

Características mecânicas e classificação da madeira de secção circular de Pinheiro Bravo

Telmo F. M. Morgado

MSc, Investigador Assistente, Dep. Eng. Civil
Universidade de Coimbra, Coimbra
telmo.morgado@mail.com



José Saporiti Machado

PhD, Investigador Auxiliar, Dep. de Estruturas
LNEC, Lisboa
saporiti@lnec.pt



Alfredo M.P. G. Dias

PhD, Professor Auxiliar, Dep. Eng. Civil
Universidade de Coimbra, Coimbra
alfgdias@dec.uc.pt



Helena Cruz

PhD, Investigadora Principal, Dep. de Estruturas
LNEC, Lisboa
helenacruz@lnec.pt



João N. A. Rodrigues

MSc, Investigador Assistente, Dep. Eng. Civil
Universidade de Coimbra, Coimbra
joao.nar@hotmail.com



Palavras-chave – Madeira, secção circular, Pinheiro bravo, características mecânicas,

Keywords – Wood, round section, Maritime pine, mechanical properties

RESUMO

Este artigo apresenta o trabalho realizado com o objectivo de caracterizar o comportamento mecânico e desenvolver métodos de classificação visual e mecânica para a madeira de secção circular de Pinheiro bravo. Duas amostras, uma de 200 toros e uma outra de 59, foram obtidas numa zona do interior centro de Portugal. Após secagem, os toros foram analisados visualmente, sujeitos a ensaios não destrutivos para determinação do módulo de elasticidade dinâmico e, finalmente, sujeitos a ensaios destrutivos para a determinação da resistência à compressão e flexão, e módulo de elasticidade, segundo a norma EN 14251. Com base nos resultados obtidos, foram analisadas as características visuais mais adequadas para uso no processo de classificação visual. Como resultado desta análise foi desenvolvida uma proposta de classificação visual para aplicação à madeira de secção circular de Pinheiro bravo.

ABSTRACT

This paper presents work carried out with the aim of characterizing the mechanical behaviour and developing visual and mechanical strength grading systems for Portuguese Maritime pine roundwood. Two samples, one of 200 Maritime pine logs and another of 59, were collected in an interior central region of Portugal. After drying, the logs were visually graded, subjected to non destructive tests for determination of dynamic modulus of elasticity and, finally, subjected to destructive tests, for determining its bending and compression strength and bending modulus of elasticity, according to EN 14251. Based on results, conclusions were drawn regarding the most appropriate features to be used in the visual strength grading process. From this analysis a proposal was developed to visually grade Portuguese Maritime pine roundwood.

1. Introdução

Sendo um material obtido do processo de crescimento de um ser vivo (árvore), a madeira é afectada por vários factores, quer internos (genética) quer externos (solo, vento), o que explica a elevada variabilidade geralmente associada à sua micro-estrutura. Esta variabilidade reflecte-se, igualmente, numa elevada variabilidade das propriedades mecânicas, também afectada pela presença de diferentes defeitos (nós, fio torcido, etc.), o que penaliza este material quando comparado com outros materiais de construção como o betão ou aço (Machado, 2000).

Uma aplicação estrutural segura da madeira pode ser conseguida se existirem processos de classificação (quer visual quer mecânica) que permitam que cada peça de madeira possa ser alocada a uma classe de resistência, que por sua vez está associada a um conjunto de valores característicos.

A classificação visual ainda é, provavelmente, o método de classificação mais usado nas serrações e fábricas. Este tipo de classificação baseia-se na relação entre as características visuais da madeira e a massa volúmica, a resistência à flexão ou o módulo de elasticidade. Em cada classe de qualidade são estabelecidos limites (por exemplo: máxima taxa de crescimento permitida) que devem ser cumpridos de modo a que a peça de madeira possa ser alocada a essa classe e aos correspondentes valores característicos das propriedades mecânicas. As desvantagens da classificação visual passam pela fraca correlação entre as propriedades mecânicas e as características visuais (coeficientes de correlação de cerca de 0,5 para os nós e de 0,4 para a taxa de crescimento), pela elevada variabilidade registada em cada classe de qualidade (coeficientes de variação geralmente entre 20% e 40%) e pela necessidade de profissionais qualificados (Vries, 1998b).

