Avaliação do ajustamento de distribuições de probabilidade ao comportamento à flexão de Pinho bravo

Luis M.C. Simões
Professor Catedrático, Dep Eng Civil
Universidade de Coimbra, Portugal
lcsimoes@dec.uc.pt

J.Saporiti Machado
Investigador Auxiliar, Dep de Estruturas,
LNEC, Portugal
saporiti@lnec.pt

Helena Cruz
Investigadora Principal, Dep. De Estruturas
LNEC, Portugal
helenacruz@lnec.pt

J.H.Negrão
Professor Associado, Dep Eng Civi l
Universidade de Coimbra, Portugal
jhnehrao@dec.uc.pt

Palavras-chave – ensaios, caracteristicas mecânicas, distribuições estatísticas

Keywords – tests, mechanical properties, statistical distributions

RESUMO

Este trabalho visa analisar o efeito nos valores característicos de resistência mecânica do Pinho bravo nacional (*Pinus pinaster* Ait.), resultante do ajustamento de diferentes distribuições de probabilidade. No estudo foram utilizados resultados de ensaios conduzidos em 1990 no âmbito de um projecto europeu. As propriedades analisadas foram a resistência e o módulo de elasticidade à flexão e a massa volúmica. O estudo considerou as classes de qualidade englobadas na norma portuguesa NP 4305 - Classificação Visual de Madeira de Pinho Bravo para Estruturas (IPQ 1995). No que se refere às distribuições de probabilidade foram estudadas as distribuições estatísticas normais, lognormal e Weibull bi-paramétrica.

ABSTRACT

Data from mechanical tests of Portuguese maritime pine timber, which was gathered in 1990 was analysed for mechanical properties such as bending strength, modulus of elasticity and density. Visual grades were determined using the Portuguese visual grading standard NP4305 (IPQ 1995) and were analysed for their strength profiles. Normal, lognormal and Weibull distributions were determined and compared to the dataset.

1. Introdução

No âmbito de um projecto europeu com o objectivo de comparar a qualidade, tendo em vista a utilização para fins estruturais, da madeira de Pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.) produzida em Espanha, França e Portugal, foram efectuados em 1990 ensaios mecânicos e físicos sobre amostras representativas de provetes de madeira de Pinho bravo nacional, com as dimensões indicadas na Tabela 1.

Amostra	Número de provetes ensaiados	Dimensões		
		Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)
1	291	40	100	2000
2	310	50	150	3000

Tabela 1 - Características das amostras de Pinho bravo ensaiadas

Os estudos realizados no LNEC tiveram em consideração a via definida pela normalização europeia para a implementação de normas de classificação de madeira para fins estruturais (à data inexistente em Portugal) e para a obtenção dos correspondentes valores característicos das propriedades mecânica relevantes para o dimensionamento de estruturas. Assim, foi inicialmente obtido um conjunto de propriedades ditas “fundamentais” (tensão de rotura e módulo de elasticidade à flexão e massa volúmica), sendo as restantes obtidas a partir destas pela aplicação de equações descritas na EN 384 (CEN 2004a).

Os ensaios mecânicos seguiram as recomendações expressas na norma EN 408 (CEN 2003b). O tratamento dos dados seguiu as recomendações expressas na EN 384, de forma a determinar os valores característicos das propriedades mecânicas e da massa volúmica.

O trabalho então realizado levou à publicação em 2005 da norma portuguesa NP 4305 relativa à classificação visual de madeira de Pinho bravo para fins estruturais, sendo definidas duas classes de qualidade: EE – Especial Estruturas; E – Estruturas.

As classes de resistência correspondentes, em termos da grelha definida na EN338, (EE – C30 e E – C18) foram definidas, a partir dos valores característicos de resistência obtidos, de acordo com a norma europeia EN 384.

Ainda na sequência desse trabalho, a norma EN1912 (CEN 2004b) viria entretanto a incluir a classe de qualidade E como integrada na classe de resistência C18 segundo a EN338 (CEN 2003a).

2. Classificação visual

A norma portuguesa NP 4305 considera como anteriormente referido duas classes de qualidade (EE e E). Na presente comunicação será ainda considerada uma terceira classe (R) correspondente aos provetes que não cumprem os requisitos definidos para a classe de qualidade inferior (E). A tabela 2 apresenta a distribuição dos provetes pelas diferentes classes e dentro de cada amostra.

