

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA *IN SITU* POR ENSAIOS DE MESOPROVETES

Brites, R.D.¹; Machado, J.S.²; Lourenço, P.B.¹

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho

² Núcleo de Estruturas de Madeira, Laboratório Nacional de Engenharia Civil



RESUMO

*Uma das principais dificuldades da avaliação do estado de segurança de estruturas de madeira existentes é a determinação das propriedades mecânicas a utilizar para efeitos de cálculo. Os procedimentos habituais de estabelecimento das propriedades mecânicas com base no estabelecimento de classes de resistência por avaliação visual validada com ensaios não-destrutivos conduzem a resultados muito conservativos. No presente trabalho será apresentado um método semi-destrutivo que avalia a resistência à tracção da madeira através de amostras recolhidas do elemento estrutural, sendo estabelecidas relações entre resultados análogos de mesoprovetes e provetes normalizados para peças de pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.) e castanho nacional (*Castanea sativa* Mill.).*

1- INTRODUÇÃO

A avaliação do estado de segurança de estruturas de madeira em serviço é fortemente condicionada pelas propriedades mecânicas estabelecidas para o material. Habitualmente estas propriedades são estabelecidas com base numa inspecção visual, em função da espécie e da presença de defeitos (nós, desvios do fio, etc.), numa metodologia análoga à indicada na norma Italiana UNI 11119 (2004).

Contudo, este procedimento tende a estimar valores muito conservativos para as propriedades mecânicas dos elementos, o que associado a regulamentação destinada a estruturas novas conduz habitualmente a situações onde é necessário um avultado reforço estrutural, mesmo em estruturas com mais de um século e sem sinais aparentes de dano.

Estes resultados aparentemente paradoxais mostram a necessidade de melhorar a fiabilidade da determinação das propriedades mecânicas da madeira. Os métodos não-destrutivos apenas apresentam uma estimativa (por vezes grosseira) das propriedades mecânicas do material, pelo que é necessária uma metodologia mais directa de estabelecimento das propriedades de resistência e rigidez de elementos de madeira em serviço.

É neste âmbito que Kasal e Anthony (2004) sugerem o uso de ensaios semi-destrutivos para avaliação das propriedades mecânicas da madeira. Estes ensaios consistem na remoção e ensaio destrutivo de pequenas partes do elemento estrutural, de forma a obter directamente as suas propriedades resistentes e de rigidez, ao invés de os estimarem como nos supracitados ensaios não-destrutivos.

1.1 - Método proposto para a obtenção de mesoprovetes

A metodologia originalmente proposta por Kasal e Anthony (2004) para obtenção de mesoprovetes destinados a ensaios de tracção paralela ao fio consiste no corte de um provete prismático de secção triangular através de duas incisões a 45° na superfície da peça a uma distância entre os 3 mm e 8 mm, realizadas com uma serra de disco fixada a um sistema de carris. Nas extremidades dos elementos retirados são depois coladas peças de madeira de modo a permitir a aplicação das garras para o ensaio de tracção, ver **Fig. 1**.



Fig. 1 – Método de obtenção de mesoprovetes sugerido por Kasal e Anthony (2004): à esquerda, aparato de remoção, à direita, preparação das extremidades para ensaio

Este método, além de exigir um equipamento pesado para o corte, requer um sistema de fixação ao elemento que o torna inadequado a uma utilização *in situ*, além de apresentar dificuldades na obtenção de provetes na direcção paralela ao fio.

Para ultrapassar as limitações expostas criou-se uma metodologia onde se recorre a uma serra de recortes para a extracção do mesoprovete, por meio de um corte no vértice da peça, sendo este corpo posteriormente trabalhado de forma a alcançar um corpo de prova análogo ao preconizado na norma EN ISO 527-2: 1996 para ensaios à tracção de materiais plásticos, ver **Fig. 2**.