A classificação mecânica é actualmente baseada na relação entre a rigidez e a resistência, existindo no mercado diferentes equipamentos (em grande parte máquinas de flexão). Comparada com a classificação visual, a classificação mecânica possibilita a medição directa de uma propriedade mecânica da madeira (o módulo de elasticidade), a qual oferece uma correlação com a resistência (coeficiente de correlação geralmente entre 0,6 e 0,8) superior à apresentada pelas características visuais. Este facto explica a baixa variabilidade das classes de qualidade (15% a 20%) quando comparadas com as classes de qualidade obtidas por classificação visual. As desvantagens estão relacionadas com o elevado custo dos equipamentos e com o dispendioso processo de controlo de qualidade. Presentemente, novos equipamentos estão a ser colocados no mercado, baseados em novas tecnologias como os Raios-X e os Ultrasons.

Pretendendo-se estudar a viabilidade da aplicação estrutural da madeira de pequeno diâmetro de Pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Ait.), foi realizado um estudo com o objectivo de desenvolver processos de classificação (visual e mecânica) adequados a este material. Desta forma será possível proporcionar algum rendimento extra aos donos das florestas, de modo a que as operações de limpeza florestal sejam viáveis. Isto irá reduzir a quantidade de desperdício florestal e o risco de incêndio.

Neste artigo, as características da madeira de secção circular de Pinheiro bravo são analisadas e discutidas tendo em conta os resultados obtidos em estudos similares para outras espécies. As

bases para classificação visual e mecânica deste material são igualmente abordadas. Tendo em conta as correlações entre as características visuais e mecânicas, é apresentada uma proposta para um sistema de classificação visual.

2. Material

2.1. Selecção dos toros

Os toros deste estudo foram recolhidos numa pequena área florestal correspondente aos municípios que compõem o “Pinhal Interior Sul” (Figura 1), abrangendo uma área total de 1906 km², dos quais 51% é área florestal. Em cada município foram seleccionados 5 a 8 povoamentos (aproximadamente 0,5 ha), sendo seleccionados cerca de 20 toros em cada um, para um total de 100 toros por município. Os toros foram seleccionados do material removido que não apresentava degradação biológica ou fendas profundas, tendo um comprimento mínimo de 25 vezes o diâmetro. Refira-se que os toros foram apenas descascados, não tendo sofrido qualquer outro tipo de processamento.

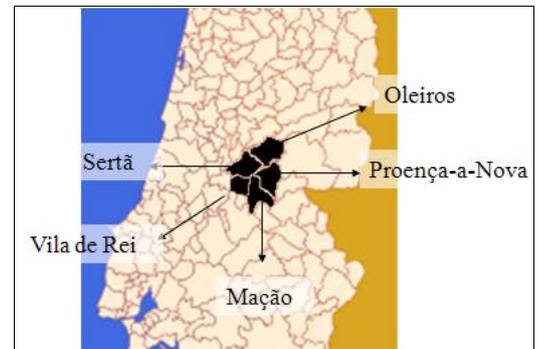


Figura 1 – Concelhos de recolha

2.2. Condicionamento

Os 500 toros seleccionados foram empilhados no exterior (Figura 2), protegidos da exposição directa a raios solares e chuvas. O primeiro andar da pilha encontrava-se 20 cm acima do solo, estando os toros afastados de 5 a 10 cm entre si. O objectivo desta secagem foi obter teores de água nos toros inferiores a 20%. Durante o período de secagem ao ar livre, foi efectuada a monitorização da temperatura e da humidade relativa do ar através de um registador automático (Figura 3). Esta medição teve como objectivo avaliar a influência das condições ambientais envolventes, na evolução do teor de água da madeira.



Figura 2 – Formação da pilha

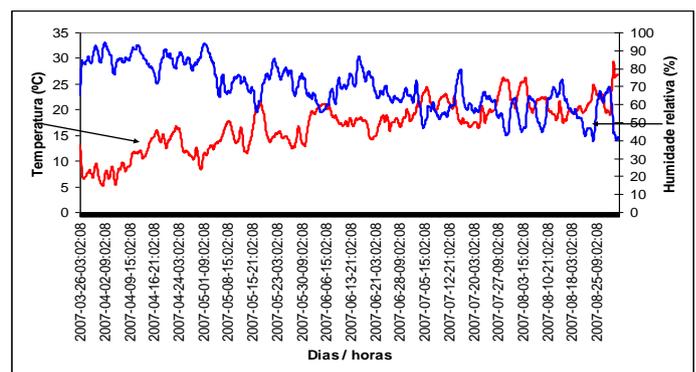


Figura 3 – Evolução da temperatura e da humidade relativa do ar

Após ser atingido um teor de água médio inferior a 20% (Figura 4), realizou-se uma nova selecção baseada no diâmetro dos toros, no diâmetro dos nós, no tamanho dos anéis de crescimento, na curvatura do tronco e na

