

Avaliação do módulo de elasticidade de peças
estruturais roliças e de corpos-de-prova de *Pinus elliottii*MOE evaluation for round timber and
small wood specimens of *Pinus elliottii*André Luiz Zangiacomo¹, André Luis Christoforo² e Francisco Antonio Rocco Lahr³**Resumo**

O documento normativo NBR 7190:1997 – Projeto de estruturas de madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em vigor, especifica que os cálculos estruturais podem ser realizados a partir de dados obtidos em ensaios de corpos-de-prova de pequenas dimensões, isentos de defeitos (como presença de nós) que podem ocorrer em peças de tamanhos estruturais e influenciar nos seus desempenhos. Assim, este trabalho avalia os valores de módulo de elasticidade obtidos a partir de ensaios de compressão paralela às fibras e de flexão estática, realizados em corpos-de-prova isentos de defeitos e em peças estruturais roliças da espécie *Pinus elliottii*. Foram ensaiados quarenta e oito exemplares (vinte e quatro de pequenas dimensões e vinte e quatro de dimensões estruturais) para cada teste, totalizando noventa e seis ensaios. As análises estatísticas indicam que há diferença significativa entre os valores médios obtidos para os corpos-de-prova (7.724MPa) e para as peças estruturais (9.594 MPa) nos ensaios de flexão estática, e o mesmo ocorre para os testes de compressão paralela às fibras, com 11.596 MPa obtidos para os corpos-de-prova, contra 8.077 MPa para as peças estruturais. Para o caso da compressão paralela às fibras os resultados dos ensaios em corpos de prova, adotados como referência pela norma NBR 7190 para o cálculo estrutural, foram inferiores aos obtidos em peças de maior dimensão, indicando que seu uso pode conduzir a dimensionamento estrutural inseguro, uma vez que as peças estruturais apresentaram comportamento inferior ao das pequenas dimensões.

Palavras-chave: módulo de elasticidade, peças roliças, estruturas, madeira.

Abstract

Brazilian code NBR 7190:1997 – Design of timber structures, ABNT, specifies that structural design can be done using data obtained from small wood specimens. However, natural characteristics present in structural timber, as knots, may affect mechanical properties. The aim of this study is to evaluate modulus of elasticity obtained in compression parallel to grain and static bending tests, carried out for small wood specimens and structural round timber of *Pinus elliottii*. Twenty four small wood specimens and twenty four structural round timber pieces were submitted to compression parallel to grain, and twenty four small wood specimens and twenty four structural round timber pieces were submitted to static bending. ANOVA analysis indicates that there is statistical difference for MOE in static bending: 7.724 MPa (average) was obtained for small wood specimens versus 9.594 MPa for structural pieces. There is also a difference in compression parallel to grain tests: 11.596 MPa (average) was obtained for small wood specimens versus 8.077 MPa for structural round timber. As conclusion, the use of data obtained in compression parallel to grain (the standard test reference in NBR7190:1997 for structural design) in small wood specimens may lead to an unsafe structural timber design, due to low values obtained in structural round timber compared to small wood specimen values.

Keywords: MOE, round timber, structures, wood.

¹Engenheiro civil, Doutor em Engenharia de Estruturas – Professor Adjunto. UFPA - Universidade Federal de Lavras – Departamento de Engenharia, Campus Universitário – Caixa Postal 3037 – Lavras, MG – 37200 000 – E-mail: andrezangiacomo@deg.ufpa.br

²Engenheiro civil, Doutor em Engenharia de Estruturas – Professor Adjunto. UFSJ - Universidade Federal de São João del-Rei – Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Santo Antônio – Praça Frei Orlando, 170 – Centro – São João del-Rei, MG – 36307 352 – E-mail: alchristoforo@ufsj.edu.br

³Engenheiro civil, Doutor em Engenharia de Estruturas – Professor Titular. USP - Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Avenida Trabalhador São-carlense, 400 – São Carlos, SP – 13566 590 – E-mail: frocco@sp.usr.br

INTRODUÇÃO

Para o correto emprego da madeira como material estrutural, com vistas à segurança, à funcionalidade, à durabilidade e à economia, é necessário o conhecimento das suas propriedades físicas e mecânicas, as quais são determinadas por meio de ensaios padronizados.

O módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica da madeira que pode ser correlacionada a outras propriedades mecânicas, como a resistência à compressão paralela às fibras (HOYLE *apud* GREEN; KRETSCHMANN, 1991). A norma brasileira NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1997), classifica as madeiras em classes de resistência tendo como referência o ensaio de compressão paralela às fibras. As correlações possíveis entre o módulo de elasticidade e outras propriedades mecânicas corroboram para que as madeiras sejam classificadas, para fins estruturais, a partir da determinação de seus valores de módulo de elasticidade.

Alguns países da Europa e da América do Norte realizam classificações mecânicas de madeiras a partir de valores dos módulos de elasticidade obtidos em ensaios de flexão de peças estruturais. Além disso, esses países, dentre os quais os Estados Unidos da América, apresentam documentos normativos que estabelecem ensaios mecânicos tanto em peças de pequenas dimensões, isentas de defeitos, como em peças estruturais que apresentam imperfeições naturais, permitindo a verificação dos valores obtidos e a determinação de coeficientes que correlacionam os resultados.

A publicação Wood Handbook - Wood as an Engineering Material (USDA, 2010) cita os códigos normativos da American Society for Testing and Materials: ASTM D245 (ASTM, 2011), ASTM D1990 (ASTM, 2007) e ASTM D2899 (ASTM, 2012), como documentos que apresentam equações para que as propriedades mecânicas das peças estruturais possam ser estimadas a partir dos valores obtidos em ensaios de corpos-de-prova isentos de defeitos.

A obtenção do módulo de elasticidade da madeira é feita, no Brasil, a partir de ensaios padronizados pelo documento normativo NBR7190:1997 - Projeto de Estruturas de Madeira, realizados em corpos-de-prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos (ABNT, 1997). Por recomendação normativa, as peças de pequenas dimensões são confeccionadas

excluindo-se as imperfeições naturalmente presentes nas árvores, como nós de crescimento de galhos e desvios de fibras. Tal procedimento pode influenciar os resultados obtidos nos ensaios, uma vez que os chamados "defeitos" são descartados nesses pequenos exemplares. Nesse sentido, Madsen *apud* Corsini *et al.* (2004), afirma que "a peça estrutural é tão diferente dos corpos-de-prova isentos de defeitos como o concreto é diferente do cimento".

Em seu trabalho, Markwardt (1931) apresenta os resultados de ensaios mecânicos de compressão paralela às fibras e de flexão estática realizados para algumas espécies de madeira do Alasca, dentre outras. Os ensaios foram conduzidos em corpos-de-prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, em peças estruturais serradas e em peças estruturais roliças, e uma das conclusões do autor é que os defeitos presentes nas peças estruturais influenciam na resistência da madeira à flexão, minorando-a.

Kretschmann e Hernandez (2006) mencionam que, a partir da década de sessenta, novas pesquisas forneceram dados de ensaios realizados em peças estruturais, provocando revisão da classificação das madeiras nos Estados Unidos. Fonselius (1997) argumenta em seu trabalho que a resistência da madeira é menor quando obtida em peças de maiores dimensões.

No Brasil, Batista *et al.* (2000) compararam valores de módulo de elasticidade calculados a partir de ensaios de flexão estática em peças estruturais de 60 mm x 160 mm x 3600 mm com valores de módulo de elasticidade calculados para corpos-de-prova de 50 mm x 50 mm x 1150 mm, e concluíram que, para o Eucalipto (os autores não especificaram a espécie), os valores determinados diferiram em 0,6% (12.164 MPa para as peças de pequenas dimensões e 12.095 MPa para peças estruturais). Para a espécie *Cambará*, a diferença foi de 5,8% (14.036 MPa para peças estruturais e 14.846 MPa para as peças de pequenas dimensões); e para a espécie *Cupiúba* a diferença foi mais acentuada: 30% (7.374 MPa para as peças de pequenas dimensões e 10.521 MPa para peças estruturais).