Amostra	Largura (mm)	Altura (mm)		EE	E	R	Total
1	40	100	n	67	177	47	291
			%	23	61	16	100
2	50	150	n	48	214	48	310
			%	15	70	15	100

Tabela 2 - Número de provetes classificados nas diversas classes consideradas

3. Valores médios e característicos associados à classificação visual

Os resultados obtidos para as duas amostras foram analisados conjuntamente através da aplicação dos factores k_h e k_l descritos na EN 384. O efeito das diferentes alturas dos provetes (100 e 150 mm) foi analisado. Os resultados obtidos confirmaram a equação proposta pela EN 384, Eq. 1, sendo o ajustamento de uma expressão potência que se adequa aos dados registados a indicada na Eq. 2:

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0.2} \quad (1)$$

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0.2142} \quad (2)$$

A Tabela 3 indica a média e o desvio padrão da massa volúmica, módulo de elasticidade e tensão de rotura à flexão, considerada a totalidade dos provetes ensaiados (601).

Propriedade	Massa volúmica (kg/m^3)	Módulo de Elasticidade N/mm^2)	Tensão de Rotura (N/mm^2)
Média	587	12048	52,0
Desvio Padrão	75	3606	22,2

Tabela 3 - Propriedades mecânicas e físicas do Pinho bravo (todos os ensaios)

A Tabela 4 apresenta os valores que correspondem às classes de qualidade EE e E da EN 4305, e ainda à classe R.

			Massa volúmica kg/m^3		Módulo de Elasticidade N/mm^2		Tensão de Rotura N/mm^2	
Classe	n	%	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
EE	115	19	619	72	13857	3485	72,0	16,3
E	391	65	589	74	12157	3362	52,0	20,1
R	95	16	537	53	9411	3209	29,4	12,9

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do Pinho bravo (para as diversas classes de qualidade)

Os valores característicos da massa volúmica para as classes de qualidade EE e E são 490 e 460 kg/m^3, respectivamente. Os valores médios correspondentes são cerca de 25% mais elevados. Os valores característicos para o módulo de elasticidade das classes EE e E são 9,3 e 8 kN/mm^2, sendo os valores médios cerca de 50% mais elevados. Os valores característicos da tensão de rotura das classes EE e E são 35 e 18 N/mm^2, respectivamente.

Na Tabela 5 estão indicados os coeficientes de correlação entre os diferentes parâmetros considerados.

Propriedade	Massa volúmica	Módulo de Elasticidade	Tensão de Rotura
Massa volúmica	1,0		
Módulo de Elasticidade	0,56	1,0	
Tensão de Rotura	0,59	0,62	1,0

Tabela 5 - Coeficientes de correlação

4. Distribuições de Probabilidade e Valores Característicos

Foram analisadas diversas distribuições, ajustando os dados às três classes (entrando com o efeito da altura da secção transversal) e agregando todos os dados. Verificou-se sempre que as distribuições de Weibull e normal conduzem a resultados mais próximos da distribuição não paramétrica (resultados experimentais) do que a distribuição lognormal. A Tabela 6 contém os parâmetros destas distribuições. As Figuras 1 e 2 permitem comparar os resultados obtidos nos ensaios com os valores determinados a partir das distribuições estatísticas. Na Fig. 3 estão representadas as frequências cumulativas para as três classes.

	Normal		Lognormal		Weibull bi-paramétrica	
Amostra	m	s	m	s	m	v
Global	52,0	22,2	3,85	0,49	58,6	2,51
Classe EE	72,0	16,3	4,25	0,24	78,4	5,05
Classe E	52,0	20,1	3,86	0,42	58,4	2,81
Rejeitadas	29,4	12,9	3,28	0,46	33,2	2,43

Tabela 6 - Parâmetros para as distribuições probabilidades ajustadas ao Pinho bravo

