

Avaliação local da capacidade mecânica de elementos de madeira em edifícios antigos

NEVES André^{1, a} e HENRIQUES Dulce Franco^{2, b}

^{1,2} Área Departamental de Engenharia Civil Instituto Superior de Engenharia de Lisboa Rua
Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 LISBOA, Portugal

^aandreneves4@hotmail.com, ^bmfhenriques@dec.isel.ipl.pt

Palavras-chave: madeira, edifícios antigos, reabilitação, propriedades mecânicas, ensaios não destrutivos

Resumo. A manutenção e a reabilitação da madeira como material de construção dos edifícios antigos conduz necessariamente à sustentabilidade do património edificado. Além disso, reabilitar permite ainda conservar o valor histórico e artístico dos edifícios, um bem não recuperável. É neste sentido que importa avaliar o estado de integridade e capacidade mecânica da madeira existente nos edifícios e proceder à sua conservação / consolidação / reforço, em função do uso futuro do edifício, dando especial importância às palavras – Reduzir, Reutilizar e Reciclar. É necessário, portanto, encontrar formas de reconhecimento de características mecânicas da madeira em uso.

O texto apresenta um estudo de correlação entre a resistência mecânica da madeira antiga de Casquinha, *Pinus sylvestris* L., obtida em laboratório por ensaios destrutivos e não destrutivos, com a mesma obtida *in situ* por ensaios não destrutivos. Através dos equipamentos *Resistograph*® e *Pilodyn*®, pretende-se estimar a capacidade mecânica local da madeira em uso, baseada nas correlações encontradas laboratorialmente para propriedades de referência da madeira, apresentando-se para o efeito um caso de estudo.

Apesar da grande variabilidade de resultados obtidos, foi possível encontrar uma linha coerente de valores de propriedades para os elementos de madeira analisados.

Introdução

Problemas ambientais e sustentabilidade, a grande luta do século XXI. A tendência, hoje, é de garantir um desenvolvimento sustentável, para o qual o segmento da construção muito pode contribuir. A utilização de madeira por exemplo, além de recurso renovável, permite uma poupança energética desejada devida ao seu bom comportamento térmico. Como componente estrutural pode manter a integridade dos edifícios por vários séculos. Se as condições ambientais forem adequadas, pode ser vista como um dos materiais da construção mais duráveis, uma vez que o fator tempo, por si, não produz depreciação das suas características [1, 2, 3, 4].

Contudo, quando as condições ambientais o potenciam, a ação de agentes biológicos pode ser condicionante para as condições de serviço, sendo comum encontrar elementos degradados em edifícios antigos. Se por um lado, alterações relacionadas com agentes atmosféricos, como a luz solar ou a precipitação, apenas provocam variações estéticas nas peças de madeira, por outro, o ataque de agentes biológicos, como fungos, insetos, bactérias e organismos marinhos, muitas vezes potenciado pela humidade, pode conduzir a perdas de massa irreversíveis e como consequência, à incapacidade estrutural dos elementos [5, 6, 7].

Torna-se então essencial conhecer as reais condições de serviço das madeiras presentes nos edifícios, não só por questões de segurança, mas pela incontornável necessidade de preservar o património histórico ou artístico de um país, conservando técnicas construtivas e elementos decorativos não mais recuperáveis. Em Lisboa por exemplo, técnicas utilizadas no período

pombalino (1755 -1870), de extrema qualidade e de detalhes excepcionais, são hoje impossíveis de reproduzir, em grande parte pelo desaparecimento de mão-de-obra especializada. Aliada à preservação do património insubstituível, encontra-se a possibilidade de recuperar estruturas antigas, conseguindo muitas vezes a remodelação de espaços nos grandes centros urbanos e potenciando uma poupança significativa de recursos.

Neste sentido, considera-se que a reabilitação de estruturas, em especial as de madeira, apresenta grande repercussão ao nível da sustentabilidade. A não substituição de elementos de madeira com capacidade estrutural, a recuperação de peças mediamente degradadas ou a substituição de partes de alguns elementos, são possibilidades que irão evitar o gasto de recursos na substituição de madeiras antigas e no transporte e aplicação de novas madeiras.

É de referir que a rigorosa identificação do estado de conservação das estruturas obrigaria à utilização de técnicas destrutivas (TD), com a recolha de carotes para ensaios laboratoriais. Contudo, essa solução apresenta-se inadmissível na maioria dos casos e o recurso a inspeções visuais e a técnicas não destrutivas (TND) é a opção largamente definida [8, 9, 10, 11, 12].

Vários estudos têm vindo a ser publicados nesta área [13, 8, 14, 15, 16], caminhando-se para a obtenção de maior quantidade de informação conseguida por técnicas não destrutivas. Pretende-se assim que, em harmonia com a procura de informação como a idade e a história do edifício, seja possível fazer uma caracterização real do estado de conservação do elemento avaliado através de técnicas não destrutivas.

