

## AVALIAÇÃO DE ELEMENTOS DE MADEIRA EM SERVIÇO. INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÃO OBTIDA POR APLICAÇÃO DE MÉTODOS SEMI-DESTRUTIVOS E RECURSO A MODELAÇÃO

Filipe Pereira<sup>1\*</sup> e José Machado<sup>2</sup>

1: Núcleo de Comportamento de Estruturas  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa  
e-mail: fspereira@lnec.pt, web: <http://www.lnec.pt/>

2: Núcleo de Comportamento de Estruturas  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa  
e-mail: saporiti@lnec.pt, web: <http://www.lnec.pt/>

**Palavras-chave:** resistência à flexão, módulo de elasticidade, ensaios não e semi-destrutivos, avaliação probabilística, modelação

**Resumo.** *A avaliação das propriedades de referência (massa volúmica, resistência à flexão e módulo de elasticidade) a considerar para elementos estruturais de madeira em serviço é um processo complexo, mas essencial para a realização da avaliação de uma estrutura quantos aos estados limites. A atribuição destas propriedades inicia-se pela identificação da espécie de madeira e conseqüente escolha e aplicação de uma norma de classificação visual de elementos de madeira para fins estruturais. Este procedimento, embora subjetivo, permite (uma vez aplicado de forma correta) a obtenção de valores para as propriedades da madeira que levam a uma análise muito conservadora. Isto resulta, por vezes, na recomendação de ações de reforço significativo da estrutura, ou mesmo da sua demolição, quando esta, e para o mesmo uso, não apresenta sinais de dano ao fim de mais de 50 anos em serviço.*

*No presente artigo pretende-se avaliar o possível aumento de fiabilidade da avaliação de elementos de madeira em função do ajuste das propriedades físicas e mecânicas da madeira face ao resultado de ensaios não e semi-destrutivos e da integração desta informação com a obtida por meios visuais, recorrendo a métodos Bayesianos. O comportamento das vigas é simulado por meio de elementos finitos e adotando uma visão dos elementos como constituídos por zonas de madeira limpa e zonas com defeitos (zonas com desvio pronunciado na orientação das fibras devido à existência de nós de tamanho significativo). A incerteza devida à variabilidade da madeira e aos métodos e modelos é incorporada nos resultados através da utilização do método de Monte Carlo.*

*O estudo compreende 33 vigas de pinho bravo de diferentes dimensões, tendo sido analisadas segundo a NP 4305, com recurso a ondas de choque e remoção de carotes.*

*Com este estudo pretende-se avaliar a possibilidade de explorar melhor as capacidades resistentes da madeira através da aplicação deste tipo de análises à avaliação da segurança de estruturas de madeira em serviço.*

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da madeira como material de construção já vem de há milhares de anos. Apesar existirem hoje no mercado soluções construtivas que fazem melhor uso das propriedades e potencialidades deste material, tais como os lamelados colados e as soluções construtivas de madeira lamelada cruzada, a construção de estruturas novas com recurso a madeira maciça é ainda uma realidade. Igualmente, existe ainda um largo património construtivo de estruturas de madeira antigas que ainda se encontram em serviço e que interessa preservar.

O Eurocódigo 5 [1] incorpora a variabilidade e incerteza relativa à capacidade de atribuir propriedades a elementos de madeira através de procedimentos simplificados, que passam pela aplicação de coeficientes parciais que diminuem os valores que são atribuídos às propriedades resistentes do material. Por outro lado, a magnitude das ações aplicadas às estruturas também é majorada. Este é o procedimento utilizado na construção de estruturas novas e que é, frequentemente, adaptado à avaliação do estado de segurança de estruturas em serviço. No entanto, esta abordagem leva a que, por vezes, se classifiquem como inseguras estruturas que se encontram em serviço há diversas décadas e que não apresentam qualquer problema de segurança [2].

Os métodos probabilísticos para avaliação da segurança de elementos de madeira, aplicados no âmbito do projeto que deu origem a este artigo, constituem uma tentativa de superar esta situação. O objetivo passa por procurar inferir as reais propriedades dos elementos de madeira inspecionados, combinando informação de base que se possa ter sobre os mesmos (quer seja por registos sobre a construção, quer seja através da sua classificação visual, situação que revela ser a mais frequente), com informação proveniente de ensaios não e semi-destrutivos que se realizem sobre os elementos estruturais.