Já Santos e Ballarin (2002) compararam os resultados de módulos de elasticidade obtidos em ensaios de corpos-de-prova, utilizando ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras, a partir de árvores com cerca de 30 anos das espécies *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. Os autores concluem nesse trabalho que o módulo de elasticidade à

flexão foi inferior ao módulo de elasticidade à compressão paralela, apresentando relações entre ambos variando de 0,75 a 0,78.

Pinto Neto et al. (2004) determinaram as propriedades de resistência e de rigidez de peças estruturais roliças de pequenos diâmetros da espécie *Eucalyptus alba*. Os autores realizaram ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras nos elementos e concluíram que este segundo é o melhor indicador das propriedades de resistência do material por apresentar menor variabilidade dos resultados.

Estudo realizado por Miná et al (2004a), no qual se avaliou a resistência e a rigidez de postes de madeira da espécie *Corymbia citriodora*, comparando os resultados com os obtidos em corpos-de-prova isentos de defeitos, aponta que os valores do módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão estática são maiores para as peças estruturais (22.175 MPa) do que para as de pequenas dimensões (20.078 MPa). Na compressão paralela às fibras os autores concluíram que os valores obtidos para as peças estruturais (19.990 MPa) são menores do que aqueles resultantes para as peças isentas de defeito (21.705 MPa).

Apesar de existirem normas internacionais prevendo ensaios para determinação das propriedades mecânicas da madeira em peças de grandes dimensões (estruturais), a norma brasileira NBR 7190:1997 (ABNT, 1997) não prevê ensaios em peças de grandes dimensões, para que possam ser comparados os seus valores aos dados das peças de pequenas dimensões e isentas de defeitos.

Paralelamente, o emprego de elementos estruturais roliços na construção civil corresponde a um dos usos mais eficientes de recursos florestais. As peças de seções transversais circulares são facilmente obtidas, pois correspondem justamente à geometria natural da seção transversal de uma árvore, e requerem menor número de operações durante os seus processamentos. Existem diversas possibilidades do uso dos elementos roliços, destacando-se entre elas as estruturas para pontes, as estruturas aplicadas às redes elétricas aéreas de distribuição (postes e torres), os pilares, as estacas de fundações, as habitações, as coberturas, os silos, os galpões de armazenamento ou de confinamento animal, e as estruturas de contenção. No dimensionamento estrutural, a Norma Brasileira NBR 7190:1997 (ABNT, 1997) orienta que os elementos de seção circular podem ser considerados como de seção quadrada equivalente, especificando as peças a partir de seus diâmetros de base e de topo.

Assim, o objetivo desse estudo é comparar os valores de módulo de elasticidade obtidos em peças estruturais roliças e em corpos-de-prova isentos de defeitos da espécie *Pinus elliottii*, em dois tipos de ensaios padronizados: compressão paralela às fibras e flexão estática. Os resultados podem contribuir para que sejam inseridos ensaios mecânicos em peças de tamanhos considerados estruturais no documento normativo brasileiro NBR 7190:1997 (ABNT, 1997), de modo a se obter valores que melhor representem as propriedades mecânicas das madeiras, bem como fornecer parâmetros para a determinação de coeficientes de ajustes das propriedades mecânicas das peças estruturais, estimadas a partir de corpos-de-prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos.

MATERIAL E MÉTODOS

A escolha da espécie *Pinus elliottii* foi realizada por esta ser oriunda de floresta plantada e disponível na região de São Carlos, no Estado de São Paulo.

Árvores foram obtidas junto à Estação Ecológica de Itirapina, da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, e alguns fatores foram relevantes na determinação do número de exemplares: o fato das mesmas terem sido solicitadas sob a forma de doação; o transporte, limitado pelas dimensões das peças; e o custo de sua mobilização. Optou-se, então, por adotar número mínimo de exemplares referido em documentos normativos.

Nesse sentido, Hellmeister (1973) aponta em seu trabalho: "O número mínimo de árvores a ser estudado por espécie é 10, sempre obtidas por amostragem ocasional." Já a norma técnica americana ASTM D5536-94 (ASTM, 1994) sugere número mínimo de 5 elementos para a população cujas árvores apresentem diâmetros maiores que 30 centímetros, e 10 árvores para a população com diâmetros inferiores ao valor citado. Já a norma brasileira NBR 7190:1997 (ABNT, 1997) estabelece número de 12 corpos-de-prova para a caracterização mínima da resistência de um lote de madeira serrada cujo volume não seja superior a 12 metros cúbicos.