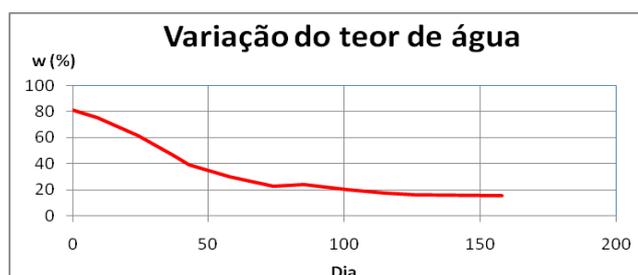


Figura 4 – Evolução do teor de água médio ao longo da secagem ao ar livre

presença de degradação biológica. Desta selecção resultaram duas amostras. Uma amostra de 200 toros, denominada S1, com diâmetros entre os 7cm e os 19cm (81% dos toros possuíam diâmetro inferior a 12cm). Os toros da amostra S1 foram transportados para uma sala climatizada no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Aí, os toros foram sujeitos às condições atmosféricas de referência (humidade relativa de 65% e temperatura de 20°C) durante um período de 5 meses, até atingirem massa constante. A segunda amostra, denominada S2, era constituída por 59 toros com diâmetros entre os 12cm e os 26cm. Devido ao tamanho dos toros, não foi possível colocar os toros desta amostra na sala climatizada.

2.3. Caracterização visual dos toros

No período final da secagem, determinaram-se várias características visuais dos toros, nomeadamente: fio torcido, ovalidade, adelgaçamento, taxa de crescimento, curvatura, fendas e nós. Para os toros da amostra S2 apenas foram medidas as características visuais que tinham apresentado correlação relevante com a resistência e o módulo de elasticidade na amostra S1. A medição das características referidas foi efectuada segundo o preconizado na norma EN 1310 (CEN, 1995). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

O fio torcido foi determinado com base na inclinação das fendas relativamente ao eixo longitudinal do toro. Um número significativo de toros (98%) possuía fio torcido igual ou superior a 16,7cm/m, limite estabelecido para a classe inferior de madeira serrada de Pinheiro bravo (IPQ, 1995).

A ovalidade, em casos severos, pode comprometer o uso dos toros, quer devido à forma quer devido à quantidade de lenho de compressão presente. Esta propriedade foi determinada, apenas nos toros da amostra S1, medindo o diâmetro máximo e mínimo numa secção a, pelo menos, 1m do maior topo. A ovalidade é dada pela diferença entre o diâmetro máximo e mínimo expressa em percentagem do maior diâmetro. Todos os toros apresentaram uma ovalidade inferior a 20%, valor usualmente considerado como o limite para a classe superior de madeira de secção circular (Ranta-Maunus, 1999).

O adelgaçamento foi determinado com base no diâmetro médio (média do diâmetro máximo e mínimo) medido em secções a pelo menos 5cm de cada topo, e na distância entre essas secções. O adelgaçamento corresponde ao rácio entre a diferença dos diâmetros médios e a distância entre os pontos de medição. O limite para aplicação estrutural sugerido por Ranta-Maunus (1999) é de 10 mm/m, tendo esta condição sido cumprida por 86,5% dos toros da amostra S1.

A taxa de crescimento é um parâmetro bastante importante em Resinosas, uma vez que reflecte, de um modo indirecto, a massa volúmica da madeira, a qual tem uma grande influência na resistência e rigidez dos elementos de madeira. A taxa de crescimento foi determinada para cada topo, como sendo o rácio entre o maior diâmetro e o número de anéis, expressa em mm. O limite desta característica para a classe inferior de madeira serrada de Pinheiro bravo é de 10mm (IPQ, 1995). Os resultados obtidos mostram que todos os toros cumprem este requisito.

