

Propriedades mecânicas de madeira degradada por caruncho em edifícios antigos: uma análise experimental

Sandra Mendes¹, Dulce Franco Henriques^{1,2,*} , Maria do Carmo Alves¹

¹ ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 Lisboa, Portugal

² CERIS – Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

*mfhenriques@dec.isel.pt

Resumo

O presente texto estuda a perda de propriedades físico-mecânicas de madeira de pinho de edifícios antigos (100 a 200 anos) degradada por caruncho pequeno (*Anobium punctatum*, De Geer) e pretende contribuir para a avaliação da segurança de elementos estruturais de edifícios degradados. Quando se trata de degradação por caruncho pequeno, o efeito da degradação pode ser considerado assumindo a redução das propriedades da secção transversal, pois as galerias formadas no interior da madeira estão normalmente envoltas por uma quantidade considerável de madeira sã. No presente estudo foi desenvolvida uma nova metodologia para estimação qualitativa dos níveis de degradação, a qual se mostrou promissora. Foram depois correlacionados com resultados de ensaios de compressão paralela às fibras em provetes com 30×30×90 mm: tensão de rotura, módulo de elasticidade e extensão em fase plástica. Verificou-se que, mesmo para níveis relativamente elevados de degradação, a perda de propriedades é pequena ou moderada.

Palavras-chave

Madeira
Caruncho pequeno
Massa volúmica
Níveis de degradação
Resistência mecânica
Módulo de elasticidade

Mechanical properties of timber deteriorated by beetles in ancient buildings: an experimental analysis

Abstract

The purpose of this study is to analyse the loss of physical-mechanical properties of pine wood from old buildings (100 to 200 years old) deteriorated by wood boring beetle (*Anobium punctatum*, De Geer) and aims to contribute to the safety assessment of structural elements in buildings. The effect of degradation can be considered by assuming the reduction of cross-section properties in case of *Anobium punctatum* degradation, since the galleries formed within the wood are usually surrounded by a considerable amount of sound wood. In this study, a new methodology was developed for qualitative estimation of degradation levels, which was promising. They were then correlated with results of compression tests parallel to the fibers in specimens with 30×30×90 mm: compressive strength, modulus of elasticity and plastic extension. It has been found that, even at relatively important levels of degradation, the loss of properties is small to moderate.

Keywords

Wood
Boring beetles
Levels of degradation
Density
Mechanical strength
Modulus of elasticity

ISSN 2182-9942



Introdução

As madeiras estruturais são frequentemente degradadas por caruncho, designação comum a diversos insetos xilófagos de ciclo larvar completo [1]. Em contraste com a degradação por fungos ou por térmitas subterrâneas que ocorre em madeiras com teores de água elevados e como tal, com maior incidência em madeiras de exterior ou em zonas localizadas das construções [2-3], a infestação por caruncho ocorre sobretudo em madeiras secas de interior de edifícios (14-18 % de teor em água). Este facto pode conduzir a uma deterioração generalizada da estrutura de madeira, sobretudo de cobertura e de pavimento [2-5]. Há, no entanto, casos em que os carunchos toleram níveis bastante elevados de teor em água e há mesmo casos de algumas infestações graves associadas a problemas de humidade [5].

O caruncho degrada a madeira durante a sua fase larvar, abrindo uma rede de galerias que se cruzam entre si no interior da madeira, essencialmente no borne [1]. Esta forma de degradação é do tipo mecânico, provocando perda de material nas zonas consumidas, mantendo-se não degradado o restante material que as envolve [6-8]. Essa redução de massa acarreta sempre perda de resistência mecânica dos elementos, por redução de características como a massa volúmica, módulo de elasticidade, resistência à compressão, à flexão e à tração [3, 6].

Há que avaliar, então, a gravidade do ataque, o qual depende do tipo de caruncho em causa, já que a quantidade de alimento ingerido (dimensão das galerias) varia consoante o inseto específico [8]. Essa avaliação pode ser feita com recurso a métodos não destrutivos de ensaio [6, 9-10]. A degradação por caruncho pode dar-se numa camada periférica do borne, muitas vezes de pequena espessura, sendo possível definir uma secção efetiva (residual) composta por madeira sã, resultante da subtração da profundidade média degradada, ao longo do elemento estrutural [4-5]. Por outro lado, pode ser do tipo difuso, encontrando-se galerias dispersas por toda a secção do elemento, essencialmente na parte do borne, com ou sem perda aparente da secção exterior do elemento. O primeiro caso está mais associado ao ataque por *Hylotrupes bajulus*, L., vulgarmente conhecido por “caruncho grande”, o qual só ataca madeiras resinosas [1], e o segundo caso está associado geralmente a ataque por *Anobium punctatum*, De Geer, vulgarmente conhecido por “caruncho pequeno”, o qual ataca madeiras folhosas e resinosas [1, 6].

São frequentes as dificuldades sentidas pela comunidade técnica na avaliação de segurança de estruturas de madeira antigas [4, 10]. Maiores dificuldades são ainda encontradas quando os elementos em causa apresentam degradação biológica [4, 7]. Para esses casos, Cruz e colaboradores indicam que deve ser considerada uma redução da capacidade resistente dos elementos estruturais degradados, pela adoção de uma de duas vias: *i*) assumindo uma redução da secção resistente, pelo estabelecimento da secção efetiva; *ii*) assumindo uma redução das propriedades resistentes da secção total

aparente, pelo estabelecimento de uma massa volúmica residual [10].

Diversos estudos têm sido realizados no sentido de relacionar a perda de material de um elemento de madeira devida ao caruncho, com as consequentes perdas de propriedades físicas e mecânicas, [2, 3, 6-7], baseando-se, em geral, na avaliação da área visível dos orifícios de saída ou das galerias em corte. No entanto, referem os seus autores não haver uma relação clara entre essa metodologia e a resistência mecânica dos provetes degradados. Também o presente estudo se centra na problemática da relação degradação/resistência, apresentando como inovação uma nova metodologia para a avaliação qualitativa dos níveis de degradação por caruncho pequeno.

Desenvolvimento experimental

O presente estudo foi realizado durante o ano de 2013, tendo sido estudados provetes de elementos estruturais degradados por caruncho pequeno, retirados de edifícios antigos. Foi avaliado o seu estado de degradação e de seguida correlacionado com a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a extensão em fase plástica. Desta

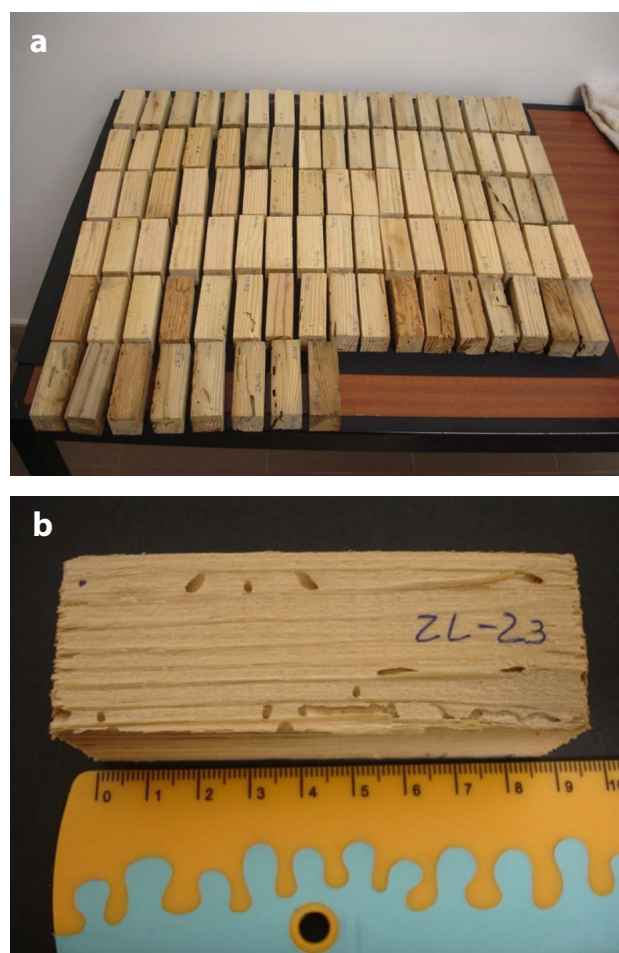
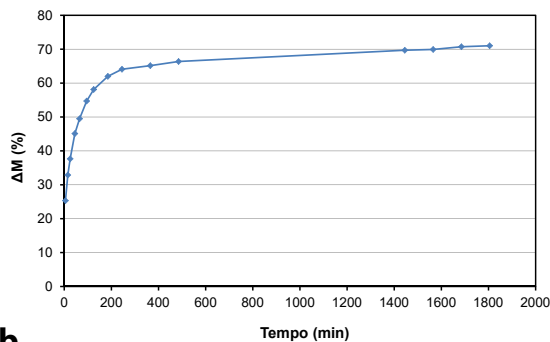


Figura 1. a) Totalidade dos provetes iniciais de ensaio. b) Provete degradado.



a



b

Figura 2. a) Ensaio de imersão. b) Variação de massa em função do tempo, do provete 2L-24.

forma pretendeu-se estudar o modo como os diferentes estados de degradação por caruncho influenciam algumas das características mecânicas das peças de madeira. O estudo foi realizado usando vigas de pinho originárias de edifícios pombalinos ou gaioleiros, dos quais não se conhece com precisão a data de construção, mas que se estima ter sido durante o século XIX, com idades, portanto, entre cerca de 100 e 200 anos.