Em campo observou-se que as árvores avaliadas apresentavam diâmetro à altura do peito (DAP) médios em torno de 30 centímetros e 15 metros de comprimento (descartando-se a copa da planta), e com essas informações calculou-se então o volume de uma peça, que foi de aproximadamente um metro cúbico.

Como seriam realizados, também, ensaios estruturais, ou seja, cada árvore seria praticamente um corpo-de-prova de grandes dimensões, e com base na literatura citada, optou-se finalmente pelo número de 12 árvores.

Na Estação Ecológica de Itirapina, as árvores de *Pinus elliottii* utilizadas na pesquisa estavam plantadas no talhão número 41, e possuíam 25 anos de idade.

Determinada a região de interesse, as peças foram escolhidas aleatoriamente dentro do talhão, evitando-se selecionar as plantas que cresceram nas bordas da área, uma vez que essas árvores podem apresentar defeitos de crescimento, como madeira de reação, fibras torcidas e fustes curvos.

Cada árvore de *Pinus* foi dividida em duas toras de 7,5 metros de comprimento, sendo uma tora de base e uma tora de topo. As peças foram levadas ao Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, do Departamento de Engenharia de Estruturas, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (LaMEM/SET/EESC/USP), onde foram realizados ensaios de flexão estática, de compressão paralela às fibras e de determinação da densidade aparente da madeira.

Ensaio de flexão estática e de compressão paralela às fibras

As peças de dimensões maiores do que as dimensões dos corpos-de-prova isentos de defeitos, previstos na NBR 7190:1997 (ABNT, 1997), foram chamadas de estruturais, pois apresentavam comprimentos e/ou diâmetros compatíveis às dimensões empregadas em estruturas de construção civil. Os testes foram conduzidos nas peças estruturais e nos corpos-de-prova com valores de teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras. Com isso, buscou-se uma padronização dos resultados, minimizando a possibilidade da influência do teor de umidade nos resultados.

Todos os ensaios seguiram as prescrições do documento normativo brasileiro NBR 7190:1997 (ABNT, 1997), sendo que para as peças estruturais buscou-se seguir o recomendado para os corpos-de-prova de dimensões reduzidas, uma vez que não há metodologia na norma citada para ensaios em peças de grandes dimensões. Ressalta-se que, apesar de existirem normas internacionais abrangendo ensaios em peças estruturais, optou-se no presente estudo pela orientação do documento brasileiro, simi-

larmente ao que foi feito nos trabalhos de Miná, et al (2004a,b). O primeiro ensaio realizado foi o de flexão estática nos elementos estruturais, com carga concentrada aplicada no meio do vão (Figura1), apoiados em suas extremidades, com a distância entre apoios obedecendo à relação comprimento do vão/diâmetro no ponto médio da peça (L/d) igual a 15. Para corpos-de-prova de pequenas dimensões, a norma brasileira NBR7190:1997 (ABNT, 1997), prevê uma relação L/d igual a 21, mas Zangiaco (2007) verificou que, a partir da relação L/d igual a 15, para peças estruturais de seção circular da espécie *Pinus elliotti*, a influência da parcela da força cortante no deslocamento da peça em ensaios de flexão estática pode ser desconsiderada.

Os elementos estruturais não foram rompidos para estimativa de sua capacidade de carga nos ensaios de flexão estática. Assim, três ciclos de carregamentos foram conduzidos em cada elemento roliço, e os deslocamentos nos seus pontos médios foram limitados ao valor do vão dividido por duzentos ($L/200$), tendo como base o limite de utilização previsto na NBR 7190:1997 (ABNT, 1997), supondo-se então que o material esteja trabalhando no regime elástico.