A curvatura foi determinada, apenas nos toros da amostra S1, medindo a máxima distância (D) entre a linha que une os topos e a superfície do toro (Figura 5), e da distância entre topos (L), sendo a curvatura dada pelo rácio D/L. No caso de curvatura múltipla, este procedimento foi efectuada para cada concavidade, sendo considerado o maior dos valores obtidos. Os resultados obtidos são superiores aos limites recomendados para outras espécies (Ranta-Maunus, 1999). Estes fracos resultados podem ser justificados pelo facto de os toros procederem de florestas de regeneração natural onde cuidados adequados de limpeza não foram executados.

As fendas foram avaliadas, apenas nos toros da amostra S1, medindo o comprimento (l) e a abertura (e) de cada fenda, sendo considerado o maior rácio e/l.

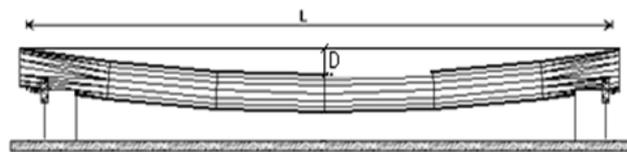


Figura 5 – Medições no caso de curvatura simples

A avaliação dos nós passou pela medição do diâmetro do maior nó de cada toro. No caso de agrupamento de nós, a soma dos diâmetros individuais dos nós e o diâmetro do agrupamento são medidos, sendo considerado o menor valor.

Características Visuais	Amostra S1		Amostra S2	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Diâmetro Nominal (mm)	102,84	22,74	196,68	30,95
Curvatura (cm/m)	1,18	0,49	-	-
Taxa de crescimento (mm)	3,80	1,14	3,35	0,66
Nós _{dmax} (mm)	27,79	13,99	27,98	14,96
Fendas (e/l) (mm/m)	0,83	0,43	-	-
Fio torcido (cm/m)	6,50	3,57	5,97	5,12
Adelgaçamento (cm/m)	0,63	0,34	0,66	0,27
Ovalidade (%)	5,54	2,85	-	-

Tabela 1 – Características visuais das amostras S1 e S2

3. Caracterização experimental

Os ensaios seguiram as indicações da norma EN 14251 (CEN, 2003a) para a determinação das propriedades mecânicas da madeira de secção circular, nomeadamente da resistência à flexão na direcção das fibras ($f_{m,0}$), da resistência à compressão na direcção das fibras ($f_{c,0}$) e do módulo de elasticidade em flexão. Na determinação do módulo de elasticidade consideraram-se dois valores independentes: o local (E_{local}) e o global (E_{global}). O E_{global} foi calculado usando a norma EN 408 (CEN, 2003c) com as necessárias adaptações para secções circulares. As diferenças entre E_{local} e E_{global} incidem, sobretudo, no esquema de ensaio. Com efeito, as medições para determinação do E_{local} são efectuadas na parte central do vão, onde o esforço transversal é nulo; no caso do E_{global} são efectuadas em todo o vão, onde coexistem momento flector e esforço transversal.

3.1. Ensaio de flexão

O ensaio de flexão foi executado num dispositivo de ensaio com capacidade para aplicar 200 kN (Figura 6), segundo o esquema de ensaio da Figura 7. O dispositivo de ensaio possuía duas vigas em I onde os dois apoios eram colocados, de modo a possibilitar o ensaio de toros de comprimentos diferentes. Os apoios permitiam quer a rotação quer a translação dos topos do toro. As cabeças de carga permitiam a rotação e a translação das secções carregadas da superfície do toro durante o ensaio. Para distribuir o carregamento na superfície do toro e para evitar a rotação do toro durante o ensaio, usaram-se blocos de eucalipto (com comprimento de 100mm e diâmetro adequado ao toro em causa) nos apoios e nas cabeças de carga.



Figura 6 – Dispositivo de ensaio de flexão

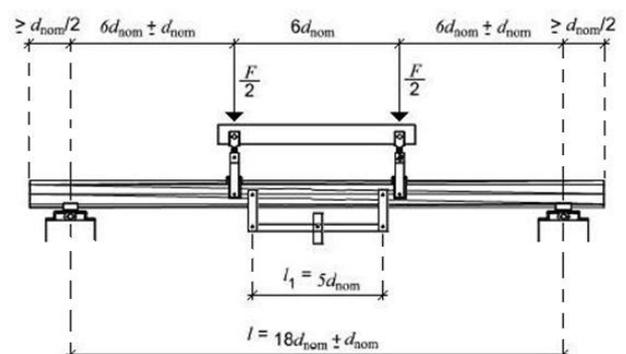


Figura 7 – Esquema de ensaio

O diâmetro nominal (d_{nom}) de cada toro foi determinado medindo o diâmetros máximo e mínimo em ambos os topos. Caso a ovalidade fosse superior a 5%, o d_{nom} era considerado como o maior dos diâmetros mínimos. No caso de a ovalidade ser menor ou igual a 5%, o d_{nom} era considerado como sendo o diâmetro correspondente ao perímetro do maior topo, tal como referido na norma EN14251 (CEN, 2003a).