A avaliação probabilística de estruturas e dos seus elementos estruturais requer a definição de variáveis aleatórias correspondentes às propriedades dos materiais, nomeadamente das três propriedades de referência propostas no *probabilistic model code* (PMC) pelo *Joint Committee on Structural Safety* [3], a resistência à flexão,  $f_m$ , o módulo de elasticidade em flexão,  $E_m$ , e a massa volúmica,  $\rho$ , que sugere ainda modelos probabilísticos para estas (Tabela 1).

|   | Distribuição | Coefficiente de variação (CoV) |
|---|--------------|--------------------------------|
| <b>Resistência à flexão <math>f_m</math></b>            | Lognormal    | 0,25                           |
| <b>Módulo de elasticidade à flexão <math>E_m</math></b> | Lognormal    | 0,13                           |
| <b>Massa volúmica <math>\rho</math></b>                 | Normal       | 0,10                           |

Tabela 1. Modelos probabilísticos para as propriedades de referência [3]

A definição das distribuições para as propriedades é o ponto essencial que permite a realização das análises probabilísticas. Nestas, os métodos de Monte Carlo são amplamente aplicados. Estes, permitem, através de sucessivas simulações e análise de uma mesma estrutura (com as propriedades da madeira atribuídas de forma aleatória a cada iteração), associar ao comportamento estrutural expectável um determinado índice de fiabilidade e suportar uma decisão mais fundamentada em relação ao seu nível de segurança e funcionalidade.

O primeiro passo para uma avaliação probabilística passa por obter toda a informação de base sobre a estrutura e os seus elementos, nomeadamente a espécie de madeira e a geometria da estrutura, em particular dos elementos que se considerem relevantes. Posteriormente, a identificação dos defeitos mais significativos dos elementos abre caminho ao processo da sua avaliação e classificação visual. Esta classificação, para além de constituir um procedimento subjetivo até em situações ideais, é dificultada, em situações de inspeção em obra, pelo facto de, frequentemente, não se ter condições de acessibilidade direta a todas as faces dos elementos a inspecionar. Assim, existe sempre um fator de



incerteza associado à classificação visual de elementos de madeira e subsequente atribuição de classes de qualidade (segundo normas adequadas às respetivas espécies de madeira). A atribuição da classe de qualidade permite a alocação de classes de resistência expressas na norma EN 338 [4]. Os valores das propriedades que se encontram nesta norma fornecem a primeira indicação sobre as propriedades de referência, designando-se por informação *a priori*.

Para melhor caracterizar as propriedades resistentes dos elementos de madeira, recorre-se à utilização de técnicas não e semi-destrutivas (TND e TSD). Estas fornecem a informação *a posteriori* que permite corrigir as estimativas iniciais e obter uma caracterização mais fiel das propriedades de referência.

A aplicação da inferência Bayesiana permite combinar a informação *a priori* e *a posteriori* e, assim, definir as distribuições de probabilidades para as propriedades dos elementos. Por fim, com as distribuições definidas, torna-se possível a aplicação dos métodos de Monte Carlo para a simulação e análise das estruturas.

A segurança da estrutura pode ser avaliada face às ações preconizadas no Eurocódigo 1 [5] ou podem, elas próprias, serem modeladas probabilisticamente, apresentando o PMC uma parte dedicada à definição das mesmas.

O presente artigo pretende seguir a aplicação desta metodologia da análise probabilística à avaliação do comportamento à flexão de vigas de madeira maciça de pinho bravo (*Pinus pinaster* Ait.). Para o efeito, seguiram-se os passos já delineados.

As vigas foram classificadas visualmente, obtendo-se a informação *a priori* sobre as suas propriedades de referência. Foram, ainda, seccionadas em zonas de madeira limpa e de madeira com defeitos, sendo estas últimas condicionantes para o comportamento mecânico das vigas. Foram executados TND e TSD por forma obter a informação *a posteriori* sobre as propriedades das vigas e, por fim, estas foram sujeitas a ensaios destrutivos, para determinação da sua resistência à flexão.

Em paralelo com o trabalho experimental, foi desenvolvida uma rotina em *Visual Basic* (VBA), em *Microsoft Excel*, que controla todo o processo de combinação da informação *a priori* e *a posteriori*, bem como a modelação e análise por elementos finitos das vigas no *SAP2000*, nas sucessivas simulações de Monte Carlo. As simulações permitem obter a resistência à flexão de cada viga modelada e, assim comparar o desempenho destas com o desempenho das vigas reais.

Com o trabalho desenvolvido, espera-se validar o uso deste tipo de análises na avaliação de segurança das estruturas em serviço.

## 2. TRABALHO EXPERIMENTAL

### 2.1. Material

Os ensaios foram realizados sobre 33 vigas de pinho bravo, que se podem dividir em 3 classes dimensionais. Na Tabela 2, encontra-se indicado o número de elementos de cada classe, a qualidade de acabamento e uma indicação acerca da presença de descaio nos elementos.

| Dimensões (mm <sup>3</sup> ) | Número de elementos | Qualidade de acabamento | Presença de descaio |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| 3000 × 160 × 77              | 13                  | Tosco                   | Significativa       |
| 2650 × 100 × 70              | 10                  | Aparelhado              | Pouco significativa |
| 2250 × 100 × 42              | 10                  | Tosco                   | Inexistente         |

Tabela 2. Resumo de características das vigas ensaiadas

As vigas foram condicionadas e ensaiadas no ambiente padrão definido na norma EN 408 [6], que estabelece uma temperatura ambiente de  $20 \pm 2$  °C e uma humidade relativa de  $65 \pm 5$  %.

**2.2. Avaliação e classificação visual – informação a priori**

A norma que rege a classificação visual do pinho bravo para estruturas é a NP 4305 [7]. Esta admite duas classes para o pinho utilizado em estruturas, uma correspondente os elementos de melhor qualidade, com defeitos pouco significativos, a classe EE, e a classe E, para elementos de qualidade mais baixa. Por esta norma, os elementos que não satisfaçam os critérios da classe E são considerados inadequados para uso estrutural, convencionando-se, neste artigo, atribuir-se a estes uma terceira classe, R.

Na Tabela 3 encontra-se sumarizada informação resultante da classificação visual, onde se faz a correspondência das classes visuais com as classes de resistência que constam da norma EN 338 [4]. Como as classes de resistência atribuídas, obtém-se a informação a priori necessária para a análise probabilística: os valores médios do módulo de elasticidade à flexão,  $E_{m,0,50}$ , e da massa volúmica,  $\rho_{0,50}$ , parâmetros fulcrais na definição das distribuições de probabilidades a priori destas propriedades.

Por sua vez, os valores de resistência à flexão,  $f_m$ , não foram atribuídos, neste artigo, diretamente de acordo com as classes de resistência, tendo sido obtidos de maneira distinta, explicada mais adiante.

| Classe Visual         | EE                                 | E     | R    |      |
|-----------------------|------------------------------------|-------|------|------|
| Número de elementos   | 4                                  | 13    | 16   |      |
| Classe de resistência | C30                                | C18   | C14  |      |
| Propriedades          | $f_{m,k}$ (MPa)                    | 30    | 18   | 14   |
|                       | $E_{m,0,50}$ (MPa)                 | 12000 | 9000 | 7000 |
|                       | $\rho_{0,50}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 460   | 390  | 350  |

Tabela 3. Classificação das vigas de pinho e respetivas propriedades de referência [4]

As vigas foram ainda caracterizadas e os seus defeitos identificados, nomeadamente em relação à inclinação do fio, ao descaio e à localização e dimensão dos nós. Estes últimos constituem o defeito que mais significativamente afeta o desempenho dos elementos de madeira, tendo sido considerados os responsáveis pela diminuição das propriedades de resistência à flexão da madeira limpa. Assim, as vigas foram divididas em zonas sãs, que são zonas de madeira limpa de defeitos, e zonas fracas (*weak zones* - WZ) correspondentes às zonas com nós considerados significativos, com dimensões superiores a 15 mm. De forma expedita, define-se que a resistência à flexão nas WZ,  $f_{mWZ}$  (eq. 1), será dependente da resistência à flexão madeira limpa,  $f_m$ , e de um coeficiente,  $k_{knot}$ , dependente das dimensões do nó mais relevante de cada zona fraca.

$$f_{mWZ} = f_m \cdot k_{knot} \tag{1}$$

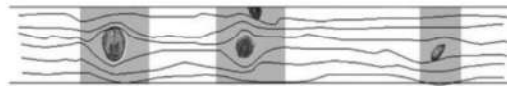


Figura 1. Elemento de madeira com zonas fracas associadas a nós relevantes (imagem adaptada de [8])

**2.3. Testes não e semi-destrutivos – informação a posteriori**

Os testes não e semi-destrutivos realizados nas vigas de pinho foram os seguintes:

- Ensaio de pré-carga das vigas em ensaios de flexão de 4 pontos, realizados de acordo com a norma EN 408 [6], com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade global das vigas,  $E_{m,g}$ . Para a definição da carga a aplicar foi seguida a norma EN 14081-2 [9];



- Realização de 5 leituras do tempo de propagação de ondas de choque num mínimo de duas zonas de madeira limpa de cada viga. Foi utilizado um método indireto de leitura [8], em que as sondas foram colocadas na mesma face, a distâncias de 40 ou 30 cm, dependendo das dimensões das zonas limpas selecionadas para as leituras;
- Extração de duas carotes de zonas limpas distintas de cada viga, para previsão da massa volúmica. As extrações foram feitas na face de compressão das vigas. Os orifícios deixados pela caroteadora foram remendados com buchas de madeira;
- Leituras do teor de água em todas as vigas, com recurso a um humidímetro de agulhas. Estas leituras permitiram fazer a correção do módulo de elasticidade à flexão para o valor de referência de 12 %, de acordo com a norma EN 384 [10].



Figura 2. Ensaio com ondas de choque (esquerda) e medição de carote extraída (direita)

O cálculo do módulo de elasticidade dinâmico,  $E_{dyn}$  é efetuado através da expressão (2), que para além das cinco velocidades de propagação das ondas de choque ( $V_i$ ), depende, ainda, dos valores de massa volúmica estimadas a partir das duas carotes extraídas ( $\rho_{c,j}$ ).

$$E_{dyn} = \frac{\sum_{i=1}^5 V_i^2 \cdot \sum_{j=1}^2 \rho_{c,j}}{10} \tag{2}$$

Esta propriedade apresenta uma elevada correlação com o módulo de elasticidade global das vigas (na Figura 3 verifica-se que foi obtido um coeficiente de determinação,  $r^2 = 0,76$ ), mostrando ser um adequado estimador do módulo de elasticidade em flexão das vigas, o que valida o seu uso, nos métodos Bayesianos, para a correção do valor obtido *a priori* para esta propriedade.

As massas volúmicas estimadas a partir das carotes extraídas permitem, por sua vez, a correção do valor inicialmente atribuído para a massa volúmica, pela alocação das classes de resistência.

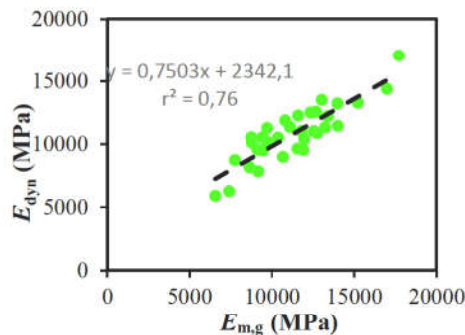


Figura 3. Relação entre os valores obtidos de  $E_{m,g}$  e de  $E_{dyn}$  para as 33 vigas de pinho

Os TND e TSD descritos são facilmente aplicáveis em obra e permitem obter indicações sobre propriedades intrínsecas dos elementos de madeira.

#### 2.4. Ensaio destrutivo das vigas – determinação da resistência à flexão

Os ensaios destrutivos das vigas até à rotura foram realizados nas mesmas condições que os ensaios de pré-carga, ou seja, em ensaios de flexão de 4 pontos segundo a norma EN 408 [6], com o objetivo de determinar o valor de resistência à flexão.