Figura 1. Ensaio de flexão estática em elemento estrutural roliço

Figure 1. Static bending test for structural round timber

Para a determinação do módulo de elasticidade da peça foi empregada a eq. 1, onde d é o deslocamento no ponto médio da peça, F é o carregamento aplicado, L é o vão entre apoios,

E_M é o módulo de elasticidade e I é o momento de inércia da seção.

$$\delta = \frac{FL^3}{48E_M I} \quad (1)$$

Na sequência foram realizados os ensaios de compressão paralela às fibras nas peças estruturais, para a determinação do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras (E_{c0}). Peças de aproximadamente 400 mm de comprimento foram retiradas das toras de 7,5 metros e ensaiados em três ciclos de carregamento. Para cada exemplar a ser ensaiado, outro exemplar gêmeo foi rompido para estimativa do trecho elástico do diagrama tensão x deformação, sendo utilizada para a determinação do módulo de elasticidade (E_{c0}) a eq. 2:

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma_{50\%}$ = tensão correspondente a 50% da resistência à compressão paralela às fibras;

$\sigma_{10\%}$ = tensão correspondente a 10% da resistência à compressão paralela às fibras;

$\varepsilon_{50\%}$ = deformação específica medida no corpo-de-prova, correspondente à tensão de $\sigma_{50\%}$

$\varepsilon_{10\%}$ = deformação específica medida no corpo-de-prova, correspondente à tensão de $\sigma_{10\%}$

Para as medições das deformações foram colocados relógios comparadores em posições diametralmente opostas, conforme mostra a fig. 2. Para os ensaios foi utilizado equipamento elétrico hidráulico de aplicação de carga com capacidade de 2.000 kN (AUTOTEST 2000 ELE International, Inglaterra).

Os ensaios de flexão estática, de compressão paralela e de densidade aparente foram realizados, então, em corpos-de-prova de dimensões reduzidas, obtidos dos elementos estruturais roliços (Figura 3). As dimensões dos corpos de

prova e as metodologias dos ensaios seguiram as recomendações do documento normativo brasileiro NBR 7190:1997 (ABNT, 1997).



Figura 2. Ensaio de compressão paralela em elemento estrutural roliço

Figure 2. Compression parallel to grain test in structural round timber

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme já mencionado, os ensaios foram conduzidos em peças com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras. A densidade aparente média foi de 550 kg.m^{-3} , valor esse muito aproximado ao apresentado pela NBR 7190:1997 (ABNT, 1997), em seu Anexo E, que é de 560 kg.m^{-3} .

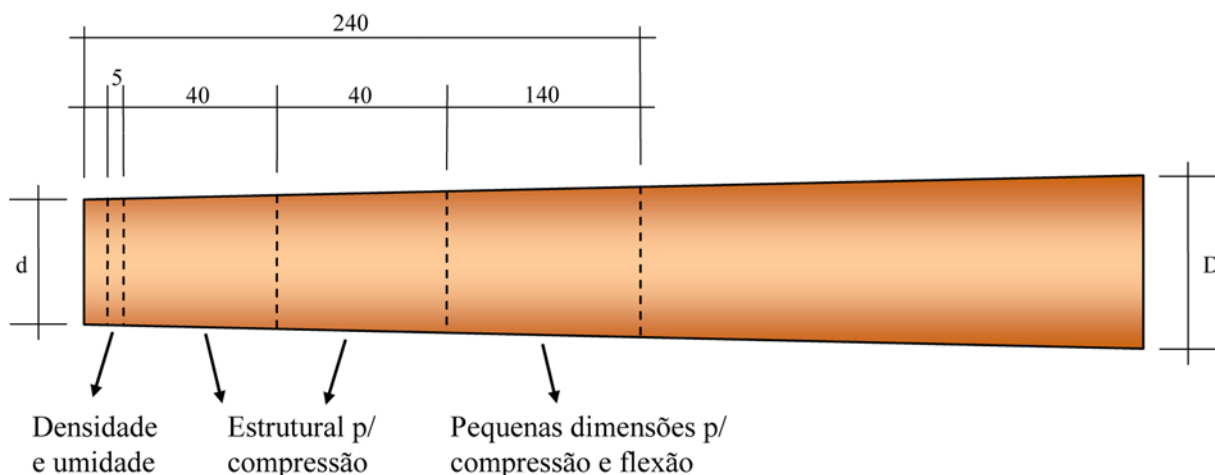


Figura 3. Esquema de corte do elemento roliço (dimensões em centímetros)

Figure 3. Outline of the cut of the round timber (values in centimeters)

Tabela 1. Valores médios de módulo de elasticidade obtidos em ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras.