Fig. 2 – Método proposto para obtenção dos mesoprovetes: à esquerda, corte da peça principal; à direita, transformação para provete similar ao utilizado em ensaio de materiais plásticos

2- ENSAIOS DE CORRELAÇÃO

Com vista à aplicação do método dos mesoprovetes à avaliação das propriedades mecânicas da madeira, é necessário proceder a ensaios de correlação entre grandezas análogas medidas no ensaio proposto e no normalizado correspondente.

Esta correlação é necessária devido às diferentes de escalas dos mesoprovetes e provetes normalizados, o que se traduz numa maior variabilidade e menor apetência para a presença de defeitos dos mesoprovetes em relação aos provetes normalizados. Face ao exposto, e com o intuito de aumentar a representatividade dos mesoprovetes, estabeleceu-se um rácio de quatro mesoprovetes por cada provete normalizado ensaiado, sendo considerado que as propriedades dos mesoprovetes correspondem à média dos quatro mesoprovetes ensaiados.

Os ensaios dos provetes normalizados e mesoprovetes foram efectuados de acordo com o preconizado na norma brasileira NBr 7190 (1997), seguindo também o preconizado na norma EN 408:2003 relativamente à preparação das amostras (temperatura de 20°C \pm 2 °C e humidade relativa do ar de 65 % \pm 5%) e da duração do ensaio, tendo os ensaios sido efectuados com controlo de deformação, calibrando a velocidade da cabeça para atingir a rotura no período de 300 \pm 120 segundos. Tal foi conseguido uma taxa de 1.50 mm/min para os mesoprovetes e 4.00 mm/min para os

provetes normalizados. As dimensões nominais dos provetes normalizados e mesoprovetes são apresentadas na **Fig. 3**.

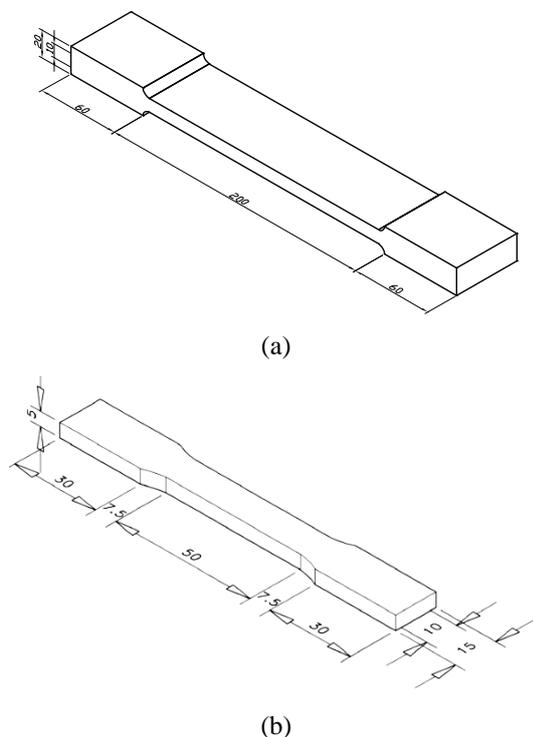


Fig. 3 – Dimensões nominais (em milímetros) dos (a) provetes normalizados e (b) mesoprovetes

Nos pontos seguintes serão apresentados os resultados dos ensaios para peças de madeira de pinho bravo (*Pinus pinaster Ait.*) e castanho nacional (*Castanea sativa Mill.*), sendo avaliada a tensão de rotura à tracção e respectivo módulo de elasticidade, quer separadamente quer em conjunto.

2.1 - Pinho Bravo

Os resultados obtidos para os ensaios de pinho bravo apresentam-se sintetizados na **Tabela 1**. Pode-se verificar que o valor do módulo de elasticidade em ambos os ensaios é muito similar, enquanto em termos de tensão de rotura é superior nos mesoprovetes. Em termos de CV, os valores mostram-se novamente muito semelhantes para o módulo de elasticidade e superiores na tensão de rotura dos provetes normalizados do que nos mesoprovetes, o que se pode ficar a dever ao facto de ser utilizada a média dos resultados dos quatro ensaios de mesoprovetes, o que reduz a sua variância.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios a peças de pinho bravo.