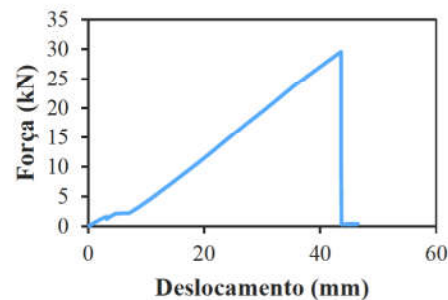


Figura 4. Viga durante ensaio (esquerda) e gráfico deslocamento-força resultante (direita)

Através da força máxima suportada pelas vigas, a tensão resistente à flexão é calculada, sendo sempre admitido o comportamento elástico da madeira até à rotura.

Os valores de resistência à flexão obtidos são os limites que as vigas modeladas por elementos finitos terão de respeitar nas  $N$  simulações de Monte Carlo para estarem do lado da segurança. Nas simulações em que ultrapassem esta tensão admissível,  $\sigma_{adm}$ , o modelo sobrestima a capacidade de carga real da viga e, nesse caso, considera-se que houve ocorrência de rotura.

### 3. MODELAÇÃO DAS VIGAS DE PINHO

Todo o processo da modelação e simulação das vigas de pinho, desde a criação dos modelos de elementos finitos das vigas no *SAP2000*, atribuição de propriedades ao material com base na informação *a priori* e *a posteriori*, à verificação da sua capacidade resistente à flexão é controlado pela rotina criada em VBA no *Excel*.

A criação dos modelos em *SAP2000* resulta em vigas que se dividem em zonas limpas intercaladas com zonas de nós, zonas fracas (WZ), de acordo com a classificação que foi feita em cada uma das 33 vigas. A modelação das vigas foi efetuada com elementos finitos do tipo viga fina, de dois nós. Na Figura 5, é possível ver a concretização do modelo de uma das vigas ensaiadas. As áreas delimitadas na foto pelas linhas a vermelho correspondem às WZ, que no modelo correspondem aos elementos representados a verde.

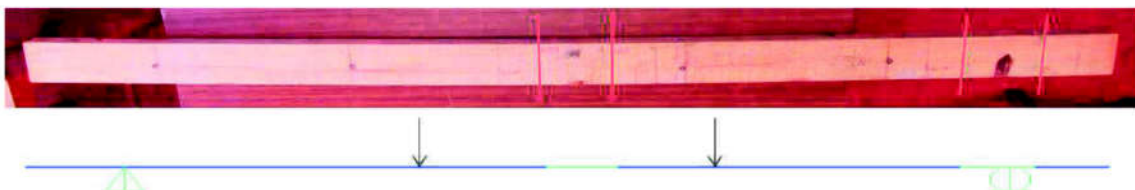


Figura 5. Correspondência entre viga ensaiada e o respetivo modelo de elementos finitos

De seguida, são explicados os conceitos que levam à atribuição de propriedades à madeira das vigas em cada simulação (à madeira limpa e às WZ).



### 3.1. Combinação de informação – geração das propriedades de referência

O PMC [3] apresenta os modelos probabilísticos para o módulo de elasticidade à flexão,  $E_m$ , e para a massa volúmica,  $\rho$  (Tabela 1). As distribuições que regem estas propriedades podem ser escritas, de uma forma geral, como  $E_m \sim LN(M_E, N_E)$  e  $\rho \sim N(M_\rho, N_\rho)$ , em que se assume que a precisão é conhecida (definida pelo valor do coeficiente de variação, CoV) e que os parâmetros  $M$ , referentes à média, são variáveis aleatórias. Nesta situação, a conjugada natural para a função de máxima verosimilhança é a distribuição normal.

Os parâmetros *a priori* podem ser combinados com as observações *a posteriori* através da expressão (3), por forma a fornecer o parâmetro da média da distribuição *a posteriori*,  $m''$ .

$$m'' = \frac{m'.n' + m.n}{n' + n} \tag{3}$$

Onde  $m'$  representa o valor médio assumido para a distribuição *a priori*,  $n'$  representa o número de observações assumidas para a distribuição *a priori*,  $m$  representa a média dos resultados observados que constituem a informação *a posteriori* e  $n$  o número de observações. A partir das distribuições *a posteriori*, os pares de  $E_m$  e  $\rho$  são gerados. O PMC sugere uma correlação de 60% entre os valores de  $E_m$  e  $\rho$  [3].

Por sua vez, os valores de resistência à flexão da madeira limpa,  $f_m$ , são gerados a partir da sua relação com  $E_m$ , tendo sido utilizado uma reta de regressão para obter os valores de  $f_m$  em cada simulação,  $f_{m_i}$ , a partir dos valores gerados de módulo de elasticidade,  $E_{m_i}$ .

Na Figura 6, apresenta-se a reta resultante de testes de flexão feitos em vigas de pinho, de tamanho estrutural, de classe EE. Nestes testes, foi obtido um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,28$  entre o módulo de elasticidade local,  $E_{m,local}$ , e a resistência à flexão,  $f_m$ . Os valores de  $\mu_{f_m}$ ,  $\sigma_{f_m}$ ,  $\mu_{E_m}$  e  $\sigma_{E_m}$  representam os valores esperados e os desvios padrões obtidos para  $f_m$  e  $E_{m,local}$  e permitem obter a equação geral da reta de regressão utilizada no modelo para determinar  $f_{m_i}$  (eq. 4), em que  $r$  representa o coeficiente de correlação.

$$f_{m_i} = \mu_{f_m} + r \frac{\sigma_{f_m}}{\sigma_{E_m}} (E_{m_i} - \mu_{E_m}) \tag{4}$$

A relação constitutiva admitida considera um comportamento elástico e linear para toda a gama de tensões, sendo que a rotura se verifica sempre à tração (Figura 6).

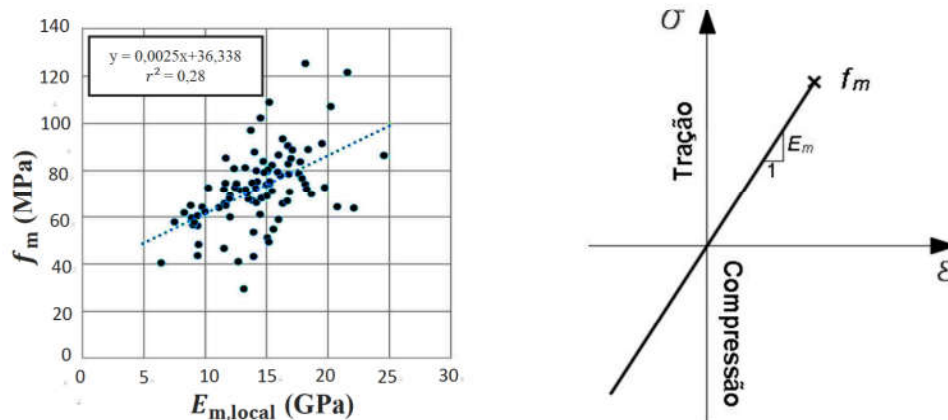


Figura 6. Reta de regressão resultante do estudo à flexão de vigas de tamanho estrutural de classe EE (esquerda) e relação constitutiva admitida para o material (direita)

### 3.2. Resistência à flexão das zonas fracas

Cada zona fraca das vigas, WZ, é caracterizada pelo nó que foi considerado mais restritivo para o comportamento em flexão das vigas (nó de maiores dimensões, situado na zona de tração da secção transversal).

Pela expressão (1) tem-se que a resistência à flexão das WZ são dependentes da resistência à flexão das zonas limpas e de um coeficiente  $k_{\text{knot}}$ , dependente das dimensões do nó mais penalizador, em cada WZ, para o comportamento da viga à flexão (tomado como o nó de maiores dimensões).

A abordagem utilizada para definir  $k_{\text{knot}}$  foi baseada na norma ASTM D245 – 06 [11], que permite definir duas expressões para o coeficiente, consoante os nós se apresentam na face ou no canto, sendo  $x$  o coeficiente entre o diâmetro do nó e a largura da face/canto da secção transversal (5).

$$k_{\text{knot}} = \begin{cases} -99,37x + 100,39 & (\text{nó no canto}) \\ 98,618x^2 - 202,08x + 102,98 & (\text{nó na face}) \end{cases} \quad (5)$$

### 3.3. Simulação das vigas

Cada simulação de Monte Carlo começa com a atribuição dos pares de valores de  $E_m$  e  $\rho$  às vigas, bem como a subsequente atribuição da capacidade resistente à flexão aos segmentos de madeira limpa e às WZ,  $f_m$  e  $f_{mWZ}$ , respetivamente. Posteriormente é executada a análise estrutural do modelo, em que é determinada a capacidade resistente dos modelos,  $\sigma_{\text{modelo}}$ . O critério de segurança, expresso por (6), dita que a “rotura” é atingida sempre que o modelo preveja uma tensão resistente superior à registada nos ensaios destrutivos,  $\sigma_{\text{adm}}$ .

$$\frac{\sigma_{\text{modelo}}}{\sigma_{\text{adm}}} \leq 1 \quad (6)$$

A probabilidade de rotura,  $P_r$ , pode ser definida como a razão entre o número de simulações em que a rotura é atingida,  $N_r$ , e o número total de simulações realizadas,  $N$  (eq. 7).

$$P_r = \frac{N_r}{N} \quad (7)$$

Pretende-se, com as simulações, obter probabilidades de rotura iguais ou inferiores a 5 %, garantindo, assim, que o valor de resistência à flexão das vigas não é ultrapassado em 95 % das simulações, analogamente ao que é feito na definição dos valores característicos das propriedades resistentes dos materiais.

## 4. RESULTADOS

O módulo de elasticidade em flexão dos elementos de madeira é, em geral, um bom indicador da resistência à flexão. Este mesmo facto foi confirmado pelos resultados dos ensaios destrutivos (Figura 7), tendo-se verificado uma boa correlação entre estas duas propriedades,  $r = 0,72$  ( $r^2 = 0,52$ ). A mesma situação também se verifica nos resultados provenientes da modelação das vigas, atingindo uma correlação apenas um pouco inferior,  $r = 0,70$  ( $r^2 = 0,49$ ), apesar de o desempenho geral das vigas modeladas ser governado pelas dimensões dos nós de maiores dimensões registados em cada zona fraca.



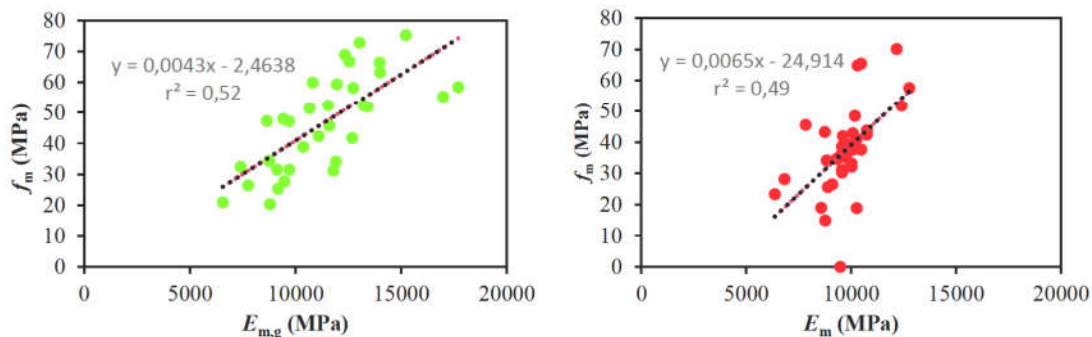


Figura 7. Retas de regressão obtidas entre  $E_m$  e  $f_m$  dos ensaios destrutivos das vigas de pinho (esquerda) e da modelação (direita)

A comparação dos resultados obtidos para o valor esperado de resistência à flexão das vigas modeladas com as suas resistências reais indica que o modelo forneceu valores de lado da segurança na maioria das situações, sendo que apenas para cerca de 5% das vigas o valor esperado para a resistência superou o valor real ( $> 0$ , Figura 8). Por outro lado, pela Figura 7 é possível constatar que houve uma viga para a qual a capacidade resistente prevista pelo modelo é de  $f_m = 0$ . Tal acontece porque uma das WZ contém um nó que ocupa toda a largura da face de tração o que, de acordo com a definição utilizada para obter  $k_{knot}$ , corresponde a um valor de zero para este coeficiente nesta WZ, o que envolve admitir que a viga não tem qualquer capacidade resistente à flexão.