Desta forma, e com base numa inspeção visual preliminar que permita ter uma noção geral do problema e estabelecer um plano de inspeção detalhado consequente, que seja adequado ao tipo de construção e ao seu estado geral, espera-se ser possível, pela utilização de equipamentos como o *Resistograph*® e o *Pilodyn*®, conhecer *in situ* propriedades como a massa volúmica, a resistência à compressão ou a dureza superficial.

É com este propósito que se expõe o presente estudo, desenvolvido para uma das espécies de madeira mais utilizadas na construção portuguesa, a Casquinha, Scots pine ou Redwood (*Pinus sylvestris* L.), pretendendo-se correlacionar medições realizadas *in situ* com o *Resistograph*® e o *Pilodyn*® com ensaios laboratoriais, demonstrando a significância e a possibilidade dessas mesmas correlações. Para o efeito, apresenta-se um caso de estudo, de um edifício nobre, datado de 1877, situado no centro de Lisboa, e com características construtivas do período pombalino.

Materiais e métodos

Provetes. Na campanha laboratorial utilizaram-se provetes isentos de defeitos com 30 x 60 x 180 mm, de borne e cerne de *Pinus sylvestris* L., para possibilitar a realização dos ensaios pretendidos. As fibras dos provetes são paralelas ao eixo da peça e os topos são planos e perfeitamente perpendiculares às faces. A amostra foi recolhida de vários edifícios, com 100 a 200 anos de história, no sentido de aumentar o espectro de massas volúmicas e idades, tentando assim representar a madeira existente nas construções lisboetas. Foram ensaiados 46 provetes com massas volúmicas entre 400Kg/m³ e 700 Kg/m³, calculadas segundo a norma NP 616:1973, quando estabilizados a 12% de teor de água, por se considerar este o valor de referência. No sentido de correlacionar as propriedades estudadas, formaram-se pares de massas volúmicas semelhantes, ensaiando-se um elemento à compressão e o outro com o *Pilodyn*® e *Resistograph*®, sendo este ainda posteriormente ensaiado à dureza estática.

Ensaios não destrutivos

Resistograph®. É um equipamento perfurador, com uma broca de diâmetro máximo de 3 mm na ponta e comprimento variável conforme o modelo comercial. A sua ação pode ser considerada não destrutiva, pois não exerce efeito negativo sobre a resistência dos elementos inspecionados. Permite a leitura de perfis de densidade das peças atravessadas, sendo estes armazenados em

memória interna ou impressos instantaneamente em tamanho real, possibilitando a sua análise a detecção de defeitos internos ou de situações de degradação.

A resistência à perfuração é registada a cada 0,04 mm e o valor médio, excluindo 2 mm a partir de cada extremidade do gráfico, fornece a medida resistográfica (MR), válida para madeira sã e isenta de defeitos. A MR é dada pela equação 1 [17, 18, 19].

$$MR = \frac{\int_0^h \text{Área}}{h} \quad (1)$$

No presente estudo utilizou-se o equipamento IML Resi-B-1280 (Fig.1 a), regulado para uma velocidade de penetração de 20 cm/min.

Pilodyn®. O seu funcionamento consiste na introdução na madeira de um pino metálico de 2,5 mm de diâmetro, por impacto com determinada energia. O seu resultado baseia-se na relação inversamente proporcional entre a profundidade de penetração e a dureza na direção transversal [20, 21]. A profundidade de penetração pode também constituir uma medida de intensidade e profundidade da degradação [22].

No presente estudo recorreu-se ao Pilodyn® 6J (Fig.1 c), cuja escala de leitura apenas permite medir profundidades superficiais (até 40mm).

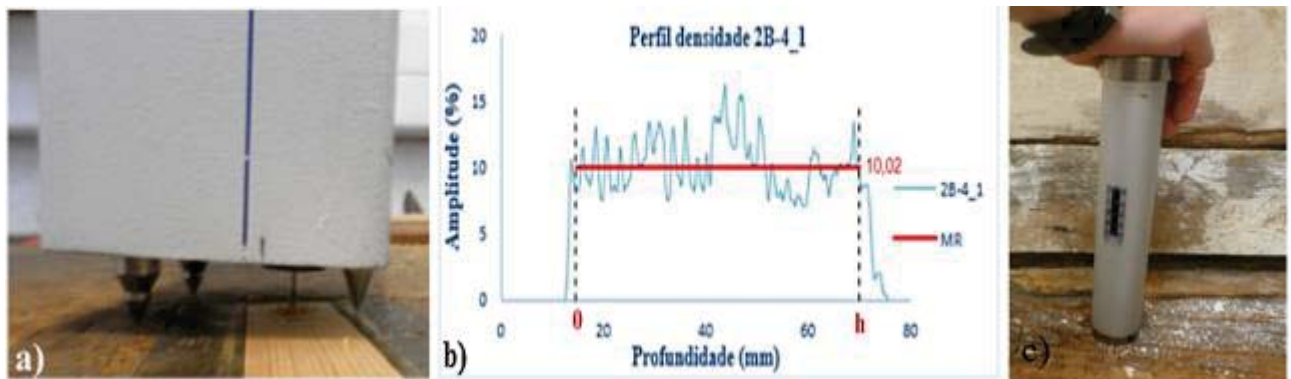


Figura 92 – a) Ensaio com Resistograph® IML Resi-B-1280; b) Tratamento de um perfil de densidade; c) Pilodyn® 6J

É de referir que vários estudos [16, 17, 14, 13] apontam para a possibilidade de correlações entre os resultados dos ensaios com *Resistograph®* e *Pilodyn®* e as propriedades mecânicas dos elementos.