Ensaio	Propriedade	μ (MPa)	CV	n
Norm	$f_{t,0}$	66.85	0.24	25
	$E_{t,0}$	15038	0.23	25
Meso*	$f_{t,0}$	91.51	0.18	25
	$E_{t,0}$	14982	0.22	25

*= média dos quatro mesoprovetes ensaiados

Apresentam-se na **Fig. 4** as funções densidade de probabilidade ajustadas aos resultados dos ensaios normalizados e de mesoprovetes que corroboram a boa concordância em termos de rigidez e fraca em termos de resistência.

As rectas de regressão do módulo de elasticidade e tensão de rotura são apresentadas na **Fig. 5**. Pode-se mais uma vez verificar uma maior correlação entre os resultados de rigidez do que de resistência, expresso pelo maior valor do coeficiente de correlação, r^2 .

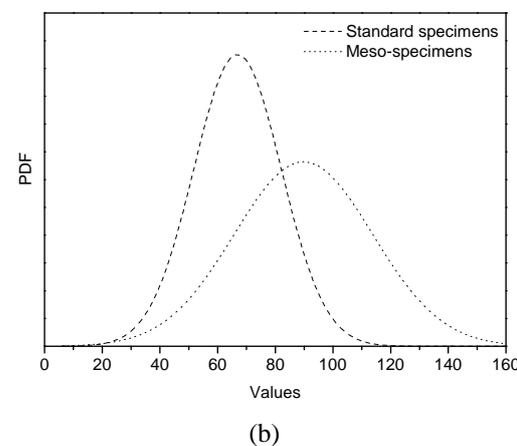
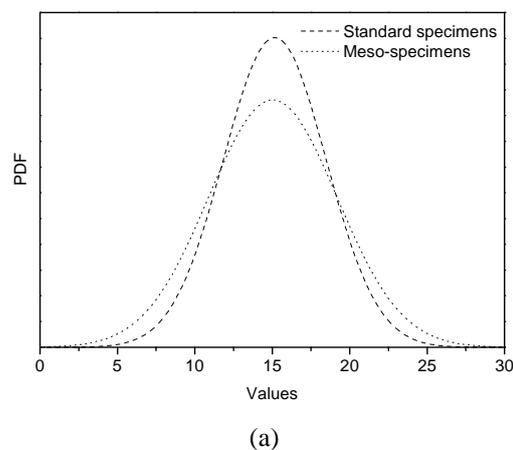
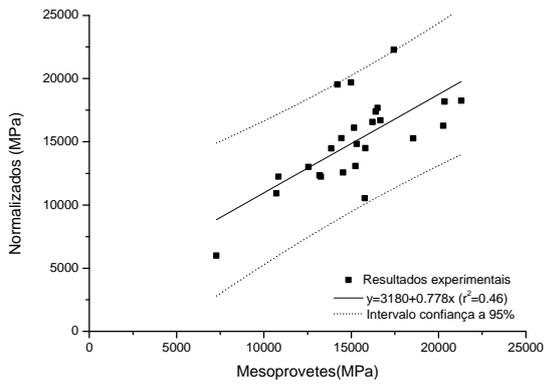
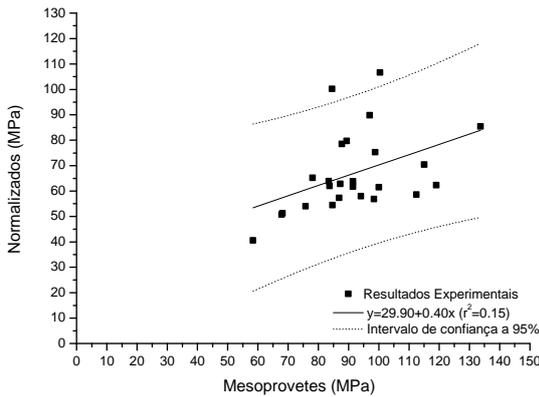


Fig. 4 – Ajuste dos resultados dos ensaios aos provetes de Pinho bravo a funções densidade de probabilidade normais: (a) $E_{t,0}$ (kN/mm^2); (b) $f_{t,0}$ (N/mm^2).