Todas as distâncias necessárias para execução do ensaio de flexão foram determinadas em função do d_{nom} . Assim, todos os toros foram colocados no dispositivo de ensaio com os apoios e as cabeças de carga ajustados para as distâncias $18d_{nom}$ e $6d_{nom}$, respectivamente. No caso de presença de curvatura, os toros foram colocados com a concavidade para cima. O comprimento $5d_{nom}$ foi ajustado em dois braços de alumínio (um em cada lado do toro) que eram aparafusados ao toro.

Para determinação do E_{local} foram marcados três pontos de referência no toro de modo a ser efectuada a medição de deslocamentos preconizada na norma EN14251 (CEN, 2003a). A determinação do E_{local} foi efectuada com o deslocamento médio obtido nos dois braços de alumínio. Medições adicionais foram efectuadas a meio vão e nos apoios para determinação do E_{global} . Os toros foram carregados até 40% da carga de rotura estimada, com uma velocidade de carga que assegurou a rotura em 300s, com uma tolerância de 120s.

O procedimento para determinar a resistência à flexão ($f_{m,0}$) foi similar ao descrito para o módulo de elasticidade, mas sem medição de deformações. A rotura ocorreu tipicamente na zona central, situando-se próxima de um nó, na zona de aplicação de carga ou no lado de menor diâmetro do toro.

Após o ensaio, foi cortada uma rodela próxima da zona de rotura para determinação da massa volúmica e do teor de água do toro à data do ensaio (Tabela 2).

Amostra	Teor de água (%)	
	S1	S2
Média	13,3	16,2
Desvio padrão	0,5	2,5
Mínimo	12,1	12,6
Máximo	15,0	25,9
N	200	59

Tabela 2 – Teor de água das amostras

3.2. Ensaio de compressão

Com o ensaio de compressão pretendeu-se avaliar a resistência à compressão na direcção das fibras ($f_{c,0}$). Os provetes foram retirados dos toros ensaiados à flexão, da amostra S1, em zonas não afectadas pela rotura. As peças possuíam um comprimento normalizado e apresentavam os topos planos, paralelos entre si e perpendiculares ao eixo longitudinal da peça.

O provete foi carregado concentricamente numa prensa (Figura 8) que possuía um prato superior apoiado numa rótula esférica, o que permitia a aplicação da carga sem induzir flexão. A velocidade da aplicação de carga permitiu a rotura em 300s, com uma tolerância de 120s. As roturas caracterizam-se pelo surgimento de pregas, tipicamente em zona de nós (Figura 9).



Figura 8 – Dispositivo de ensaio de compressão



Figura 9 – Exemplo de uma rotura por compressão

3.3. Módulo de elasticidade dinâmico

Actualmente, grande parte da madeira é classificada usando máquinas que medem a rigidez à flexão. A peça de madeira é carregada e usada a deformação resultante para o cálculo da rigidez da secção transversal, a qual serve como parâmetro de classificação. Um método alternativo para a determinação da rigidez é baseado na relação entre a frequência da vibração de uma peça livre e o seu módulo de elasticidade. Uma vez que os resultados da aplicação deste método são independentes de defeitos geométricos como a curvatura ou adelgaçamento, pode ser adequado como método de classificação de madeira circular de pequeno diâmetro (Vries e Gard, 1998). A vibração pode ser iniciada por um impacto transversal ou longitudinal. Devido à geometria e massa do toro, e ao esquema de ensaio usado, foi seguido o método da vibração longitudinal. O equipamento usado neste estudo para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico (E_{dyn}) foi o Timber Grader – MTG (Figura 10).



Figura 10 – Timber Grader - MTG

4. Discussão de resultados

As características mecânicas obtidas, para o teor de água de referência (12%), segundo a norma EN384 (CEN, 2004), são apresentadas na Tabela 3.