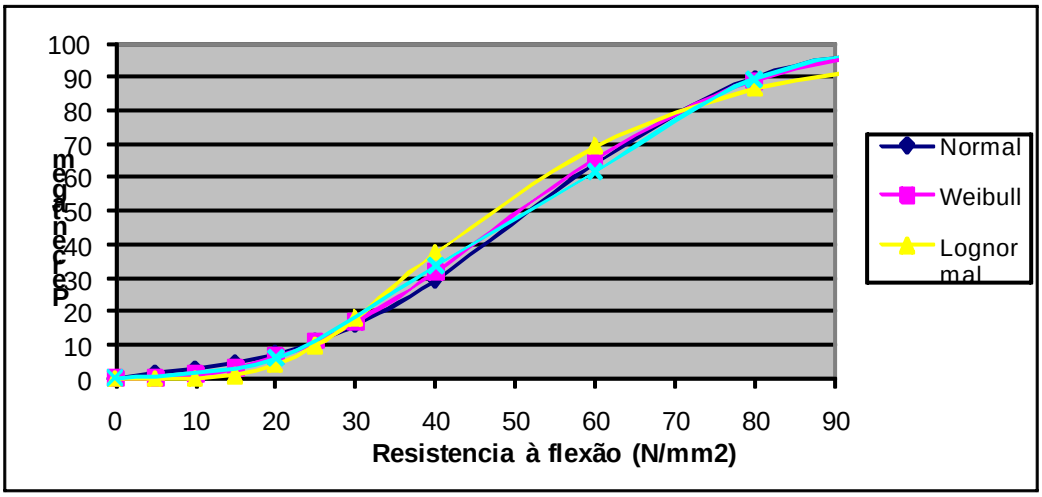

Figura 1 – Distribuições da Resistência à Flexão do Pinho bravo

Da Fig. 2 conclui-se que, para o quantilho inferior de 5%, as distribuições normal e lognormal conduzem a valores de resistência à flexão superior e inferior, respectivamente, ao obtido no ensaio de flexão estática segundo a EN 408, embora essas diferenças sejam pouco significativas.

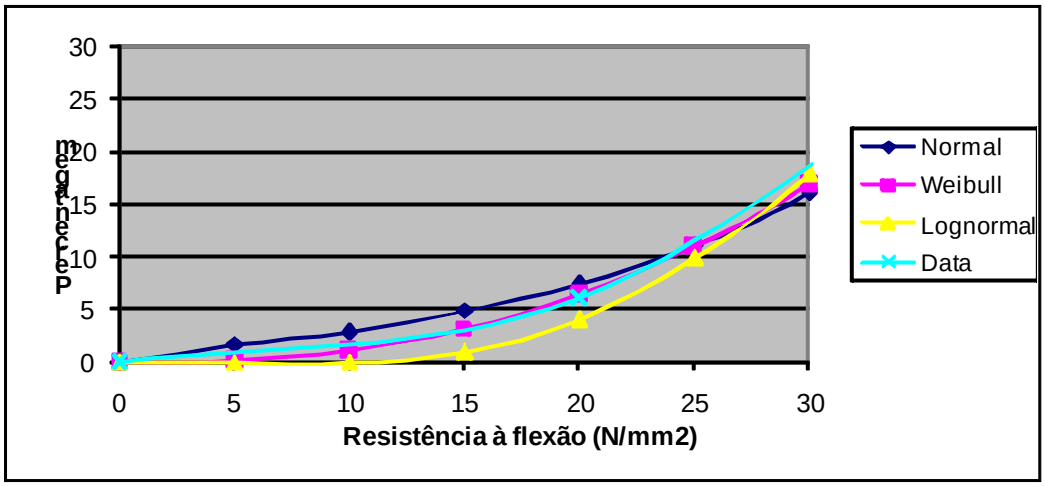

Figura 2 – Quantilho Inferior da Resistência à Flexão do Pinho bravo

Os valores de ensaio apresentam-se nas diversas figuras de acordo com uma distribuição não-paramétrica (valores ordenados em função da resistência), de acordo com o indicado na EN 384 para o cálculo do valor característico. Conclui-se que a distribuição de Weibull bi-paramétrica é aquela que fornece um valor do quantilho de 5% mais próximo do observado na distribuição não-paramétrica dos provetes ensaiados.