(a)



(b)

Fig. 5 – Rectas de regressão linear para as peças de pinho: (a) $E_{t,0}$; (b) $f_{t,0}$.

Por fim, foram encontrados os valores característicos das diversas variáveis estudadas (através do conhecimento das funções de densidade de probabilidade) e correlacionadas as análogas de forma a estabelecer relações empíricas entre ambas, ver **Tabela 2**.

Tabela 2 – Relações entre resultados de ensaios análogos em termos de valores médios e característicos, para provetes de pinho bravo.

Parâmetro	Ensaio	μ (MPa)	x_k (MPa)	$Meso/Norm$	
				Médio	Caract
$E_{t,0}$	Meso	15056	7867.0	0.99	0.81
	Norm	15159	9704.1		
$f_{t,0}$	Meso	90.06	50.48	1.34	1.20
	Norm	66.90	41.92		

Para $E_{t,0}$ verifica-se uma relação quase unitária para o valor médio do módulo de elasticidade e uma variação de cerca de 20% em termos de valor característico, que curiosamente é o mesmo para a tensão de

rotura à tracção, embora com direcções diferentes. A relação entre valores médios de $f_{t,0}$ mostra um factor de 1.34 entre os resultados dos dois ensaios, sendo superior no ensaio dos mesoprovetes pelas razões já expostas.

2.2 - Castanho

O procedimento seguido para os provetes de pinho foi repetido para peças de castanho, apresentando-se agora os resultados obtidos. Mais uma vez, os resultados em termos de rigidez são muito semelhantes em ambos os ensaios, enquanto em termos de resistência os provetes normalizados apresentam em média um valor mais reduzido do que os mesoprovetes. Os coeficientes de variação são muito semelhantes nos quatro ensaios, ver Tabela 3, sendo no entanto mais altos do que nos ensaios do pinho, o que confirma a maior dificuldade em estabelecer propriedades mecânicas em madeiras folhosas em comparação com as resinosas.

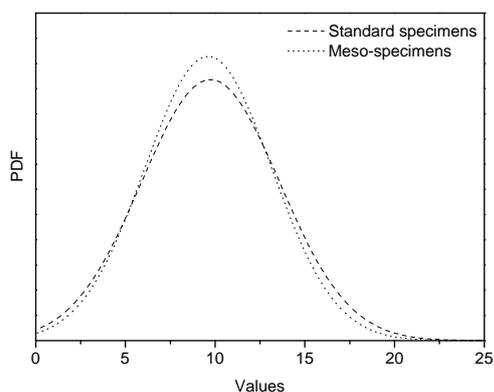
Tabela 3 – Resultados dos ensaios a peças de castanho.

Ensaio	Propriedade	μ (MPa)	CV	n
Norm	$f_{t,0}$	48.40	0.38	25
	$E_{t,0}$	9734.60	0.43	25
Meso*	$f_{t,0}$	61.11	0.35	25
	$E_{t,0}$	9451.80	0.36	25

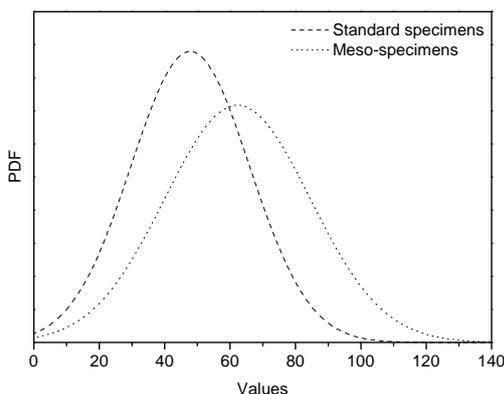
*= média dos quatro mesoprovetes ensaiados

As funções densidade de probabilidade normais ajustadas aos resultados experimentais são apresentadas na **Fig. 6**, onde mais uma vez se verifica uma boa concordância em termos de módulo de elasticidade e menos capaz em termos de tensão de rotura.

As relações entre resultados análogos obtidos nos dois ensaios são apresentadas na **Tabela 4**, onde mais uma vez se constata uma relação quase unitária entre valores médios do módulo de elasticidade e uma fraca relação para a tensão de rotura à tracção, o que corrobora a apetência do ensaio para determinação do módulo de elasticidade em tracção.

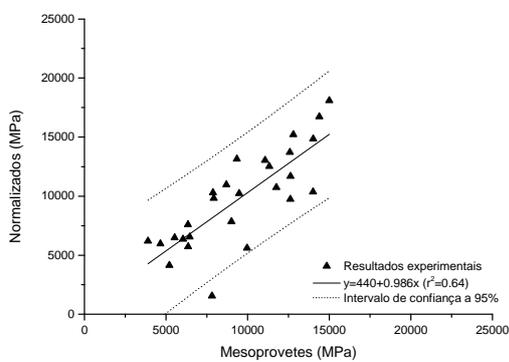


(a)

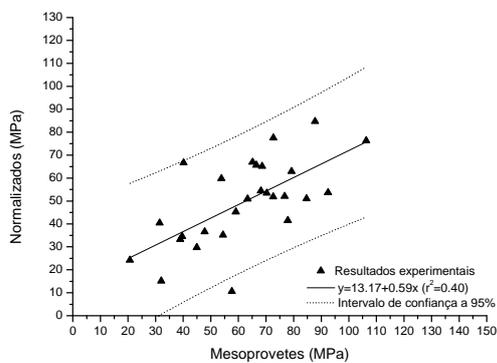


(b)

Fig. 6 – Ajuste dos resultados dos ensaios aos provetes de castanho a funções densidade de probabilidade normais: (a) $E_{t,0}$ (kN/mm^2); (b) $f_{t,0}$ (N/mm^2).



(a)



(b)

Fig. 7 – Rectas de regressão linear para as peças de castanho: (a) $E_{t,0}$; (b) $f_{t,0}$.

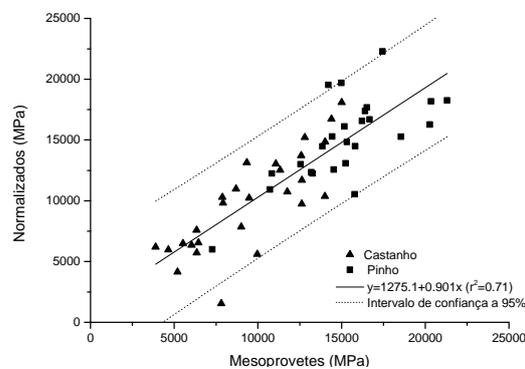
Tabela 4 – Relações entre resultados de ensaios análogos em termos de valores médios e característicos, para provetes de castanho.

Parâmetro	Ensaio	μ (MPa)	x_k (MPa)	Meso/Norm	
				Médio	Caract
$E_{t,0}$	Meso	9613.3	3795.0	0.98	1.11
	Norm	9742.6	3405.8		
$f_{t,0}$	Meso	62.25	25.67	1.30	1.42
	Norm	47.82	18.02		

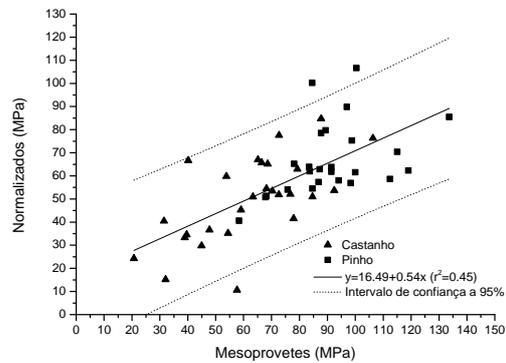
2.3 - Análise conjunta (pinho e castanho)

Com o objectivo de avaliar a possibilidade de extrapolação dos resultados anteriormente apresentados a outras espécies de madeira, foram analisadas em conjunto os resultados dos ensaios das peças de pinho e de castanho, num procedimento análogo ao descrito em Kasal (2003). Dadas as limitações em obter ambos os provetes (normalizados e mesoprovetes) em obra, esta relação seria de inegável interesse prático.

Na regressão apresentada na Fig. 8 verifica-se um aumento dos coeficientes de



(a)



(b)

Fig. 8 – Rectas de regressão linear para as peças de pinho e castanho: (a) $E_{t,0}$; (b) $f_{t,0}$.

correlação em ambos os parâmetros, sendo este mais significativo em termos de $E_{t,0}$ ($r^2=0.71$) do que para $f_{t,0}$ ($r^2=0.45$), sendo em ambos os casos melhores do que a consideração individual de cada espécie.

Estes resultados mostram que é possível estabelecer relações para o conjunto de várias espécies em simultâneo (ou nos casos onde as espécies são desconhecidas) e dessa forma melhorar os parâmetros da regressão.

3- CONCLUSÕES

Foi apresentado um método de avaliação das propriedades mecânicas à tracção paralela ao fio de peças de madeira em serviço, recorrendo a ensaios semi-destrutivos de mesoprovetes. Esta metodologia foi calibrada para espécimes de pinho bravo e castanho, sendo analisados os resultados por espécie e conjuntamente.

Os mesoprovetes consistem em peças de madeira retirados da estrutura em serviço e que se destinam a ensaios destrutivos para caracterização mecânica. O processo de remoção foi adaptado da metodologia proposta por Kasal e Anthony (2004), de modo a torná-la de fácil aplicação em campo, utilizando para o efeito uma vulgar serra de recortes. Estes mesoprovetes são depois trabalhados em carpintaria de forma a obter dimensões normalizadas.

Os resultados experimentais sugerem a possibilidade de avaliar o módulo de elasticidade da peça pelo método proposto, com relações entre provetes normalizados e mesoprovetes muito próximo da unidade, o que possibilita a avaliação directa (sem correlação) do módulo de elasticidade médio da peça como sendo igual ao obtido no ensaio dos mesoprovetes. Já para tensões de rotura, a avaliação já não é tão directa, muito por causa do efeito de escala dos diferentes provetes, o que dificulta a correlação entre grandezas.

A utilização dos resultados dos ensaios de mesoprovetes em conjunto com os ensaios não-destrutivos habituais (inspecção visual, ultra-sons, etc.) pode ser um passo importante na melhoria da qualidade da avaliação mecânica de estruturas de madeira, pelo que se

considera este método promissor na avaliação mecânica de estruturas de madeira existentes.

4- AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, através da bolsa de doutoramento com a referência SFRH/BD/27353/2006 e do projecto “Avaliação da segurança de estruturas de madeira por meio de métodos não destrutivos e análise estocástica” (FCT PTDC/ECM/66527/2006).

5- REFERÊNCIAS

- EN 408. 2003. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. CEN.
- EN ISO 527-2 .1996. Plastics - Determination of tensile properties: Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. CEN.
- Kasal, B. 2003. Semi-destructive method for in-situ evaluation of compressive strength of wood structural members. Forest Products Journal 53, n.º 11/12.
- Kasal, B., Anthony, R. 2004. Advances in in situ evaluation of timber structures. Progress in Structural Engineering and Materials 27, n.º 6-2 94-103.
- NBr 7190. 1997 Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, Brasil. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- UNI 11119. 2004. Load-bearing structures - On site inspections for the diagnosis of timber members. Ente Nazionale Italiano di Unificazione.

6- LISTA DE SÍMBOLOS

$E_{t,0}$	Módulo de elasticidade em tracção paralela ao fio
$f_{t,0}$	Tensão de rotura à tracção paralela ao fio
μ	Valor médio
CV	Coefficiente de variação
n	Número de provetes ensaiados
x_k	Valor característico inferior (quantil 5%)
r^2	Coefficiente de correlação
<i>Meso</i>	Referente ao ensaio em mesoprovetes
<i>Norm</i>	Referente ao ensaio normalizado