Amostra	$f_{m,0}$ (MPa)		$f_{c,0}$ (MPa)	E_{global} (GPa)		E_{local} (GPa)		Density (kg/m ³)	
	S1	S2	S1	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Média	82,7	73,0	40,9	14,6	13,1	14,1	17,8	535,0	579,5
Valor Característico	54,4	37,7	27,5	9,8	8,7	9,5	12,0	436,8	475,2
Desvio Padrão	15,7	15,1	7,4	3,4	2,6	2,9	3,2	59,4	63,2
Mínimo	48,5	41,2	19,5	5,1	7,9	7,1	10,1	376,1	436,1
Máximo	133,5	108,3	68,8	25,7	18,6	21,4	25,1	767,9	765,0
N	180	59	197	180	59	180	59	200	59

Tabela 3 – Propriedades mecânicas das amostras

A $f_{m,0}$ média para os toros da amostra S1 foi de 82,7MPa com um coeficiente de variação de 19,0%, o que resulta num 5º percentil de 54,4MPa. Para a $f_{c,0}$ foi obtido um valor médio de 40,9MPa com um coeficiente de variação de 17,3%, resultando num 5º percentil de 27,5MPa. O valor médio obtido para o E_{local} foi de 14,1MPa. O valor médio para a $f_{m,0}$ dos toros da amostra S2 foi de 73,0MPa com um coeficiente de variação de 20,7%, o que resulta num 5º percentil de 37,7MPa. O valor médio para o E_{local} foi de 17,8MPa.

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas obtidas neste estudo, juntamente com as obtidas em estudos similares para outras espécies. A comparação mostra que os valores de resistência obtidos para o Pinheiro bravo, especialmente para os toros da amostra S1, são significativamente superiores à generalidade dos obtidos para outras espécies. Para o módulo de elasticidade a situação é similar, apresentando o Espruce americano os maiores valores.

	$f_{m,0}$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	E_{local} [GPa]	Massa volúmica [kg/m ³]
Pinheiro bravo ¹ – S1 Portugal	82,7	40,9	14,1	535,0
Pinheiro bravo ¹ – S2 Portugal	73,0	-	17,8	579,5
Larício do Japão ² – Holanda	85,0	45,0	14,3	580
Casquinha ² – Finlândia	50,0	28,0	11,9	470
Casquinha ² – Reino Unido	54,0	32,8	14,9	529
Espruce ² – Áustria	61,0	-	12,9	451
Espruce ² – Finlândia	60,0	30,7	12,9	434
Espruce americano ² – Reino Unido	58,0	28,6	16,1	478
Pseudotsuga ² – França	52,0	33,0	11,1	442
Pinho de ponderosa ³ – USA	56,0	-	10,7	410
Pinho insigne ⁴ – Chile	52,0	-	10,5	440
Pseudotsuga ⁵ – USA	61,0	37,0	9,7	488
Abeto ⁵ – USA	46,0	28,0	8,3	395
Pinho insigne ⁵ – USA	39,0	18,0	5,6	400

¹Este estudo, ²Ranta-Maunus, 1999, ³Larson *et al.*, 2004a, ⁴Cerda e Wolfe, 2003 ⁵Wolfe e Moseley, 2000

Tabela 4 – Propriedades mecânicas de diversas espécies

De modo a avaliar a influência das características visuais nas propriedades mecânicas, especialmente na $f_{m,0}$, correlações entre essas características e a resistência à flexão foram determinadas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

A melhor correlação entre a $f_{m,0}$ e parâmetros visuais foi obtida para a taxa de crescimento, fio torcido e o máximo diâmetro do maior nó (expresso em percentagem do diâmetro nominal do toro). A correlação entre a $f_{m,0}$ e outras propriedades mecânicas foi também determinada e os resultados obtidos foram superiores aos obtidos para as características visuais. O E_{dyn} e a massa volúmica foram os parâmetros com melhor correlação com a $f_{m,0}$ ($r=0,77$ e $r=0,70$, respectivamente, para a amostra S1). Devido a esta forte correlação, estes parâmetros podem ser a base para um sistema de classificação mecânica, tal como sugerido por Mackes *et al.* (2005). Usando regressões lineares múltiplas é possível obter coeficientes de correlação ligeiramente superiores. A melhor correlação com a $f_{m,0}$, envolvendo dois parâmetros, foi obtida com o E_{global} e a massa volúmica ($r=0,83$), para os toros da amostra S1. Uma regressão linear múltipla foi efectuada usando todos os parâmetros visuais e o E_{global} , tendo sido obtido um coeficiente de correlação ligeiramente superior ($r=0,85$). No entanto, esta melhoria no coeficiente de correlação não justifica o tempo dispendido na determinação de todas as propriedades.