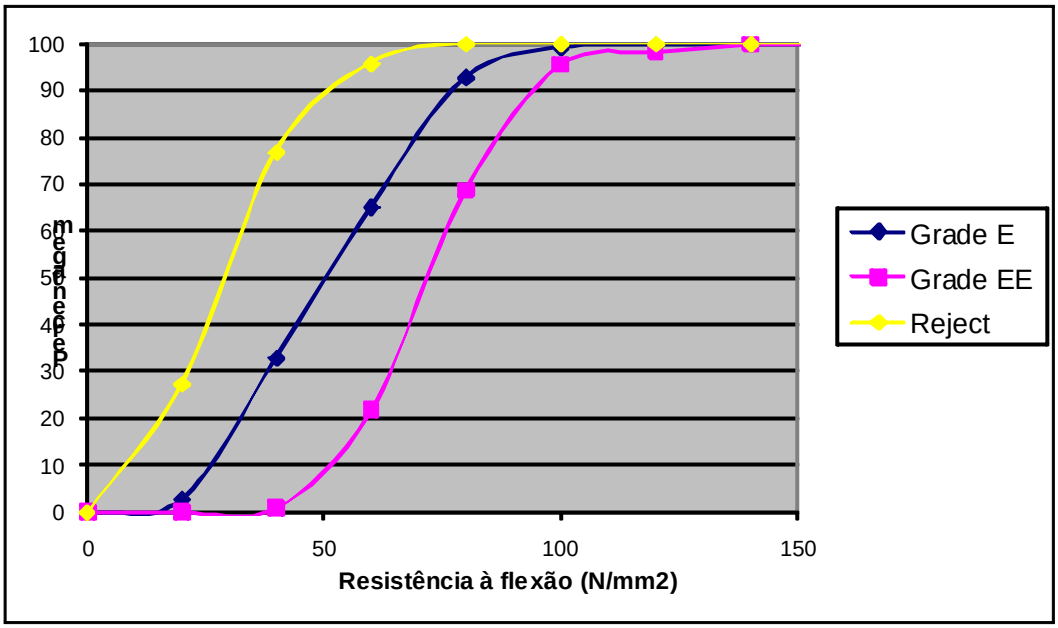

Figura 3 – Distribuição cumulativa de frequências para as classes EE, E e R

5. Conclusões

A modelação probabilística do comportamento de estruturas de madeira, de acordo com o documento elaborado pelo Joint Committee for Structural Safety (JCSS 2006), assenta no que diz respeito à modelação das propriedades do material, no ajustamento de diferentes distribuições de probabilidade tanto às propriedades "fundamentais" como às restantes propriedades mecânicas da madeira. A presente comunicação pretende fornecer dados que possam contribuir para a análise da aplicação desse documento ao Pinho bravo.

Assim, no presente estudo foi efectuada uma análise da aplicação de três distribuições de probabilidade (normal, lognormal e Weibull bi-paramétrica) a uma amostra de provetes de dimensão estrutural de Pinho bravo. Os resultados obtidos permitem verificar que a aplicação da distribuição lognormal à resistência à flexão, distribuição aconselhada para esta propriedade no documento em vigor do JCSS, resulta numa sobre-estimação do valor característico. A distribuição de Weibull bi-paramétrica é aquela que apresenta uma distribuição mais ajustada aos valores determinados experimentalmente na cauda inferior da distribuição de probabilidade.

Referências Bibliográficas

Ang AHS, Tang,WH (1975)."Probability Concepts in Engineering Planning and Design - Vol I", J.Wiley.

Ang AHS, Tang,WH (1984)."Probability Concepts in Engineering Planning and Design - Vol II", J.Wiley.

Machado, J. S. (1995)."Visual strength grading - Application to Maritime pine timber", Silva Lusitana. 3:2, pp.163-171.

Cruz, H.; Nunes, L ; Machado, J. S. (1998)."Update assessment of portuguese maritime pine timber", Forest Products Journal. 48:1 pp.60-64.

Cruz, H.; Machado, J. S. (1990).”Características mecânicas da madeira de pinho bravo (Pinus pinaster Ait.) obtidas com peças de dimensão estrutural. Comparação entre diferentes normas de classificação visual”, Lisboa: LNEC, CEC R&D project, Individual final report.
Cruz, H.; Machado, J. S. (1992).”Madeira de Pinheiro bravo - determinação dos valores característicos da tensão resistente à flexão. Estudo da influência de diversos parâmetros”, Lisboa: LNEC, Relatório 39/92 – NM.
JCSS (2006) Probabilistic model code. Part 3: Resistance model, 3.5. Properties of timber. http://jcss.ethz.ch/publications/PMC/RESISTANCES/timber.pdf
CEN (2003a).”EN 338: Structural timber. Strength classes”, Bruxelas, Bélgica
CEN (2003b).”EN 408 - Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties”, Bruxelas, Bélgica
CEN (2004a).”EN 384 - Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density”, Bruxelas, Bélgica
CEN (2004b).”EN 1912 - Structural timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species”, Bruxelas, Bélgica
IPQ (1995).”NP 4305 - Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas”