

AValiação EXPERIMENTAL DE ELEMENTOS DE PEQUENAS DIMENSÕES DE MADEIRA DE CÂMBALA



C.J.P. CUNHA
Prof. Auxiliar
Univ. Jean Piaget de Angola
Luanda; Angola
cunhacjp@gmail.com



J.M. BRANCO
Prof. Auxiliar
ISISE, UMinho
Guimarães; Portugal
jbranco@civil.uminho.pt



L.C. NEVES
Prof. Auxiliar
Uni. of Nottingham
Nottingham; UK
luis.neves@nottingham.ac.uk

RESUMO

O presente artigo baseia-se na caracterizar das propriedades fundamentais de um lote de madeira de Câmbara proveniente do Congo. Pretende-se determinar a sua massa volúmica, módulo de elasticidade e tensão de rotura à flexão. Para esse efeito, foram ensaiados 433 provetes de pequenas dimensões à flexão segundo o procedimento preconizado na norma ISO 3133[1], e quantificadas as suas massas volúmicas seguindo as prescrições da norma ISO 3131[2]. Dos resultados experimentais obtidos, constatou-se que os mesmos se situam nos intervalos previstos na bibliografia existente.

1. INTRODUÇÃO

Resultado da gestão sustentável das florestas tropicais, cada vez mais vão surgindo no mercado europeu espécies destas zonas, mesmo que ainda em pequenas quantidades [3] [4]. A dispersão natural das propriedades mecânicas da madeira serrada deve ser reduzida por meio da sua classificação, quer seja visual quer mecânica. Dependendo do procedimento de classificação, a dispersão dos resultados das propriedades vai variar [5]. A EN 384[6] prevê um método alternativo para a determinação dos valores característicos das propriedades mecânicas de provetes de dimensão estrutural tendo por base a correlação com resultados de ensaios em provetes de pequenas dimensões, ditos, isentos de defeitos [7].

Este trabalho procura demonstrar a fiabilidade de um procedimento relativamente simples e expedito de determinação das propriedades mecânicas de um lote de madeira de Câmbara proveniente do Congo, através da realização de ensaios de provetes de pequenas dimensões, isentos de defeitos. Atualmente, a norma EN 1912[8], através da classificação visual prevista na norma BS 5756[9], classifica a madeira de Câmbara em Classe de Resistência D40. No entanto, esta atribuição não delimita a origem da madeira, ficando subentendida que a atribuição da Classe será independente da origem da madeira, abrangendo toda a África intertropical.

2. METODOLOGIA

Com o objetivo de caracterizar mecanicamente um lote de amostra de Câmbala para efeitos de aplicação em elementos estruturais, procurou-se ir ao encontro das propriedades mecânicas necessárias para a utilização do EC 5[10]. Consequentemente, houve necessidade de se caracterizar a espécie para a definição das suas classes de resistência de acordo com a EN 338[11]. No presente trabalho, foram determinadas as propriedades de referência – massa volúmica (ρ), módulo de elasticidade em flexão (E_m) e tensão de rotura à flexão (f_m) - a partir das quais, e com base na EN 384[6], é possível definir as restantes propriedades mecânicas necessárias ao projeto de estruturas.

As propriedades de referência foram obtidas a partir da pesagem e determinação do teor em água dos provetes, e da realização de ensaios à flexão estática em 3 pontos. No total foram ensaiados 433 provetes. A preparação e seleção dos provetes para o ensaio à flexão seguiu o preconizado na ISO 3133[1]. A campanha de ensaios foi realizada com provetes de secção transversal de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ e comprimento de 34 cm. Na Tabela 1 resume-se a campanha experimental realizada, especificando as normas usadas em cada um dos procedimentos de ensaio adotado.

Tabela 1: Campanha experimental realizada.

Procedimentos	Normas
Massa volúmica	ISO 3131[2]
Ensaio de Flexão em 3 pontos	ISO 3133[1]
Teor em água	ISO 3130[12]

Previamente à realização dos ensaios, os provetes foram acondicionados numa câmara climática, que de acordo com a ISO 3129[13], foi regulada para uma temperatura de 20°C e humidade relativa do ar de 65%, de modo a que os provetes atingissem o seu ponto de equilíbrio de teor em água próximo dos 12%.