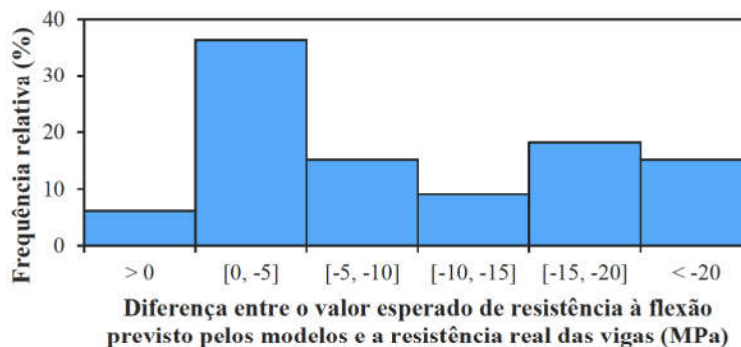


Figura 8. Histograma representativo da diferença entre os valores esperados de resistência à flexão previstos pelos modelos de e os valores de resistência reais das vigas

Em relação à probabilidade de rotura obtida após as simulações, os resultados obtidos demonstram uma grande variabilidade, com uma média de  $P_r = 11\%$  e um coeficiente de variação,  $CoV = 1,9$ . Em termos absolutos, verifica-se que para 22 das vigas analisadas as simulações resultaram em probabilidades de rotura abaixo dos 5%. No entanto, para 13 destas não se verificou qualquer rotura, pois o modelo sobrestima bastante a capacidade resistente das vigas. Para estas existe, ainda, uma reserva de resistência que não é explorada, sendo o efeito dos nós sobrevalorizado. Nos restantes casos, a probabilidade de rotura resulta em valores acima dos 5%, sendo que duas apresentam probabilidades de rotura acima dos 50%.

### 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos da aplicação do método proposto para avaliação de segurança das vigas de pinho em serviço permitem concluir ser:



- Possível obter uma boa previsão do módulo de elasticidade e da massa volúmica das vigas de madeira maciça, permitindo uma avaliação conservativa quanto ao estado limite de utilização;
- Complicada a tarefa de avaliação da tensão de rotura á flexão, atendendo à maior dificuldade de estimar o efeito dos nós no comportamento das vigas.

Os resultados assim obtidos demonstram a necessidade de proceder a estudos mais aprofundados sobre o efeito redutor dos nós nas propriedades da madeira limpa de defeitos. Este estudo, previsto no âmbito do projeto ProTimber, permitirá obter um fator de redução ( $k_{\text{knot}}$ ) mais fiável.

## 6. AGRADECIMENTOS

À Fundação para a Ciência e Tecnologia, agradece-se a apoio e financiamento prestado no projeto "ProTimber - Avaliação Probabilística de Estruturas de Madeira em Serviço" - PTDC/ECM-EST/1072/2014.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] EN 1995-1-1:2004, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [2] H. Cruz, D. Yeomans, E. Tsakanika, N. Macchioni, A. Jorissen, M. Touza, M. Mannucci e P. B. Lourenço, "Guidelines for the on-site assessment of historic timber structures," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 9, nº 3, pp. 277-289, 2015.
- [3] JCSS, "Probabilistic Model Code Part III: resistance models (3.5 Properties of timber)," 2006.
- [4] EN 338, "Structural Timber. Strength Classes," Brussels, European Committee for Standardization, 2009.
- [5] EN 1991-1-1, Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings, 2009.
- [6] NP 4305, "Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual," Instituto Português da Qualidade, 1995.
- [7] J. Machado e P. Palma, "Non-destructive evaluation of the bending behaviour of in-service pine timber structural elements," *Materials and Structures*, vol. 44, pp. 901-910, 2011.
- [8] R. D. Brites, J. S. Machado e P. B. Lourenço, "Avaliação das propriedades mecânicas da madeira in situ por ensaios de mesoprovetes," em Proceedings of the 8th Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Universidade do Minho, Portugal, 2012.
- [9] EN 14081-2:2010+A1:2012-en, "Timber structures; Strength graded structural timber with rectangular cross section; Part 2: Machine grading; additional requirements for initial type testing," Brussels, European Committee for Standardization, 2013.
- [10] EN 384, "Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density," Brussels, European Committee for Standardization, 2016.
- [11] EN 408, "Timber structures - structural timber and glued laminated timber - determination of some physical and mechanical properties," Brussels, European Committee for Standardization, 2010.
- [12] ASTM Standard D245 - 06, "Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber," West Conshohocken, PA, ASTM International, 2011.