Materiais e métodos

Provetes

Foram cortados provetes com $20 \pm 3 \times 20 \pm 3 \times 90 \pm 3$ mm de madeira de pinheiro bravo (*Pinus pinaster*, Ait.) obtidos de diversos elementos estruturais degradados por caruncho pequeno provenientes de diversos edifícios, com massas volúmicas variadas (Figura 1a). Da amostra foram selecionados provetes degradados e sãos, isentos de outros defeitos (nós, orifícios devidos a pregos, fendas, outros) (Figura 1b). Os provetes de ensaio foram mantidos em ambiente condicionado com temperatura (T) de 20 ± 2 °C e humidade relativa (HR) de 65 ± 5 %. O teor de água da amostra foi determinado, de acordo com a NP 614:1973 [11], no início da campanha experimental, situando-se em $11,3 \pm 5$ %.

Níveis de degradação

Reconhecendo que a dispersão das galerias no interior de cada provete pode não ter uma relação direta com o seu perfil visível nas faces dos provetes, entendeu-se utilizar um método expedito de aferição do nível de degradação que refletisse a área de parede das galerias interiores e, por consequência, o seu volume. Consistiu em imergir os provetes em água e medir a sua variação de massa até um período de tempo determinado, 1805 min, correspondendo sensivelmente a 30 h. Este ensaio foi realizado após ter sido retirado o serrim do interior das galerias, com auxílio de meios mecânicos e de aspiração. O ensaio de imersão foi feito em todos os provetes, sãos e degradados. Com este ensaio pretendeu-se estabelecer qualitativamente o grau de degradação dos provetes, admitindo que quanto mais degradado estivesse o provete, maior a quantidade de água absorvida, devido à maior área superficial interior exposta à penetração da água.

Para este ensaio foram construídas gaiolas em arame que permitiram prender o provete e mante-lo submerso em água dentro de recipientes (Figura 2a). Ao fim de determinados intervalos de tempo de imersão, os provetes foram pesados e voltados a imergir, com a finalidade de se conhecer a sua curva de absorção (Figura 2b).

Ensaio de compressão

Ensaio de compressão uniaxial na direção paralela às fibras foram realizados numa prensa Tecno Test C025/C do Laboratório de Monitorização Microsísmica da Área Departamental de Física do ISEL, após a estabilização do teor em água dos provetes a $T = 20 \pm 2$ °C e $HR = 65 \pm 5$ % (cerca de 60 dias). A compressão foi feita por controlo de força aplicada a uma taxa de variação de 0,5 kN/s até o limite de proporcionalidade tensão-deformação (σ - ϵ) em fase plástica ser bem ultrapassado (Figura 3a). Em cada ensaio foram adquiridos dados a uma taxa de amostragem de 1 Hz (Figura 3b).

Resultados e discussão

Níveis de degradação

Para uma melhor aferição dos níveis de degradação, aos valores percentuais de variação de massa pela imersão dos provetes degradados foram subtraídos os correspondentes valores obtidos com provetes de madeira não degradada provenientes das mesmas vigas, a fim de apenas avaliar a percentagem de água absorvida pelas paredes das galerias. Essa diferença, que representa a variação de massa devida à degradação do provete foi designada por $\Delta M_{degradação}$ e apresentou valores de 2 % a cerca de 55 %. Antes do ensaio de imersão e após a limpeza do serrim solto do interior, foi medida a massa volúmica efetiva de cada provete, segundo a NP 616:1973 [12], a qual se sabe ser, para os provetes provenientes de um mesmo elemento estrutural, tanto menor

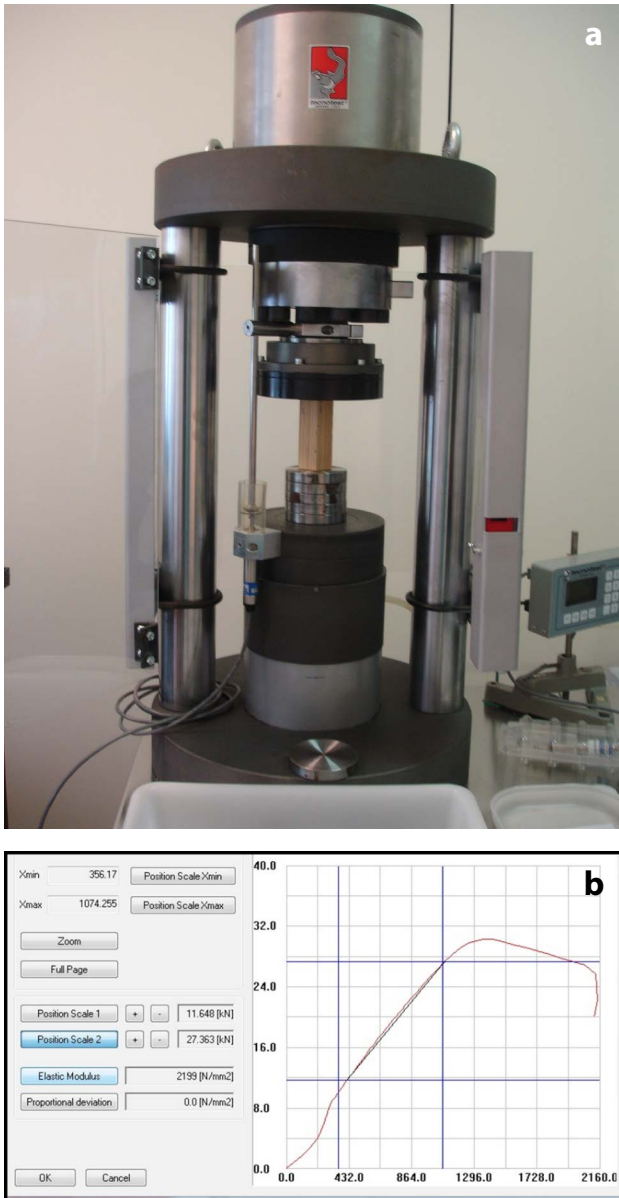


Figura 3. a) Prensa Tecno Test C025/C. b) Exemplo de um diagrama σ - ϵ .

quanto maior o seu nível de degradação [7]. Assim, como forma de aferir a metodologia, foi estabelecida a relação entre o resultado do ensaio de imersão e a massa volúmica de cada provete, para as vigas que forneceram maior número de provetes, a qual se apresenta na Figura 4. Verificou-se, de facto, uma tendência para a diminuição da massa volúmica com o aumento do nível de degradação ($\Delta M_{degradação}$), com bons coeficientes de determinação, traduzidos por $R^2 = 0,71, 0,80$ e $0,95$. Estes resultados foram encorajadores para prosseguir com os ensaios mecânicos.

Resistência à compressão paralela às fibras

Os valores da tensão de rotura por compressão foram analisados viga a viga e também no seu conjunto, excluindo-se alguns resultados francamente anómalos. A Figura 5 apresenta as correlações obtidas entre os valores

de resistência à compressão e o nível de degradação / massa volúmica, para três vigas.

Verificam-se razoáveis correlações entre parâmetros para as vigas R e H+B3+U, não havendo correlações para a viga J. Por outro lado, observa-se que a diferença entre as tensões de rotura dos provetes com diferentes graus de degradação não é muito significativa, variando menos de 10 MPa nas duas vigas em que há correlação e menos de 5 MPa na viga J. Esta variação de resultados pode-se dever ao facto de as amostras serem muito pequenas. Assim, com a finalidade mais ampla de analisar a relação entre a resistência à compressão paralela às fibras e a massa volúmica para o conjunto dos provetes, agruparam-se estes por intervalos de níveis de degradação ($\Delta M_{degradação} = 0-20\%$, $20-35\%$ e $35-55\%$), tendo-se obtido o diagrama que se apresenta na Figura 6.