Após o processo de recolha e acondicionamento, aguardou-se que os provetes estabilizassem o seu teor em água. Para esse efeito, foi considerado que em pesagens sucessivas com um espaçamento mínimo de 6 horas a diferença entre as massas dos provetes deveria ser inferior a 0,5%. Seguiram-se os ensaios à flexão estática em 3 pontos até à rotura. No final foi cortada uma amostra de cada provete, o mais próxima possível da zona de rotura, pesada e colocada numa estufa até secar completamente. Deste modo foi possível calcular o seu teor em água aquando da realização dos ensaios.

2.1 Determinação do teor em água (w) e da massa volúmica (ρ)

Após a estabilização dos provetes no interior da câmara climática, foram confirmados os valores finais da sua geometria e da sua massa para cálculo da massa volúmica. Após a execução do ensaio à flexão de cada provete, foi cortada uma amostra de 2,5 cm de comprimento, próxima da zona de rotura, para que esta fosse pesada e colocada numa estufa à temperatura de 103°C , de acordo com o definido na ISO 3130[12]. Neste processo de secagem, eram realizadas sucessivas pesagens espaçadas com o mínimo de 6 horas, até se atingir uma diferença inferior a 0,5% de massa, entre pesagens consecutivas. Antes de cada pesagem, as amostras eram colocadas num exsiccador com sílica para arrefecerem sem permuta do teor em água com o ambiente. Após o arrefecimento, eram pesadas de imediato, para evitar alterações da humidade na peça em mais de 0,1%. De referir que a precisão das pesagens foi superior a 0,5% da massa da amostra, tal como imposto pela ISO 3130[12]. De acordo com a ISO 3130[12], o teor em água foi calculado a partir da seguinte expressão:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} * 100 \quad (1)$$

em que w representa o teor em água do provete, m_1 é a massa do provete antes da secagem e m_2 é a massa do provete depois de seco.

Com o objetivo de se apresentarem os valores finais da massa volúmica, tensão de rotura e módulo de elasticidade para o teor em água de 12%, procedeu-se às suas correções. Para tal, foram seguidos e comparados os procedimentos preconizados pelas normas EN 384[6] e ISO 3131[2].

Com o valor das pesagens dos provetes inteiros ($2 \times 2 \times 34 \text{ cm}^3$) e do teor em água, foi quantificada a massa volúmica de cada provete a partir da expressão 2.

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad (2)$$

em que ρ_w representa a massa volúmica da madeira com o teor em água w , m_w é a massa da madeira com o teor em água w , e a_w , b_w e l_w são as dimensões do provete com o teor em água w .

Para a correção dos valores do teor em água segundo a norma ISO 3131[2], foi utilizada a expressão 3, sendo que esta apenas pode ser efetuada nos provetes cujo teor em água esteja compreendido entre os 7 e 17%.

$$\rho_{12} = \rho_w \left[1 - \frac{(1-k)(w-12)}{100} \right] \quad (3)$$

em que ρ_{12} representa a massa volúmica da madeira com teor em água de 12%, ρ_w é a massa volúmica da madeira com o teor em água w , k é o coeficiente de volumetria e, w é o teor em água no momento do ensaio.

Por outro lado, a EN 384[6] sugere para a correção do teor em água, uma redução de 0,5% do valor da pesagem do provete para teores em água acima dos 12%, sendo que abaixo dos 12%, esta correção deva implicar um aumento 0,5% da leitura do seu peso por cada percentagem.

Neste trabalho adotaram-se os dois métodos para a correção do teor em água para comparação.

2.2 Ensaio à flexão estática em 3 pontos

Os ensaios à flexão foram realizados segundo o modelo de três pontos, adoptando-se um afastamento entre os eixos dos apoios de 32 cm. Os procedimentos foram de acordo com o preconizado na ISO 3133[1].

De acordo com a ISO 3133[1], o valor da força máxima deve ser atingido em 90 segundos com uma tolerância de ± 30 segundos, cronometrados desde o princípio do carregamento. Dado o elevado número de provetes e a variabilidade de massas entre eles, seria expectável uma grande amplitude entre os valores das cargas de rotura, provocando constantes alterações da velocidade de ação da carga entre os ensaios. Por este motivo, considerou-se adequada a divisão da população total em amostras limitadas pela sua massa. Baseando-se nas pesagens que precederam os ensaios à flexão, consideraram-se 4 grupos de provetes. O primeiro grupo destinou-se aos provetes com menos de 85 g (67 provetes), o segundo, aos provetes compreendidos entre as 85 g e as 100 g (99 provetes), o terceiro, entre as 100 g e as 115 g (208 provetes), e por fim o quarto grupo para todos os provetes com mais de 115 g (59 provetes).

Partindo do valor da força a máxima registada no ensaio calculou-se a tensão interna através da expressão 4.

$$f_{mw} = \frac{3P_{max}l}{2bh^2} \quad (4)$$

em que f_{mw} representa a tensão última à flexão para o teor em água w do provete, P_{max} é a força de rotura, l é a distância entre os apoios, b é a largura da secção do provete e h a altura da secção transversal do provete.

Para a correção dos valores da tensão de rotura para o teor em água de referência (12%), utilizou-se a expressão 5 prevista na ISO 3133[1].

$$\sigma_{b12} = \sigma_{bw} [1 + \alpha(w - 12)] \quad (5)$$

em que σ_{b12} representa a tensão última à flexão para o teor em água do provete de 12%, α é o factor corretivo do teor em água e w é o teor em água da madeira aquando da realização do ensaio determinado de acordo com a ISO 3130[12].

Na correção do valor da tensão de rotura, para além do procedimento da ISO 3133[1], adotou-se o método da EN 348[6], que sugere que não se proceda a qualquer correção para valores de teor em água superior a 8%, não assumindo qualquer indicação de correção para os provetes ensaiados abaixo dessa percentagem.

Para cada provete definiu-se graficamente a relação força-deformação a meio-vão determinando-se a regressão linear do tramo compreendido entre 10 a 40% do valor da carga de rotura. Calculou-se o coeficiente de correlação correspondente ao tramo, sendo que este, como previsto na norma EN 408[14], deveria ser superior a 0,99 para se determinar o valor do módulo de elasticidade a partir da expressão 6 que se apresenta em seguida.

$$E = \frac{l^3(P_2 - P_1)}{48l(w_2 - w_1)} \quad (6)$$

em que l representa o vão entre apoios, P_1 corresponde a 10% da força máxima, P_2 corresponde a 40% da força máxima, w_1 é a deformação a meio-vão provocado por P_1 e w_2 é a deformação a meio-vão provocada por P_2 .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Massa volúmica (ρ)

Na sequência dos procedimentos descritos na secção 2.1, apresenta-se a Tabela 2 com os resultados da massa volúmica (ρ) antes da correção do teor em água (w) e após correção para o teor em água de 12%, segundo os procedimentos preconizados nas normas ISO 3131[2] e EN 384[6] (ρ_{12}).

Tabela 2: Valores da massa volúmica dos provetes na Câmara Climática e corrigidos segundo as normas ISO 3131[2] e EN 384[6].

Espécie (total da amostra)	Resultados da amostra	Câmara Climática ρ (kg/m ³)	Valor do teor em água dos provetes w (%)	ISO 3131[2] 7%<W<17% ρ_{12} (kg/m ³)	EN 384[6] (sem limites) ρ_{12} (kg/m ³)
Câmbala (433 provetes)	Média	747,38	13,1%	749,31	743,45
	C.V. (%)	11,9%	18,5%	11,7%	12,1%
	Mínimo	528,90	8,1%	528,33	528,38
	Máximo	948,53	22,6	950,16	952,75
	Provetes excluídos	—	—	27	0

Constata-se que a correção do teor em água através do preconizado pela ISO 3131[2], obriga a eliminar 27 resultados. No entanto, o resultado final acaba por não se diferenciar da metodologia preconizada pela EN 384[6], havendo uma diferença entre as médias das massas volúmicas de 0,79%.

3.2 Determinação da Tensão de Rotura em Flexão (f_m)

A tensão de rotura em flexão foi aferida através da realização do ensaio à flexão em 3 pontos utilizando o procedimento de ensaio descrito na secção 2.2.

Na Tabela 3, são apresentados os resultados da tensão de rotura (f_m) antes da correção do teor em água (w) e após correção para o teor em água de 12%, segundo os procedimentos preconizados nas normas ISO 3133[1] e EN 384[6] (f_{m12}).

Tabela 3: Valores da tensão em flexão atingida nos provetes e corrigidos segundo as normas ISO 3131[1] e EN 384[6]

Espécie (total da amostra)	Resultados da amostra	f_m (MPa) com o teor em água w (%)	Teor em água w (%)	ISO 3133[1] (sem limites) f_{m12} (MPa)	EN 384[6] (8%<W) f_{m12} (MPa)
Câmbala (433 provetes)	Média	105,89	13,1%	106,94	105,22
	C.V. (%)	31,4%	18,5%	31,2%	31,5%
	Mínimo	16,62	8,1%	17,09	16,62
	Máximo	171,78	22,6%	130,41	171,78
	Provetes excluídos	—	—	0	10

Relativamente às correções efectuadas para o teor em água de 12%, a EN 384[6] impõe que esta só se possa realizar em provetes cujo teor em água, aquando da realização do ensaio, não seja inferior a 8%. Este critério obriga a abdicar de 10 resultados de ensaio. Quanto aos resultados finais apresentados por cada procedimento de correção, é possível constatar que a diferença é pouco significativa, situando-se em 1,64%.

3.3 Determinação do Módulo de Elasticidade em Flexão (E_m)

Os ensaios a partir dos quais se obtiveram os valores dos módulos de elasticidade seguiram o procedimento descrito na secção 2.2.

Relativamente às correções para o teor em água de 12% dos provetes, refira-se que esta é prevista pela norma EN 384[6] apenas para as situações de ensaio cujo teor em água do provete seja superior a 8%. A norma prevê que para o intervalo de 8 a 18% do teor em água, o E_m deve variar na ordem de 1% por cada valor de percentagem a ser corrigido. Se o valor do teor em água for superior a 12%, a correção far-se-á aumentando o E_m , caso contrário, a correção far-se-á reduzindo o E_m . Para provetes com teor em água superior a 18% a correção deve ser feita considerando o teor em água do provete aquando da realização do ensaio equivalente a 18%.

Na Tabela 4, apresentam-se os resultados finais das amostras relativas ao módulo de elasticidade à flexão (E_m) antes da correção do teor em água (w) para 12%, e após a correção do teor em água (E_{m12}), segundo a norma EN 384[6].

Tabela 4: Valores do E_m dos provetes, sem e com correção do teor em água w

Espécie (total da amostra)	Resultados da amostra	E_m (GPa) com o teor em água $w\%$	Valor do teor em água dos provetes ($w\%$)	EN 384[6] (8%<W) E_{m12} (GPa)
Câmbala (433 provetes)	Média	9,87	13,1%	9,95
	C.V. (%)	18,5%	18,5%	18,5%
	Mínimo	3,70	8,1%	3,80
	Máximo	13,67	22,6%	13,86
	Provetes excluídos	—	—	10

A Tabela 5 apresenta o resumo dos valores finais obtidos para a densidade (ρ_{12}), a tensão de rotura à flexão (f_{m12}) e do módulo de elasticidade à flexão (E_{m12}), adotando o método de correção destes valores para o teor em água de referência sugerido pela EN 384[6].

Tabela 5: Valores finais das propriedades da amostra de Câmbala, após correção para o teor em água de 12% de acordo com a EN 384:2010.

Espécie (total da amostra)	Resultados da amostra	ρ_{12} (kg/m ³)	f_{m12} (MPa)	E_{m12} (GPa)
Câmbala (433 provetes)	Média	743,45	105,22	9,99
	C.V. (%)	12%	32%	18%
	Mínimo	528,38	16,62	5,01
	Máximo	952,75	171,78	13,86
	Excluídos	0	10	10

O presente estudo relativamente à massa volúmica, apresenta resultados bastante próximos de Amoah [15] (752 kg/m³) e Wu [16] (786 kg/m³), e com alguma diferença de Tsoumis [17] (620 kg/m³, cerca de 20%). Quanto ao E_m , o valor do presente estudo aproxima-se bastante do intervalo do estudo de Cheng [18] (entre 9,3 e 9,4 GPa), ficando um pouco abaixo dos valores de Tsoumis [17] (11,27 GPa), Amoah [15] (13,2 GPa), mas principalmente de Wu [16] (16,1 GPa). Por fim, a f_m do presente estudo fica substancialmente acima do estudo de Amoah [15] (64 MPa), aproximando-se bastante do valor atingido por Tsoumis [17] (111 MPa).

4. CONCLUSÕES

No presente estudo, a amostra de Câmbala analisada apresenta uma massa volúmica equivalente à de uma madeira de classe D40. Ao se observar o valor correspondente à média do módulo de elasticidade à flexão, arredondado às unidades, constata-se um menor rendimento da amostra, podendo ser enquadrada nas classes D30 ou D35, ficando aquém da classe D40 atribuída à Câmbala pela norma EN 1912[8]. Relativamente à tensão de rotura, referir novamente que se encontra no intervalo de valores obtidos em estudos semelhantes, referidos na secção anterior.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ISO 3133 (1975). Wood – Determination of ultimate strength in static bending. International Organization for Standardization. Genebra. Suíça
- [2] ISO 3131 (1975). Wood – Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Genebra. Suíça
- [3] Kuilen J.W.G. van de, Gard W.F., Ravenshorst G.J.P. (2013). The importance of characterisation and sampling of tropical wood species with regard to strength and durability classification. *Heron*, 58(2/3), 201-228.
- [4] Kuilen J.W.G. van de, Ravensshorts G.J.P., Brunetti M., Crivellaro A. (2007). Species independent strength grading of hardwoods. Canada, ISCHP'07 pp. 165-170.
- [5] Stapel P., Kuilen J.W., (2013). Effects of grading procedures on the scatter of characteristic values of European grown sawn timber. *Material and Structures*: Volume 46, Issue 9, 1587-1598.
- [6] EN 384 (2010). Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization. Bruxelas
- [7] Lanvin JD, Reuling D, Rouger F, Kuilen JW, Ravenshorst G, Reinbol G, Bourguignon H, Gerar J, Guibal D, Verna M & Boilley E. (2009). Simplified strength properties assessment for tropical hardwoods in view to CE marking. Proceedings of the Second International Scientific Conf. on Hardwood Processing. 28-29 Sept., Paris.
- [8] EN 1912 (2004). Structural timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- [9] BS 5756(2007). Visual grading of hardwood – Specification. British Standards. London
- [10] EN 1995-1-1:2004, Eurocode 5: design of timber structures. Part 1-1: General common rules and rules for buildings, CEN European Committee for Standardization, Brussels..
- [11] EN 338:1995 (1995). Structural timber – Strength classes. European Committee for Standardization. Bruxelas.
- [12] ISO 3130 (1975). Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Genebra. Suíça.
- [13] ISO 3129 (1975). Wood – Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Genebra. Suíça
- [14] EN 408:2003 (2003). Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. CEN. Bruxelas.
- [15] M. Amoah, J. Appiah-Yeboahand, R. Okai (2012). Characterization of Physical and Mechanical Properties of Branch, Stem and Root Wood of Iroko and Emire Tropical Trees. *Research Journal of Applied Science*, Vol. 4 No.12, 2012. pp. 1755- 1761.
- [16] Wu Y., S. Wang, C. Zhou Xing and Y. Zhang, 2009. Use of nanoindentation and silviscan to determine the mechanical properties of 10 hardwood species. *Wood Fiber Sci.*, 41(1): 64-73.
- [17] Tsoumis G. (1991). Science and Technology of Wood. Van Nostrand Reinhold, N.Y.
- [18] Cheng, J., J. Yang and P. Liu, (1992). Wood Science Records. China Forestry Publishing Company, Beijing.