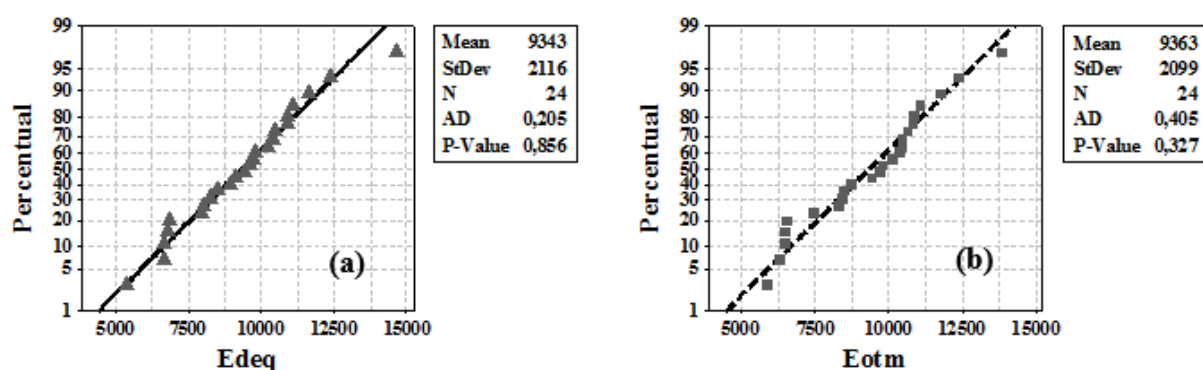
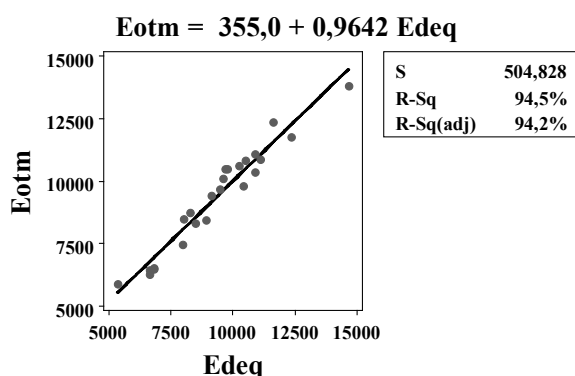


FIGURA 3: Testes de normalidade.

FIGURE 3: Normality tests.

FIGURA 4: Regressão linear entre E_{deq} e E_{otm} .FIGURE 4: Linear Regression between E_{deq} and E_{otm} .

CONCLUSÕES

O intervalo de confiança entre os módulos de elasticidade longitudinais obtidos da abordagem numérica (1D) aqui proposta, que leva em consideração as irregularidades da geometria, com a analítica (simplificada 1D), comprovou a equivalência estatística entre ambos, revelando a boa aproximação do modelo simplificado, metodologia de cálculo presente nos documentos normativos nacionais e internacionais, justificado essencialmente pela pequena conicidade média encontrada nos elementos roliços da espécie *Pinus elliottii* aqui testados, podendo os resultados serem diferentes para madeiras com conicidades diferentes, justificando-se desta forma o emprego da metodologia proposta.

O uso dos módulos de elasticidade da abordagem numérica de cálculo (E_o) nas simulações dos elementos roliços em três dimensões,

realizadas com o auxílio do *software* comercial ANSYS14.0, possibilitou verificar a proximidade dos deslocamentos numéricos com os obtidos das experimentações, sendo comprovada a equivalência estatística peça por peça com o uso do intervalo de confiança. Em função da pequena conicidade das peças, o que acarretou na equivalência entre os módulos de elasticidade, neste caso, as peças poderiam ser simuladas em três dimensões com o uso do E_{deq} , conduzindo a resultados equivalentes aos obtidos com o uso do E_o , entretanto, para outras conicidades, os resultados podem ser diferentes. Em linhas gerais, os resultados da simulação em três dimensões para os deslocamentos confirma, assim como esperado por teoria, na sua equivalência com o modelo numérico 1D, mostrando ser este último mais interessante por exigir menor esforço computacional.

O emprego conjunto de ambas as formas de cálculo aqui apresentadas (simplificada 1D e numérica 1D) se mostra como uma metodologia alternativa de classificação para o elemento roliço. Caso os resultados do módulo de elasticidade longitudinal para ambas as metodologias de cálculo sejam estatisticamente equivalentes, isto implica que a peça apresenta pequena conicidade e geometria regular, caso contrário, a conicidade e as irregularidades na forma devem ser levadas em consideração, e o valor do módulo de elasticidade da peça deve ser o obtido com o emprego da estratégia numérica de cálculo.