Ao criar uma amostra profundamente heterogénea, por conter madeira proveniente de diferentes elementos

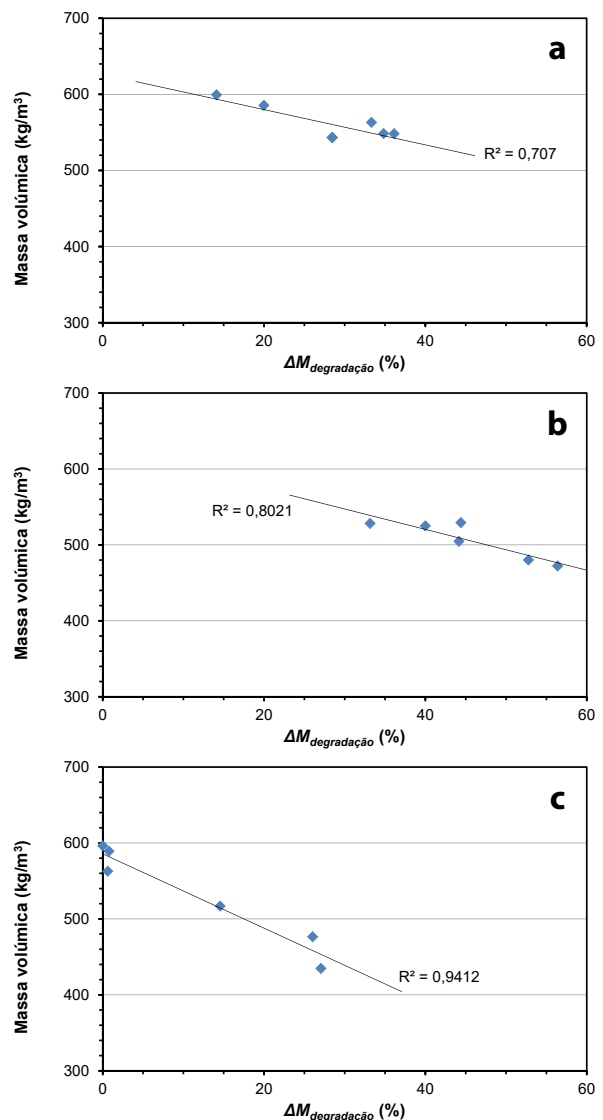


Figura 4. Relação entre a massa volúmica e o nível de degradação, para três vigas: a) viga R; b) viga J; c) viga H+B3+U.

