

USO DE PRODUTOS DE MADEIRA DE ALTO DESEMPENHO EM APLICAÇÕES ESTRUTURAIS



Alfredo M.P.G. Dias*

Professor auxiliar
Universidade de Coimbra
Coimbra
alfgdias@dec.uc.pt



José S. Machado

Investigador Auxiliar
LNEC
Lisboa
Saporiti@Inec.pt



Pedro Santos

Bolseiro de Investigação
Universidade de Coimbra
Coimbra
Uc2006107489@student.uc.pt

SUMÁRIO

Nesta comunicação é apresentado um estudo realizado tendo em vista a avaliação do potencial das técnicas não destrutivas para a classificação mecânica de elementos estruturais de pinho bravo nacional. Inicialmente é feito um enquadramento normativo ao nível da classificação de madeira para aplicações estruturais. Este enquadramento é transposto para a situação nacional tendo em atenção as espécies existentes e a possibilidade que existe do seu uso neste tipo de aplicação. Dada a relevância e importância da madeira de Pinho bravo nesta aplicação foi selecionada uma amostra representativa em termos de origens, processos produtivos e secções geométricas produzidas. Esta amostra foi sujeita inicialmente a ensaios não destrutivos seguidos de ensaios destrutivos com o objetivo de avaliar o potencial da técnica não destrutiva usada, vibração longitudinal, na classificação mecânica de elementos de madeira desta espécie. Os resultados obtidos demonstram de uma forma muito clara o potencial que esta espécie tem para aplicações estruturais. Fica igualmente bem claro o enorme subaproveitamento que existe desta madeira quando usada em aplicações estruturais, recorrendo às técnicas de classificação usadas atualmente. Este subaproveitamento resulta no essencial da inexistência de conhecimento que permita uma maior otimização das características desta espécie, nesse âmbito este estudo procura dar um contributo positivo.

Palavras-chave: classificação de madeira, estruturas de madeira, classificação mecânica.

1. CLASSIFICAÇÃO DE MADEIRA

1.1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais estruturais mais tradicionais no setor da construção. Associa uma boa resistência mecânica, aos esforços mais frequentes, com um peso próprio relativamente baixo, e regra geral um bom impacto ambiental, resultante de ser um material natural. Esta sua vertente natural, conduz por outro lado a um dos seus principais problemas, que se relaciona com a sua variabilidade de propriedades. Esta variabilidade é particularmente elevada no caso das propriedades resistentes, em especial para a tração e a flexão, muito relevantes nas aplicações estruturais. Por exemplo, tendo por base as classes resistentes temos valores característicos de resistência à flexão e tração paralela às fibras que podem variar entre (C14) 14MPa-8MPa e (C50) 50MPa-30MPa, respetivamente.

A forma de gerir esta variabilidade de propriedades mecânicas é o recurso à classificação. Através da classificação é possível agrupar os elementos de madeira em grupos mais homogêneos, e logo diminuir a variabilidade dentro dos grupos (classes de qualidade).

A classificação de madeira pode ser realizada de duas formas distintas: através de avaliação visual (classificação visual) ou de avaliação mecânica (classificação mecânica). Na classificação visual são avaliadas características estruturais passíveis de serem quantificadas com uma inspeção visual da superfície do elemento de madeira. Exemplos dessas características são por exemplo: nós, inclinação das fibras, fendas ou taxas de crescimento. No caso da classificação mecânica o elemento de madeira é submetido a um ensaio não destrutivo cujo resultado apresenta correlações significativas com as propriedades mecânicas da madeira. Exemplos desses ensaios são por exemplo a velocidade de propagação das ondas, vibração ou ensaio estático. Para evitar a presença de elementos com características indesejadas para aplicação estrutural, mas que não sejam rastreadas com a técnica em causa é ainda aplicada uma seleção visual “visual override”.

As regras e procedimentos aplicáveis à classificação de madeira para aplicações estruturais estão definidos na norma europeia harmonizada EN 14081. Esta norma compreende 4 partes: parte 1 requisitos gerais para classificação de madeira [1], parte 2 requisitos adicionais para ensaios de tipo inicial em classificação mecânica [2], parte 3 requisitos adicionais para controlo de produção de classificação mecânica [3] e a parte 4 requisitos adicionais para “machine controlled systems” em classificação mecânica [4]. Este conjunto de normas define os princípios orientadores para a classificação de madeira para aplicações estruturais, nomeadamente tendo em vista a Marcação CE deste produto.

No caso da classificação visual de madeira têm de existir normas nacionais que definem em cada caso quais as exigências específicas para cada espécie de cada origem, as quais têm de respeitar os requisitos gerais definidos na EN 14081. Esta classificação visual permite a definição de classes de qualidade as quais podem ser associadas a classes de resistência definidas na EN 338. Sempre que se estabelece uma nova relação entre classes de qualidade

e classes de resistência para uma dada espécie de uma origem específica tal passa a estar registado ao nível normativo na EN 1912. Este enquadramento normativo está esquematizado na Figura 1.

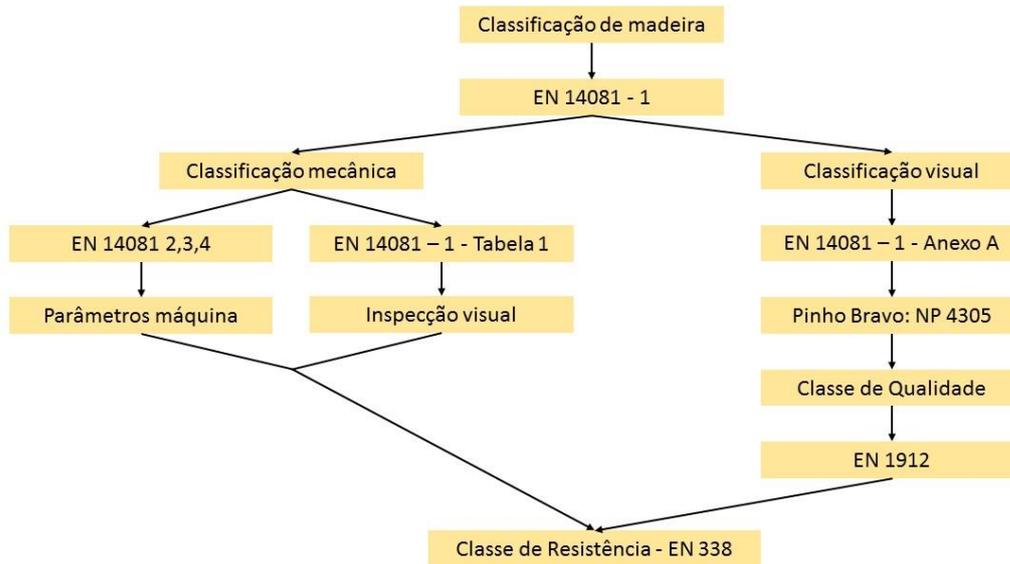


Figura 1. Enquadramento normativo para a classificação de madeira para aplicações estruturais

Estudos realizados demonstram que com o uso de técnicas de classificação mecânica é possível obter melhores resultados (rendimentos), devido à obtenção de correlações mais elevadas entre propriedades/características medidas e as propriedades mecânicas. No entanto, os custos iniciais e de certificação tendem a ser mais elevados com esta técnica que com a classificação visual tradicionalmente usada. Provavelmente por estas razões a classificação visual continua a ser a técnica mais utilizada na prática, no entanto nos últimos anos tem aumentado consideravelmente o número de indústrias que recorre à classificação mecânica.

Neste trabalho é apresentado um estudo que teve por objetivo a aplicação da classificação mecânica em madeira de Pinho bravo de origem Nacional. Este estudo permitiu demonstrar que a madeira de Pinho bravo de origem Nacional, quando corretamente selecionada e processada, tem um potencial muito elevado para aplicações estruturais, tendo apresentado características compatíveis com as classes resistentes mais elevadas que estão previstas na EN 338 [5].

1.2 CLASSIFICAÇÃO DE MADEIRA EM PORTUGAL

A origem da madeira aplicada em Portugal em estruturas, é em muitas situações nacional mas dados os constrangimentos existentes na oferta tem-se recorrido de forma crescente à

importação de madeiras. Tradicionalmente o leque de espécies usado era bastante variado incluindo por exemplo, o pinho bravo, o castanho, o choupo, o eucalipto ou o carvalho [6]. Apesar disso de todas as espécies nacionais usadas, somente a o Pinho bravo tem o enquadramento normativo necessário para poder ser qualificado para colocação no mercado dos produtos da construção.

A NP 4305 define as exigências e requisitos para classificação visual de madeira de Pinho bravo. Esta define duas classes de qualidade: classe E- Estruturas e a classe EE – Especial Estruturas. Tendo por base estas classes de qualidade foram realizados ensaios para determinação das respetivas propriedades mecânicas, as quais estão indicadas no Quadro 1.

Quadro 1. Propriedades mecânicas da madeira de Pinho bravo classificada de acordo com a NP4305

Propriedades mecânicas		Classe E	Classe EE*
Flexão (N/mm ²)	$f_{m,k}$	18	35
Tracção paralela ao fio (N/mm ²)	$f_{t,0,k}$	11	21
Tracção perpendicular ao fio (N/mm ²)	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4
Compressão paralela ao fio (N/mm ²)	$f_{c,0,k}$	18	24
Compressão perpendicular ao fio (N/mm ²)	$f_{c,90,k}$	3,2	3.4
Corte (N/mm ²)	$f_{v,k}$	3,4	4
Módulo de elasticidade (N/mm ²)			
Paralelo ao fio:			
– valor médio	$E_{o,mean}$	12 000	14 000
–valor característico	$E_{0,05}$	8 000	9 300
Perpendicular ao fio:			
– valor médio	$E_{90,mean}$	400	460
Módulo de distorção (N/mm ²)	G_{mean}	750	870
Massa volúmica (kg/m ³)			
– valor médio	ρ_{men}	580	610
– valor característico	ρ_k	460	490

Das duas classes definidas somente a classe E está referenciada na EN1912, sendo indicada como pertencendo à classe de resistência C18. Para a classe EE não existe qualquer atribuição de classe resistente.

Na prática a madeira desta espécie é classificada visualmente, segundo o disposto na norma de classificação visual NP 4305, o que em termos práticos condiciona fortemente toda a madeira à classe C18, claramente na gama baixa de propriedades resistentes. Tal conduz a um enorme subaproveitamento do material, levando a um claro desperdício e a soluções estruturais bastante mais limitadas.

2. CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DE MADEIRA

A técnica tradicionalmente usada para a classificação mecânica de madeira era o ensaio estático não destrutivo. Nesta todos os elementos classificados são submetidos a uma força sendo medido o respetivo deslocamento ou vice-versa. Esta técnica assenta na boa correlação existente entre a rigidez e a resistência de um elemento de madeira. A dificuldade deste processo reside nos elevados custos do equipamento e respetiva validação, razão pela qual a classificação visual continuou a ser, esmagadoramente, a técnica de classificação mais usada.

Nos últimos anos apareceram diversas técnicas alternativas que permitem obter melhores aproveitamentos do material e/ou valores de investimento significativamente mais baixos. Essas técnicas incluem a vibração transversal e longitudinal, a velocidade de propagação das ondas, a resistência à penetração, o raio X, a tomografia computadorizada ou o processamento de imagem. Para a maioria destas técnicas já existem soluções no mercado para ensaio de peças de madeira. Em muitos casos uma ou mais destas são combinadas num equipamento por forma a obter melhores rendimentos.

Os equipamentos mais sofisticados permitem não só obter correlações muito elevadas como permitem um controlo em tempo real da qualidade da madeira que está a ser classificada. De entre todas estas técnicas a que tem apresentado uma relação desempenho custo mais interessante é a vibração longitudinal. Em particular se associada com a massa volúmica permite obter rendimentos bastante interessantes na classificação de madeira.

Dadas as características da indústria de serração em Portugal, baixos níveis de produção, baixa capacidade de investimento foi considerado que esta técnica seria a mais indicada para a classificação de madeira de Pinho bravo para aplicações estruturais.

3. ESTUDO REALIZADO

3.1 Amostra

Dado que o objetivo deste trabalho são os produtos de aplicação estrutural era essencial que a amostra usada refletisse essa realidade. Dessa forma foram selecionados elementos cuja produção tinha como finalidade aplicações estruturais, ainda que nalguns casos fora da área da construção convencional.

Por outro lado na amostragem foram também tidos em consideração outros aspetos tais como a origem, dimensões e produtores de forma a garantir a qualidade e representatividade da amostra. Foram recolhidas amostras de 4 unidades de produção localizadas na região Norte e Centro, tal como indicado na Figura 2.

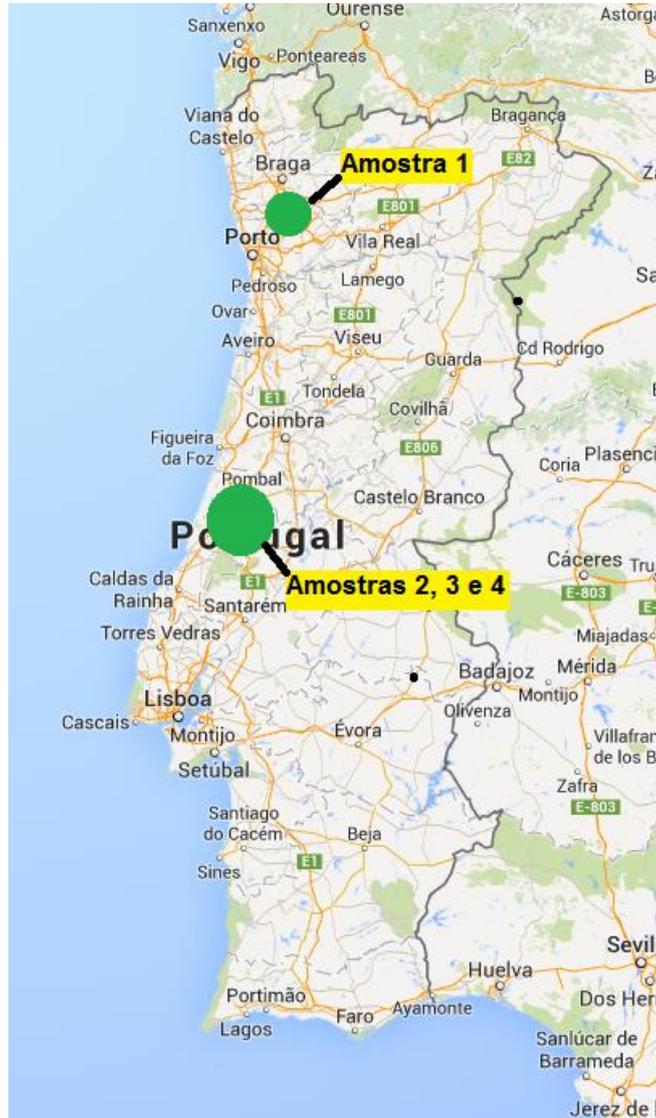


Figura 2. Origem das amostras

Por forma a garantir uma adequada representatividade temporal as amostras foram selecionadas em três fases com intervalos de seis meses entre si. No Quadro 2 são indicadas as seções geométricas que constituíram a amostra.

Quadro 2. Secções geométricas da amostra

Dimensões (b × h) (mm)		
40x100	60x80	80x160
40x120	60x100	80x220
40x140	60x120	100x100
45x185	70x70	100x200
50x100	70x100	150x250
50x140	70x140	

A amostra global foi constituída por 866 elementos estruturais distribuídos pelas várias seções de forma proporcional às quantidades produzidas.

3.2 ENSAIOS

O estudo realizado compreendeu o ensaio das amostras por métodos não destrutivos, seguido do ensaio por método destrutivo. A técnica de ensaio não destrutivo usada foi a vibração longitudinal. Após esse ensaio todas as peças foram sujeitas a dois ensaios de flexão, o primeiro não destrutivo para determinar o módulo de elasticidade estático e o segundo destrutivo para determinar a resistência à flexão (Figura 3).



Figura 3. Ensaio realizados

A técnica não destrutiva utilizada foi selecionada tendo por base estudos anteriores que demonstraram bons resultados para classificação da madeira de Pinho bravo para aplicações estruturais [7, 8].

Estes ensaios foram sempre complementados com uma caracterização visual e ensaios complementares de forma a obter informação tão exaustiva quanto possível sobre os elementos da amostra. O conjunto de informação obtido incluiu: quantidade, localização e dimensão dos defeitos, taxa de crescimento, massa volúmica e teor de água.

3.3 RESULTADOS

Tendo por base os resultados obtidos nos ensaios foi possível estimar quais seriam os resultados de um eventual processo de classificação. Tendo em vista essa análise o primeiro passo consistiu na definição dos grupos de classes resistentes que seriam obtidos nas diferentes combinações de classificação. Estas foram definidas tendo como objetivos centrais: i) maximizar a quantidade de madeira nas classes resistentes mais elevadas e logo de maior valor acrescentado, ii) obter produtos que fossem de encontro às classes resistentes pretendidas pela indústria da construção.

Tomou-se por base que a classe padrão em termos de aplicações estruturais é o C24, logo definiu-se uma combinação de classificação em que unicamente se classificava como C24 ou rejeitava. Esta combinação teve como objetivo maximizar a quantidade de madeira da classe

C24 que é a classe resistente com maior potencial de procura por parte da indústria da construção. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Rendimentos obtidos para a combinação de classificação C24/rejeitado

C24 (%)	Rejeitado (%)	$E_{médio}$ (N/mm ²)
94,7%	6,3%	13200

Os resultados obtidos demonstram claramente que a madeira da amostra é na sua quase totalidade de classe C24 ou superior. Efetivamente, somente em cerca de 6% das peças seriam rejeitadas por não se ter conseguido demonstrar através da metodologia de classificação usada que não características compatíveis com a classe C24.

O perfil de resultados demonstrava que seria possível obter uma quantidade de madeira de classes superiores a C30. Nesse sentido definiram-se duas combinações de classificação que deveriam ter como principal vantagem terem uma quantidade de madeira não desprezável nas classes resistentes superiores, sendo essa a mais-valia dessas combinações. Os resultados demonstraram que tal seria possível quer para a classe C35 quer para a classe C40. Para os elementos que não seriam compatíveis com a classe mais elevada definiram-se duas possibilidades, classe C24 madeira com forte potencial estrutural e C18 que teve por objetivo maximizar a quantidade de madeira aproveitada para aplicação estrutural, ainda que nesta última classe para aplicações de menor exigência.

As duas combinações de classificação foram então: C35/C24/C18/rejeitado e C40/C24/C18/rejeitado. Os resultados da primeira e segunda combinação são apresentados respetivamente nos Quadro 4 e Quadro 5.

Quadro 4. Rendimentos obtidos para a combinação de classificação C24/rejeitado

C35 (%)	C24 (%)	C18 (%)	Rejeitado (%)
67,7	9,6	19,0%	3,7%

Quadro 5. Rendimentos obtidos para a combinação de classificação C24/rejeitado

C40 (%)	C24 (%)	C18 (%)	Rejeitado (%)
51,6	27,0	17,0%	4,4%

Estes resultados demonstram o enorme potencial que a madeira de pinho bravo para aplicação em estruturas poderá ter para situações de elevada exigência. Cerca de 2/3 da amostra poderiam ser classificados como C35, enquanto que mais de metade da amostra poderia ser classificada como C40. O nível de rejeição seria em ambos os casos muito baixo

com valores em torno dos 4%. A percentagem de elementos com bom ou elevado desempenho (>C24) é em ambos os casos bastante elevada rondando os 80%.

4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho demonstram claramente o potencial da madeira de Pinho bravo para aplicações estruturais de especial exigência. Efetivamente, verifica-se que madeira que será formalmente colocada no mercado como C18 tem características para esmagadoramente ser classificada em classes de resistência claramente superiores.

Este estudo indicia de forma bastante clara que a aplicação da metodologia de classificação mecânica selecionada poderá originar enormes ganhos em termos de aproveitamento estrutural de elementos de madeira de Pinho bravo. Por outro lado, é importante referir que aos elementos das classes mais altas correspondem taxas de crescimento mais baixas, massas volúmicas mais elevadas e maior predominância de lenho maduro. Estas características indiciam a possibilidade de existir um bom comportamento também a outros níveis que não as propriedades mecânicas.

Neste âmbito é muito importante ter em consideração que um bom desempenho mecânico de uma estrutura de madeira, claramente, não é garantido unicamente por elevadas propriedades mecânicas. Outro tipo de propriedades, nomeadamente físicas, condicionam de forma significativa este desempenho. Exemplos dessas propriedades são os descaios, empenos ou as taxas de retração. Por este motivo poderá ser útil definir critérios mais exigentes que os indicados nas normas para estas características, nomeadamente para madeira das classes resistentes mais elevadas.

Tendo por base estes resultados é possível concluir que a madeira de Pinho bravo terá boas condições para ter desempenhos bastante bons tanto ao nível de comportamento mecânico como ao nível construtivo ou mesmo de sustentabilidade ambiental.

O estudo demonstra que é possível, na prática, obter produtos para aplicação estrutural com um desempenho muito mais elevado que o atualmente reconhecido. Na comunicação fica também bastante claro o potencial que existe, em madeira desta espécie, para aplicações estruturais mais ambiciosas e com um desempenho mecânico e ambiental bastante mais elevado.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer às empresas IRCRAL-Industrias de Madeira Irmãos Craveiro Lda, Madeiras do Vale da Catarina Lda e Martos & C^a Lda pelo apoio fornecido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1]. CEN, "*EN 14081-1 - Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements*". 2011, CEN: Brussels.
- [2]. CEN, "*EN 14081-2 - Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 2: Machine grading; Additional requirements for initial type testing*". 2010, CEN: Brussels.
- [3]. CEN, "*EN 14081-3 - Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 3: Machine grading; Additional requirements for factory production control*". 2012, CEN: Brussels.
- [4]. CEN, "*EN 14081-4 - Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 4: Machine grading - Grading machine settings for machine controlled systems.*". 2005, CEN: Brussels.
- [5]. CEN, "*EN 338 - Structural timber - Strength classes*". 2009, CEN: Brussels.
- [6]. Machado, J.M.S.R.S., et al., "*Avaliação e Reforço de Estruturas de Madeira*". 2009: Verlag Dashofer.
- [7]. Morgado, T.F.M., et al., "*Grading and testing of Maritime Pine Roundwood*", in *11th Conference on Timber Engineering - WCTE 2010*. 2010: Italy. p. 10.
- [8]. Morgado, T.F.M., "*Classificação e Aplicação Estrutural da madeira de Secção Circular de Pinheiro bravo*", in *Civil Engineering Department 2013*, University of Coimbra: Coimbra.