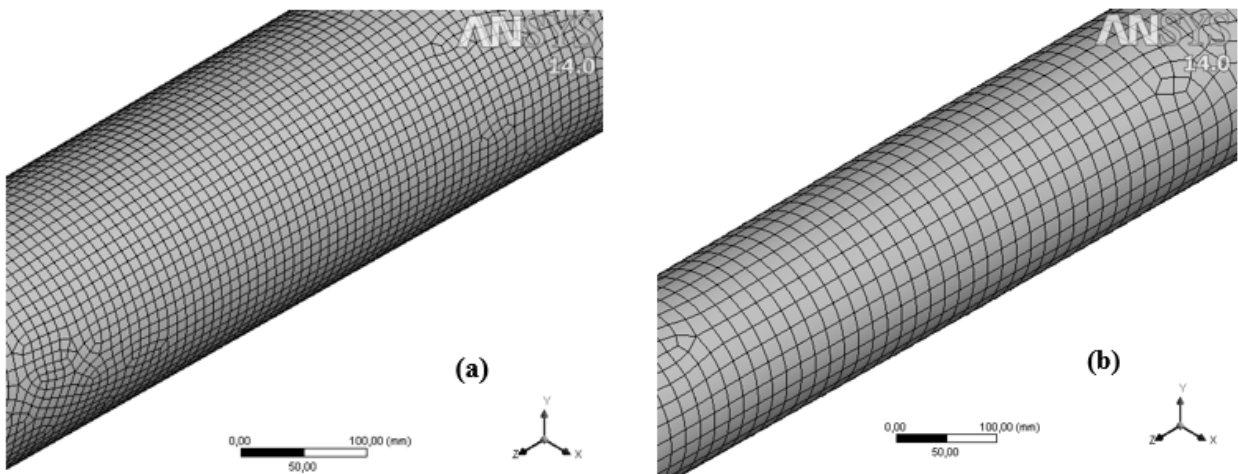


FIGURA 5: Discretização da peça em função das malhas de elementos finitos.
FIGURE 5: Description of the structural round timber element.

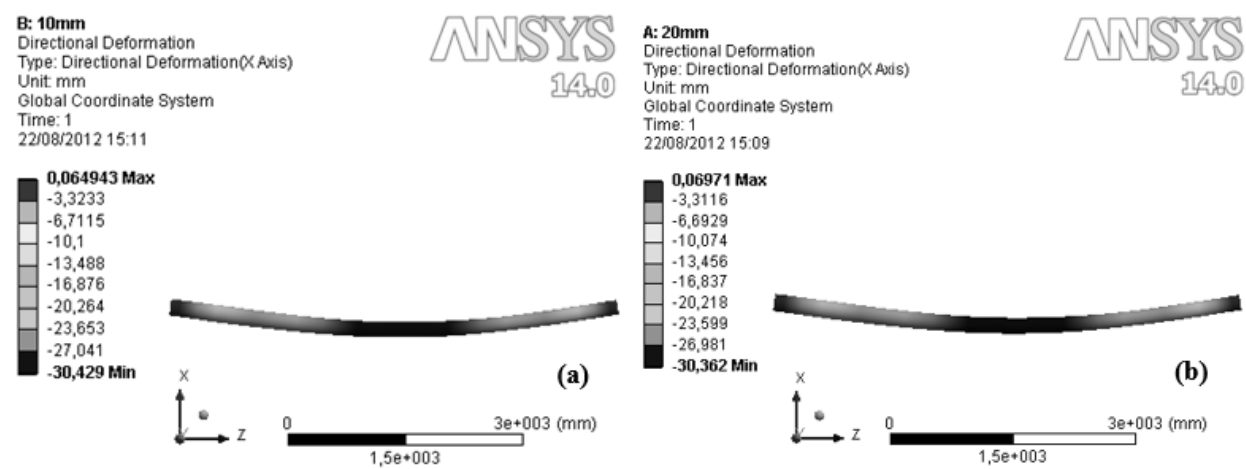


FIGURA 6: Deslocamentos em função das malhas.
FIGURE 6: Displacements depending on the mesh.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI O5.1**: American national standard for wood poles. Washington, DC, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 198-02**: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural, West Conshohocken, PA, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1036**: Standard test methods of static tests of wood poles. Philadelphia, PA, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198**: Static tests of timbers in structural sizes. Philadelphia, PA, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ABNT NBR 6231**: Postes de madeira – resistência à flexão. Rio de Janeiro, 1980.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ABNT NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ABNT NBR 8456**: Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ABNT NBR 8457**: Postes de eucalipto preservado para redes de distribuição de energia elétrica – dimensões. Rio de Janeiro. 1984.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 2209**: Timber-

- poles for over heads lines. Australia, 1994.
- BRITISH STANDARD. **BS EN 408**. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties, 2003.
- CERDA, G.; WOLFE, R. W. Bending strength of Chilean radiata pine poles. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 53, n. 4, p. 61-65, 2003.
- CHRISTOFORO, A. L. et al. The position effect of structural *Eucalyptus* round timber on the flexural modulus of elasticity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Campina Grande, v. 31, p. 1219-1225, 2011.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **DIN EN 14251**. Structural round timbers – test methods. Bruxelas, Bélgica, 2004.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J. I. et al. Mechanical characterization of visually classified, small-diameter laricio pine round timber. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 5, n. 3, p. 304-311, 2007.
- GREEN, D. W. et al. Grading and properties of small-diameter Douglas-fir and ponderosa pine tapered logs. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 58, n. 11, p. 33-41, 2008.
- GREEN, D. W. et al. Improved grading system for structural logs for log homes. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 54, n. 9, p. 52-62, 2004.
- GREEN, D. W. et al. Mechanical Grading of Round Timber Beams. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 18, n. 1, p. 1-10, 2006.
- LARSON, D.; MIRTH, R.; WOLFE, R. Evaluation of small-diameter ponderosa pine logs in bending. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 54, n. 12, p. 52-58, 2004.
- MINÁ, A. J. S. et al. Avaliação não destrutiva de postes de madeira por meio de ultrassom. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 65, p. 188-196, 2004.
- MORGADO, T. F. M. et al. Bending and compression strength of Portuguese Maritime pine small-diameter poles. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 59, n. 4, p. 23-28, 2009.
- 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.
- VESTØL, G. I.; HØIBØ, O. Bending strength and modulus of elasticity of *Pinus sylvestris* round timber from southern Norway. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Londres, v. 25, p. 185-195, 2010.
- ZANGIÁCOMO, A. L.; LAHR, F. A. R. Avaliação do efeito do cisalhamento na flexão de elementos roliços da espécie *Corymbia Citriodora*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina, PR. **Anais...** Londrina, 2008.