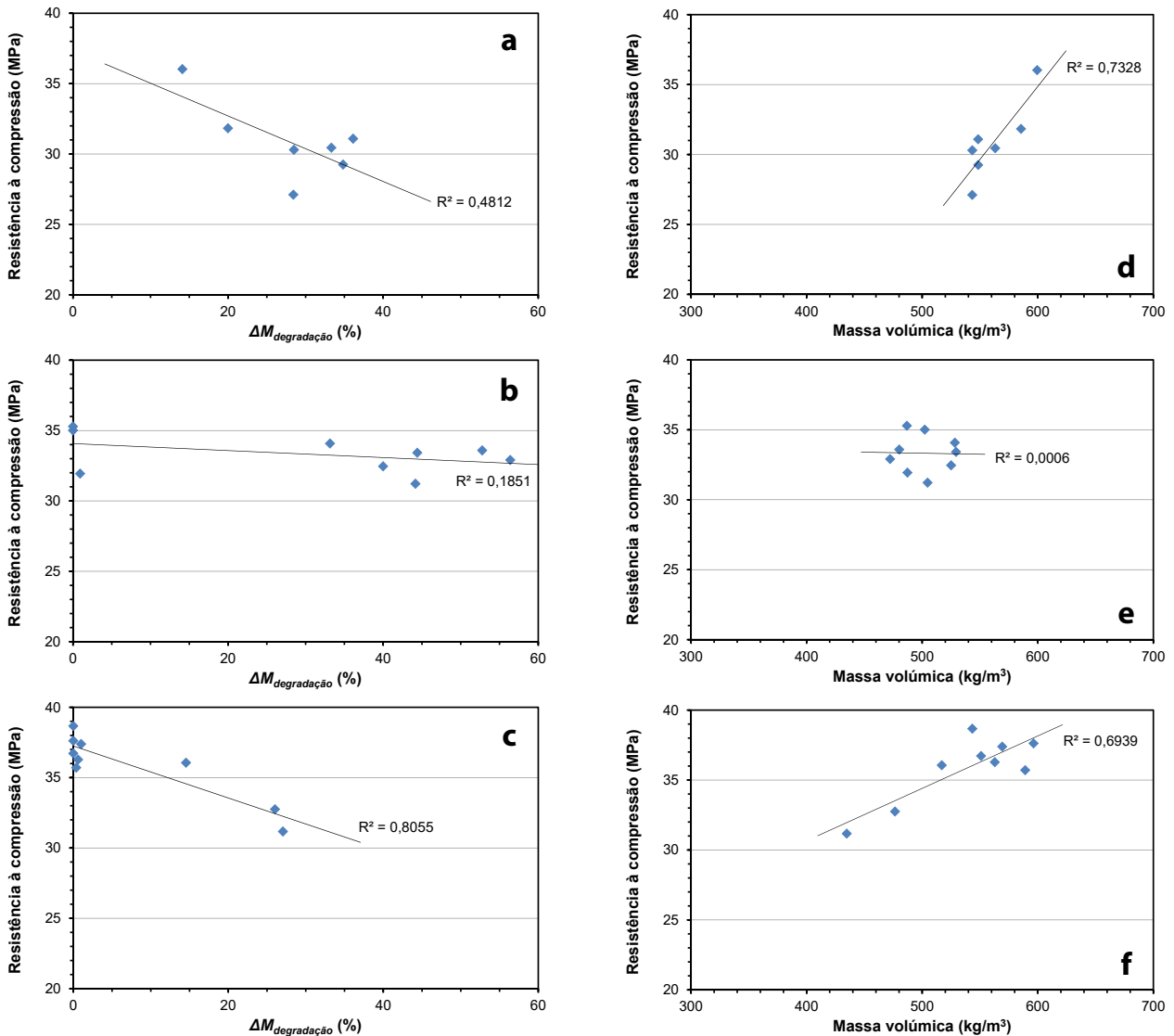


Figura 5. Relações entre a resistência à compressão e o nível de degradação e entre a resistência à compressão e a massa volúmica, para as vigas R (a, d), J (b, e) e H+B3+U (c, f).

estruturais, com diferente idade e história de serviço, era expectável uma redução acentuada da correlação entre parâmetros de análise. No entanto, verificou-se existir uma relação linear, com um razoável coeficiente de determinação ($R^2 = 0,60$) entre a massa volúmica e a resistência à compressão paralela às fibras. Pode-se observar, no conjunto de todos os provetes, uma tendência para o aumento da resistência à compressão com o aumento da massa volúmica, situação essa comum em madeira sã. Por outro lado, a dispersão de resultados observados à luz do nível de degradação estimado é relativamente baixa, verificando-se forte tendência de aos níveis de resistência à compressão mais baixos e mais altos corresponderem os níveis de degradação estimados pela presente metodologia respetivamente, maiores e menores.

Estes resultados encontram-se em linha com um estudo efetuado no LNEC por Cruz e Machado em que foi comparada a massa volúmica com a resistência à compressão de provetes degradados por caruncho,

divididos por três intervalos de níveis de degradação, em que foi verificado que, apesar haver alguma dispersão entre as amostras de níveis de degradação diferentes, as que tinham maior massa volúmica apresentavam maior resistência mecânica [7]. A Figura 7 mostra alguns dos resultados obtidos nesse estudo.

Deformação em fase plástica

O diagrama-tipo de tensão-deformação obtido durante um ensaio de compressão paralela às fibras em provetes de madeira isenta de defeitos apresenta um comportamento elástico-linear seguido de uma fase de deformação residual sensivelmente em patamar (comportamento inelástico não linear) [13-14]. O patamar representa a deformação que a madeira admite sofrer por micro encurvadura plástica das fibras no plano de rotura. Este comportamento ilustra um modo de rotura dúctil, típico da madeira quando sujeita a compressão axial. Apresentam-se na Figura 8a, como

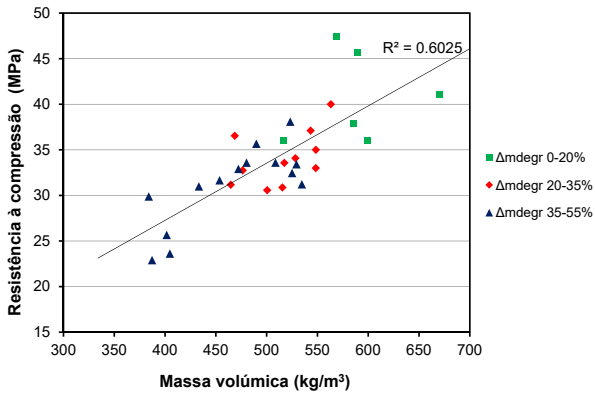


Figura 6. Relação entre resistência à compressão paralela às fibras e a massa volúmica para uma amostra constituída por provetes de todas as vigas.