	S1	S2		S1	S2
E_{local}	0.76	0.74	Adelgaçamento	-0.32	0.03
E_{global}	0.75	0.57	Ovalidade	0.12	---
E_{dyn}	0.77	---	Curvatura	0.10	---
Massa volúmica	0.70	0.53	Fendas	-0.09	---
Taxa de crescimento	-0.55	-0.59	d_{nom}	-0.11	-0.17
Fio torcido	-0.33	-0.40	Nós - d_{max}	-0.36	-0.25

Tabela 5 – Coeficientes de correlação entre a $f_{m,0}$ e outros parâmetros

5. Classificação visual

Considerando os coeficientes de correlação obtidos, foi desenvolvida uma proposta de classificação visual baseada nas seguintes características: adelgaçamento, fio torcido, diâmetro dos nós (em função do diâmetro nominal dos toros) e a taxa de crescimento. Na definição dos limites destas características foi tida em conta a representatividade das classes, assegurando que cada classe representa pelo menos 15% do total de toros da amostra conjunta S1+S2, e a

máxima diferenciação entre classes. Os limites foram ajustados de modo a obter uma classe superior A e uma classe inferior B, tal como na norma de classificação da madeira serrada de Pinheiro bravo (IPQ, 1995). A opção por duas classes teve em consideração que o uso de mais classes poderia resultar num melhor aproveitamento do material, mas o processo de classificação seria mais moroso e caro. Por outro lado, a consideração de apenas uma única classe tornaria o processo de classificação mais rápido mas resultaria num subaproveitamento do material.

Os limites para cada classe são apresentados na Tabela 6. Os valores limites adoptados para o adelgaçamento e o fio torcido de ambas as classes são iguais. Esta decisão teve em conta que embora as características mais importantes para a diferenciação da resistência entre classes sejam a taxa de crescimento e o diâmetro dos nós, o adelgaçamento e o fio torcido podem afectar a aplicação estrutural deste material devido a imperfeições geométricas (adelgaçamento) ou instabilidade dimensional (fio torcido). Para assegurar que os toros possuem características geométricas apropriadas para aplicação estrutural, foram adoptados os limites de 10% e 20% para a ovalidade nas classes A e B, respectivamente. Em termos de curvatura, os limites de 2,5mm/m para a classe A e 5mm/m para a classe B são recomendados por Ranta-Maunus (1999).

Usando estes limites foi conseguida uma diferenciação significativa entre as duas classes, sendo que 34,22% do número total de toros (S1+S2) foram rejeitados.

Limites -Classe A		Limites - Classe B	
Fio torcido [m/m]	0,20	Fio torcido [m/m]	0,20
Nós [%]	0,30	Nós [%]	0,50
Taxa de crescimento [mm]	3,00	Taxa de crescimento [mm]	5,00
Adelgaçamento [mm/m]	15,00	Adelgaçamento [mm/m]	15,00

Propriedades		Propriedades	
$f_{m,0}$ [MPa]	91,55	$f_{m,0}$ [MPa]	77,48
$f_{m,k}$ [MPa]	59,04	$f_{m,k}$ [MPa]	45,46
$f_{c,0}$ [MPa]	45,02	$f_{c,0}$ [MPa]	40,76
$f_{c,0,k}$ [MPa]	31,01	$f_{c,0,k}$ [MPa]	27,52
$E_{local,mean}$ [GPa]	18,0	$E_{local,mean}$ [GPa]	14,5
$E_{local,0,05}$ [GPa]	12,1	$E_{local,0,05}$ [GPa]	9,7
$E_{global,mean}$ [GPa]	16,6	$E_{global,mean}$ [GPa]	13,8
$E_{global,0,05}$ [GPa]	11,1	$E_{global,0,05}$ [GPa]	9,2
ρ_{mean} [Kg/m ³]	594,59	ρ_{mean} [Kg/m ³]	534,67
ρ_k [Kg/m ³]	514,09	ρ_k [Kg/m ³]	432,35
$E_{local,90,mean}$ [MPa]	599,85	$E_{local,90,mean}$ [MPa]	484,90
$E_{global,90,mean}$ [MPa]	551,76	$E_{global,90,mean}$ [MPa]	459,32
$G_{local,mean}$ [MPa]	1124,73	$G_{local,mean}$ [MPa]	909,18
$G_{global,mean}$ [MPa]	1034,55	$G_{global,mean}$ [MPa]	861,23
$f_{t,0,k}$	35,43	$f_{t,0,k}$	27,28
$f_{t,90,k}$	0,60	$f_{t,90,k}$	0,60
$f_{v,k}$	3,80	$f_{v,k}$	3,80
$f_{c,90,k}$	3,60	$f_{c,90,k}$	3,03
Representatividade	17,57%	Representatividade	50,21%

Tabela 6 – Limites e características mecânicas das classes A e B propostas

6. Notas finais

Duas amostras, S1 e S2, de toros de madeira de secção circular de Pinheiro bravo foram sujeitas a ensaios de flexão, tendo os toros da amostra S1 sido igualmente usados em ensaios de compressão. Os toros da amostra S1 possuíam um diâmetro nominal entre 70mm e 190mm; no

caso dos toros da amostra S2 o diâmetro nominal variava entre 130mm e 260mm. Somente os toros da amostra S1 foram expostos a uma humidade relativa de 65% e a 20°C de temperatura.

Os resultados obtidos neste estudo para as propriedades mecânicas são superiores à maioria dos obtidos em estudos similares para outras espécies europeias e americanas. No caso do módulo de elasticidade a situação é semelhante, mas a diferença é menor.

São apresentadas duas classes de qualidade com base na medição do fio torcido, diâmetro de nós, taxa de crescimento e adelgaçamento, resultando numa melhor rentabilidade deste material.

A possibilidade de estimar a resistência à flexão sem recurso a ensaios destrutivos foi igualmente considerada. Para tal, foram obtidas as correlações entre a resistência à flexão e diversas características visuais e propriedades mecânicas. Concluiu-se que a resistência à flexão possui boa correlação com a massa volúmica e com o E_{local} . Esta correlação pode ser melhorada se estes dois parâmetros forem usados em conjunto. As correlações entre a massa volúmica juntamente com o módulo de elasticidade, ou a correlação entre o E_{dyn} e a resistência à flexão, indicam claramente que a classificação mecânica pode ser usada com sucesso na madeira de secção circular de Pinheiro bravo.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela Pinhal Maior – Associação para o Desenvolvimento do Pinhal Interior Sul e pelo projecto de investigação “Valorização da Madeira de Pinheiro Bravo”.

Referências Bibliográficas

- CEN (1995). "Round and sawn timber - Method of measurement of features." prEN1310. Comité Européen de normalization.
- CEN (2003a). "Structural round timber – Test methods." EN14251. Comité Européen de normalization.
- CEN (2003c). "Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties." EN408. Comité Européen de normalization.
- CEN (2004). "Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density." EN 384. Comité Européen de normalization.
- Cerda, G. e Wolfe, R. W. (2003), "Bending strength of Chilean radiate pine poles " Forest Products Journal, vol.53, n.º 4, pp. 61-65.
- IPQ (1995). "Madeira de pinheiro bravo para estruturas." NP4305. Instituto Português da Qualidade.
- Larson, D., Mirth, R. e Wolfe, R. (2004a), "Evaluation of small-diameter ponderosa pine logs in bending." Forest Products Journal vol.54, n.º 1 2, pp. 52-58.
- Machado, J. (2000), "Avaliação da variação das propriedades mecânicas de Pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.) por meio de ultra-sons." Instituto superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Tese de Doutoramento.
- Mackes, K., Shepperd, W. e Jennings, C. (2005), "Evaluating the bending strength properties of clear wood specimens produced from small-diameter ponderosa pine trees." Forest Products Journal, vol.55, n.º 10, pp. 72-80.
- Ranta-Maunus, A. (1999). "Round small-diameter timber for construction." Final report project FAIR CT 95-0091. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 383.
- Vries, P. (1998b). "Strength grading of small-diameter Larch." Report C4-98-02. Delft University of Technology.
- Vries, P. e Gard, W. (1998). "The development of a strength grading system for small diameter roundwood." Heron.
- Wolfe, R. e Moseley, C. (2000), "Small-diameter log evaluation for valued added structural applications." Forest Products Journal, vol.50, n.º 10, pp. 48-58.