Table 1. Modulus of elasticity mean values obtained in static bending and compression parallel to grain tests.

	Flexão estática (MPa)		Compressão paralela (MPa)	
	Estruturais	C.p.'s	Estruturais	C.p.'s
Média	9.594	7.724	8.077	11.596
Desvio padrão	1.749	2.431	2.151	3.488
C.v.	0,18	0,31	0,27	0,30

Santini et al. (2000) obtiveram, para corpos-de-prova de pequenas dimensões extraídos de árvores de *Pinus elliottii* de 13 anos de idade e com teor de umidade de 12%, os valores médios dos módulos de elasticidade igual 7.326 MPa para o ensaio de flexão estática e de 7.353 MPa para o ensaio de compressão paralela às fibras. No Wood Handbook (USDA, 2010) o valor médio do módulo de elasticidade para a espécie *Pinus elliotti* plantada nos Estados Unidos é de 10.500 MPa, obtido a partir de ensaios de flexão estática de corpos-de-prova de pequenas dimensões, com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras. Apesar de ser difícil a realização de uma comparação numérica direta, uma vez que mesmo se tratando da mesma espécie a madeira apresenta variações de propriedades em função do local de crescimento, densidade de população, clima, etc., a ordem de grandeza dos valores obtidos nesta pesquisa (Tabela 1) são compatíveis com os autores citados.

A relação calculada entre os valores médios dos módulos de elasticidade obtidos em ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras, em corpos-de-prova de pequenas dimensões e isentos de defeitos, é de 0,67, ficando abaixo da faixa encontrada por Santos e Ballarin (2002): entre 0,75 e 0,78. Cabe destacar que no caso de Santos e Ballarin (2002) as espécies ensaiadas eram folhosas, enquanto neste trabalho conífera. Destaca-se ainda que a norma técnica NBR 7190:1997 (ABNT, 1997) especifica relações de 0,85 para coníferas e 0,90 para folhosas.

No entanto, quando feito o cálculo da relação entre os valores médios dos módulos de elasticidade obtidos em ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras para as peças estruturais, o valor da relação obtido no presente estudo foi de 1,18. Nota-se que há uma inversão das respostas em função do tamanho das peças: para os corpos-de-prova de pequenas dimensões, os valores de módulo de elasticidade obtidos em ensaios de compressão paralela foram superiores aos valores obtidos em ensaios de flexão estática; já para as peças de dimensões estruturais, os maiores va-

lores de módulo de elasticidade foram obtidos nos ensaios de flexão estática. Uma explicação para este comportamento pode estar na hipótese de que o efeito da dimensão do corpo de prova é mais significativo em casos de ruptura frágil (tração e flexão) do que em casos de ruptura dúctil (compressão). Quanto maior a peça maior será a probabilidade de se encontrar defeitos e a localização desses defeitos (zona tração ou zona comprimida), influencia distintamente nas respostas dos ensaios. A redução da resistência de uma peça se dá pela existência da singularidade ou da descontinuidade, ou seja, é um reflexo do tipo do ensaio e não da propriedade intrínseca da espécie.

Apesar de Pinto Neto et al. (2004) apontarem em seus estudos com a espécie *Eucalipto alba* que o ensaio de compressão paralela às fibras apresenta menor variabilidade para os valores de módulo de elasticidade quando comparada à variabilidade dos valores obtidos em ensaios de flexão estática, o mesmo fato não ocorreu para o *Pinus elliotti* aqui estudado: o coeficiente de variação obtido, para as peças estruturais, foi 0,27 para os ensaios de compressão paralela e 0,18 para os ensaios de flexão estática. Esses resultados podem ter ocorrido em função da posição dos defeitos nas peças estruturais ensaiadas.

A comparação entre os valores de módulo de elasticidade obtidos em peças estruturais e nas de pequenas dimensões foi realizada por meio de análise estatística, sendo feita a Análise de Variância de Médias (ANOVA), com nível de significância de 5% (Tabela 2).

Tabela 2. Análise de variância para os ensaios de flexão estática

Table 2. Analysis of variance in bending tests

	Média (MPa)	F _{calculado}	F _{tabelado}	p-valor
Estruturais	9.594	8,60	4,08	0,005
C.p.'s	7.724			

A análise estatística realizada indica que as médias não são estatisticamente equivalentes, com um valor de $F_{\text{calculado}}$ 8,60, acima do valor de F_{tabelado} 4,08. O p-valor inferior a 0,05 também indica a não equivalência.

A média dos valores obtidos nos ensaios de flexão estática foi 19% inferior para os corpos-de-prova de pequenas dimensões, quando comparada à média das peças estruturais, corroborando o observado por Batista et al. (2000) para a espécie Cupiúba (que chegou a 30% de diferença). Duas hipóteses poderiam explicar esse comportamento, não esperado: a) as madeiras dos corpos-de-prova de pequenas dimensões apresentavam defeitos internos, que não foram percebidos a olho nú; e/ou b) os corpos-de-prova de pequenas dimensões foram retirados de regiões da seção transversal que continham madeira juvenil, apesar do cuidado em se obtê-los afastados da região central da seção transversal. Salienta-se ainda que as respostas obtidas para este ensaio não estão de acordo com o que foi publicado em muitos estudos e referenciado em normas técnicas internacionais, ou seja, que os resultados obtidos em peças pequenas e isentas de defeitos são superiores aos obtidos em peças de grandes dimensões. Neste sentido, Corsini et al (2004), fazendo menção ao Wood Handbook (USDA, 2010), citam que "(...) em geral, corpos de prova, que são peças pequenas, têm maior resistência do que peças estruturais, que são maiores."

Tabela 3. Análise de variância para os ensaios de compressão paralela às fibras
Table 3. Analysis of variance in compression parallel to grain tests

	Média (MPa)	F _{calculado}	F _{tabelado}	p-valor
Estruturais	8.077			
C.p.'s	11.596	15,57	4,09	0,000

No caso da compressão paralela às fibras (Tabela 3) também é observada a não equivalência entre as médias comparadas, com p-valor inferior a 0,05, e $F_{\text{tabelado}}/4,09$, inferior a $F_{\text{calculado}}/15,57$. Observa-se diferença de 30% entre o valor médio obtido para os corpos-de-prova de pequenas dimensões e o valor médio obtido para as peças estruturais. Apesar das peças estruturais terem suas seções circulares recebendo todo o carregamento axial, a presença de madeira juvenil pode ter contribuído para a diminuição da rigidez da peça, bem como outros defeitos naturais, como as fibras reversas. Já por outro lado, os corpos-de-prova de dimensões reduzidas, além de não conterem defeitos visíveis, provavelmente foram extraídos de regiões de madeira adulta, o que contribui para rigidezes mais elevadas.

Salienta-se, ainda, que os resultados de ambos os ensaios mostraram-se em consonância com os do trabalho de Miná, et al (2004a), apesar de

serem diferentes as espécies e os teores de umidade das peças. Estudando a espécie *Corymbia citriodora*, os mencionados autores obtiveram, para o ensaio de flexão estática, resultados superiores para peças estruturais (22.175 MPa) do que para pequenos corpos de prova isentos de defeitos (20.078 MPa), e para o ensaio de compressão paralela às fibras, os valores superiores foram os obtidos para corpos de prova pequenos e isentos de defeitos (21.075 MPa), quando comparados aos de peças estruturais (19.990 MPa).

Finalmente, diante das diferenças observadas nos valores comparados, parece adequado que sejam inclusos ensaios mecânicos em peças estruturais no documento normativo brasileiro NBR7190:1997 (ABNT, 1997). A partir dos dados obtidos em ensaios de corpos-de-prova de pequenas dimensões, isentos de defeitos, e de dados obtidos de ensaios em peças estruturais, seria possível fazer uma comparação de valores e, se necessário, estabelecer equações e/ou coeficientes de correção de resistência e de rigidez para as madeiras de uso estrutural. Como referências, poderiam ser utilizados documentos normativos como os da American Society for Testing and Materials e o Eurocode 5, que apresentam ensaios em peças de dimensões estruturais.

CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos nesse estudo, pode-se concluir, para a espécie *Pinus elliottii*, que há diferenças significativas entre os valores de módulos de elasticidade obtidos em elementos estruturais e em corpos de prova de dimensões reduzidas, tanto na compressão paralela às fibras quanto na flexão estática.

No caso da compressão paralela os resultados dessa pesquisa confirmaram o que já se tem demonstrado em muitas partes do mundo: o emprego de resultados obtidos em corpos de prova de pequenas dimensões pode conduzir a dimensionamento estrutural inseguro, uma vez que as peças estruturais apresentaram comportamento inferior ao das de pequenas dimensões. Cabe mencionar que os valores de referência adotados pela NBR 7190:1997 (ABNT, 1997), em vigor, para o cálculo estrutural, são obtidos em ensaios de compressão paralela às fibras.

Finalmente, os resultados corroboram com a conveniência de se ter incluída, no texto proposto para revisão da NBR 7190:1997 (ABNT, 1997), aspectos normativos para a realização de ensaios em peças de dimensões estruturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Estação Ecológica de Itirapina-SP, pela doação dos exemplares da espécie estudada, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2899** – Standard Practice for Establishing Allowable Stresses for Round Timber Piles. Philadelphia, 2012.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D245-06** – Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber. Philadelphia, 2011.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1990** – Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Visually-Graded Dimension Lumber from In-Grade Tests of Full-Size Specimens. Philadelphia, 2007.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5536** – Standard practice for sampling forest trees for determination of clear wood properties. Philadelphia, 1994.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

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: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7, 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EBRAMEM, 2000. 1 CD-ROM.

CORSINI, T. A.; FONTE, T. F.; CALIL JÚNIOR, C. Propriedades mecânicas de peças estruturais versus corpos-de-prova isentos de defeitos. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004. Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: EBRAMEM, 2004. 1 CD-ROM.

FONSELIUS, M. Effect of size on the bending strength of laminated veneer lumber. **Wood Science and Technology**, New York, v. 31, n. 6, p. 399 – 413, 1997.

GREEN, D. W.; KRETSCHMANN, D. E. Lumber property relationships for engineering design standards. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 23, n. 3, p. 436–456, 1991.

HELLMEISTER, J. C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira**. 1973. 161 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1973.

KRETSCHMANN, D. E.; HERNANDEZ, R. Grading timber and glued structural members. In: WALKER, J. C. F. **Primary Wood Processing Principles and Practice**. 2ed. Dordrecht: Springer, 2006. Cap. 10, p. 339-390.

MARKWARDT, L. J. **The distribution and the mechanical properties of Alaska woods**. Madison: United States Department of Agriculture, 1931. (Technical bulletin n. 226)

MINÁ, A. J. S.; DIAS, A. A.; CALIL JÚNIOR, 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, 2004. Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: EBRAMEM, 2004a. 1 CD-ROM.

MINÁ, A. J. S.; OLIVEIRA, F. G. R.; CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A.; SALES, A. Avaliação não destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p.188-196, 2004b

PINTO NETO, J.; CALIL JÚNIOR, C.; ESPINOZA, M. M.; PARTEL, P. M. P. Propriedades de resistência e rigidez de peças estruturais roliças de pequeno diâmetro. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: EBRAMEM, 2004. 1 CD-ROM.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 85-93, 2000.

SANTOS, E. S.; BALLARIN, A. W. Correlações entre os módulos de elasticidade à compressão paralela às fibras e à flexão para algumas espécies de eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: EBRAMEM, 2002. 1 CD-ROM.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Forest Products Laboratory. **Wood Handbook: Wood as na Engineering Material**. Madison: USDA, 2010. 509 p. (General Technical Report, FPL-GTR-190)

ZANGIACOMO, A. L.. **Estudo de elementos estruturais roliços de madeira**. 2007. 142 p.. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Recebido em 23/02/2012
Aceito para publicação em 03/05/2013