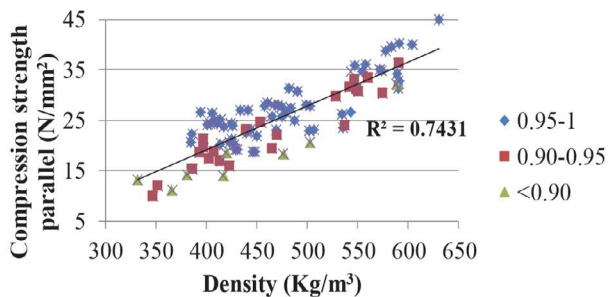
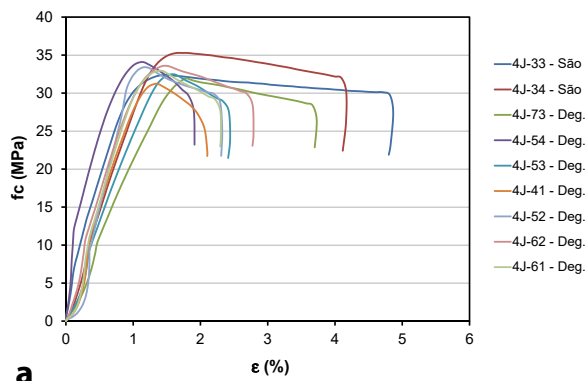


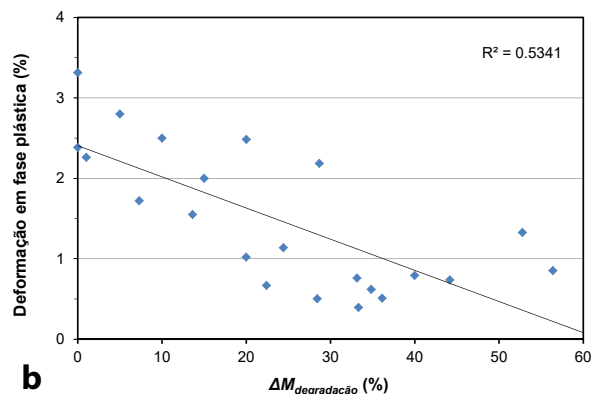
Figura 7. Relação entre resistência à compressão paralela às fibras e a massa volúmica em estudo de Cruz e Machado [7].

exemplo, os diagramas de σ - ϵ obtidos pelos provetes da viga J, organizados por ordem crescente de degradação. Relacionando os valores da deformação em fase plástica com o nível de degradação dado por $\Delta M_{degradação}$ para uma amostra integrando provetes de todas as vigas, obteve-se o resultado que se apresenta na Figura 8b. Foram excluídos os provetes que apresentaram esmagamento das fibras nas faces em contacto com os pratos da prensa.

Apesar de alguma dispersão dos resultados, verifica-se que, com o aumento do nível de degradação, há uma tendência para a diminuição da deformação residual.



a



b

Figura 8. Deformação em fase plástica: a) diagramas de tensão-deformação obtidos pelos provetes da viga J; b) relação com a degradação.

Este facto é concordante com o referido por Negrão e Amorim [14].

Módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras

O módulo de elasticidade foi calculado, para cada provete, tomando as duas coordenadas-limite da zona de proporcionalidade linear entre tensão e deformação, pela razão entre a diferença de valores de tensão e de deformação (Figura 3b). Na Figura 9 apresenta-se a relação entre o módulo de elasticidade em compressão e a massa volúmica de cada provete. Verifica-se grande dispersão de valores, traduzida por um coeficiente de determinação muito baixo ($R^2=0,27$). Há, contudo, uma tendência para os provetes com maior massa volúmica e também menor grau de degradação apresentarem maior módulo de elasticidade.

Conclusões

A nova metodologia desenvolvida neste estudo para aferição qualitativa do nível de degradação dos provetes degradados por caruncho revelou-se coerente com os valores da massa volúmica dos provetes e também com os da resistência à compressão paralela às fibras, o que nos indica ser uma boa base de trabalho para investigação futura.

Verificou-se neste estudo que, apesar de alguns provetes se encontrarem bastante degradados, a variação da resistência à compressão não era significativa em relação aos menos degradados, mantendo-se os valores de tensão de rotura num patamar de valores muito próximos. Este facto pode dever-se às ligações entre fibras da madeira não terem sido grandemente afetadas pela degradação do caruncho e, assim, a madeira continuar a ter razoável capacidade de carga. Esta observação é muito importante, dando-nos orientação de que, em muitos casos, se poderão manter nos edifícios alguns elementos, ainda que degradados, em vez de se proceder à sua substituição

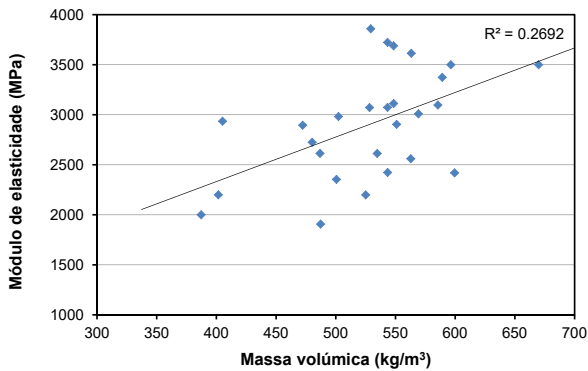


Figura 9. Relação entre o módulo de elasticidade em compressão e a massa volúmica.


exaustiva. Verificou-se, no entanto, pela observação da extensão plástica de cada provete, que quanto maior a degradação da madeira, menor a capacidade de absorver a energia que recebe, através da sua deformação plástica. Para o módulo de elasticidade a correlação de valores é fraca.

Agradecimentos

Agradecimentos pela colaboração do Laboratório de Monitorização Microsísmica da Área Departamental de Física do ISEL, na pessoa do Sr. Prof. Mário Moreira. Agradecimentos também ao IPL – Instituto Politécnico de Lisboa pelo financiamento do projeto de investigação ref.^a: IPL/2016/WOODINSITU e ao centro de investigação CERIS.

ORCID

Dulce Franco Henriques

 <https://orcid.org/0000-0003-1742-147X>

Referências

- 1 Saraiva, A. C., *Insectos da Madeira em Obra e Seu Combate*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (1957).
- 2 Gilfillan, J. R.; Gilbert, S. G., 'Development of a technique to measure the residual strength of woodworm infested timber', *Construction and Building Materials* **15**(7) (2001) 381-388, [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00004-6).
- 3 Gilfillan, J. R.; Christie, D.; Gilbert, S. G., 'The residual strength of timber degraded by woodworm infestation', in *Durability of Building Materials and Components*, ed. M. A.

Lacasse & D. J. Vanier, Institute for Research in Construction, Ottawa (1999) 714-722.

- 4 Cruz, H. 'Patologia, avaliação e conservação de estruturas de madeira', II Curso Livre Internacional de Património, Associação Portuguesa dos Municípios com Centro Histórico, Santarém (2001).
- 5 Henriques, D. F.; Nunes, L.; Cruz, H.; Brito, J., 'Diagnosis of old timber structures. The case of the future Wine Museum of Bucelas', in *International Conference Heritage 2008*, Vila Nova de Foz Côa (2008) 705-713.
- 6 Brozovsky, J.; Brozovsky, J. J.; Zach, J., 'An assessment of the condition of timber structures', *9th International Conference on NDT of Art*, Jerusalem (2008), <http://www.ndt.net/article/art2008/papers/012Brozovsky.pdf> (acesso em 2018-4-7).
- 7 Cruz, H.; Machado, J., 'Effect of beetle attack on the bending and compression strength properties of pine wood', *Advanced Materials Research* **778** (2013) 145-151, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.145>.
- 8 Cruz, H., 'Inspeção, avaliação e conservação de estruturas de madeira', in *1.ª Jornadas de Materiais na Construção*, FEUP, Porto (2011) 215-227, http://paginas.fe.up.pt/~jmc2011/wp-content/uploads/2011/03/Helena_Cruz.pdf (acesso em 2018-4-7).
- 9 Henriques, D.; Neves, A., 'Non-destructive in situ tests as support to the assessment of a conservation process', *Construction and Building Materials* **101**(2) (2015) 1253-1258, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.191>.
- 10 Cruz, H.; Yeomans, D.; Tsakanika, E.; Macchioni, N.; Jorrisen, A.; Touza, M.; Mannucci, M.; Lourenço, P. B. 'Guidelines for the on-site assessment of historic timber structures', *International Journal of Architectural Heritage* **9**(3) (2015) 277-289, <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.774070>.
- 11 *NP 614:1973 – Determinação do Teor de Água em Madeiras*, IPQ, Lisboa (1973).
- 12 *NP 616:1973 – Determinação da Massa Volúmica em Madeiras*, IPQ, Lisboa (1973).
- 13 Buchanan, A. H., 'Bending strength of lumber', *Journal of Structural Engineering* **116**(5) (1990) 391-397, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:5\(1213\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:5(1213)).
- 14 Negrão, J.; Amorim, F., *Projecto de Estruturas de Madeira*, Edições Publindústria, Porto (2009).

Recebido: 2017-3-29

Revisto: 2018-2-19

Aceite: 2018-3-18

Online: 2018-4-22



Licenciado sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional. Para ver uma cópia desta licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.pt>.