Ensaios laboratoriais destrutivos

Ensaio de compressão. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NP 618:1973, pela aplicação de forças progressivamente crescentes a um ritmo constante, até atingir a rotura ao fim de cerca de 3 minutos. Recorreu-se à máquina universal *Schimatzu* (Fig.2), tendo sido os dados tratados pelo programa *Trapezium2®* e apresentados em N/mm^2 .



Figura 93 - a) Máquina de ensaio *Schimatzu*; b) Realização do ensaio; c) Após o ensaio

Ensaio de dureza estática. Os ensaios de dureza estática (Fig.3) foram realizados de acordo com a norma ISSO 3350:1975 – *Bois. Détermination de la dureté statique*, na máquina de ensaios universal AMSLER de 4000 Kg de capacidade. Utilizou-se uma esfera de raio igual a $5,64 \pm 1$ mm, cravada a uma velocidade constante de 3 a 6 mm/min, sob carga progressivamente crescente. Após a realização do ensaio, a resistência à indentação apresentou-se em N.



Figura 94 -a) Esfera de ensaio; b) Realização do ensaio; c) Após o ensaio

Caso de estudo

Apresentação do edifício. O estudo desenvolveu-se num edifício nobre datado de 1877, situado no Príncipe Real, no coração de Lisboa. Embora temporalmente fora do período pombalino, a constituição da sua estrutura teve por base técnicas desenvolvidas e aplicadas nessa época. O edifício apresenta a madeira como material de excelência, recorrendo à famosa gaiola pombalina, proporcionando assim um excelente comportamento antissísmico. De facto, desde a estrutura dos pavimentos, cobertura e escadas, às paredes mestras em frontal e aos tabiques, a madeira é o material utilizado. Existem ainda inúmeros acabamentos de valor histórico e artístico, como tetos e estuques (Fig.4), atualmente impossíveis de reproduzir, que devem por isso ser conservados.

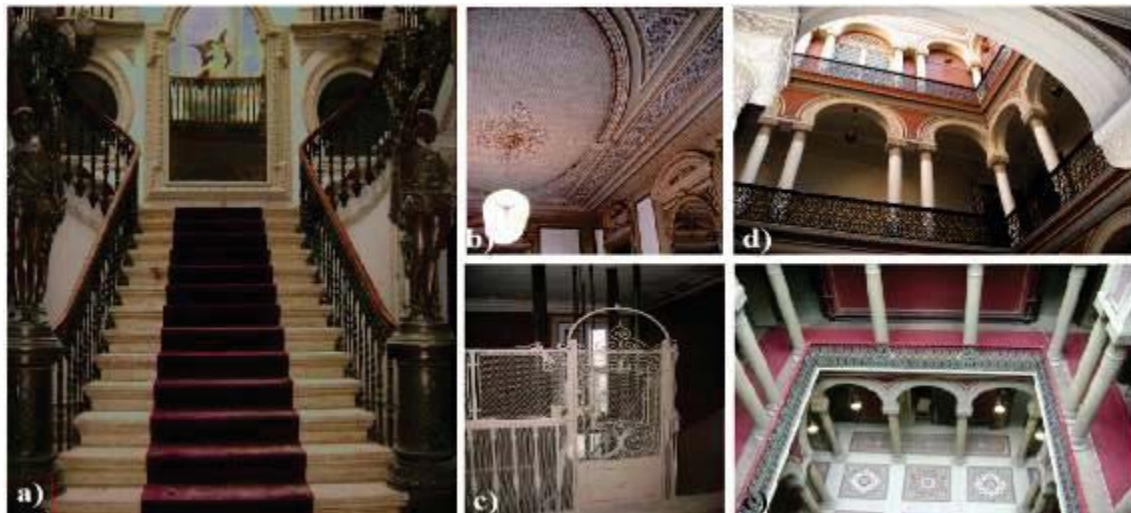


Figura 95 - a) Escadaria principal; b) Estuque de valor patrimonial; c) Elevador; d) Pormenores no Átrio; e) Átrio central

Inspeção Visual. A inspeção visual é indispensável para uma boa caracterização das patologias de um edifício, uma vez que permite identificar possíveis situações de risco. Sendo a humidade o principal fator responsável pelo ataque biológico [7], a inspeção tem início no exterior do edifício, com a pesquisa de possíveis situações responsáveis pela entrada de água, como é o caso de fissuras, fendas, telhas partidas, rebocos desagregados, entre outros indícios como a presença de vegetação ou algerozes e calceiras danificados ou entupidos [22, 8]. Os

defeitos detetados no exterior do edifício, devem depois ser seguidos no interior para avaliar o seu verdadeiro significado e respetiva importância.

Deve ainda prestar-se especial atenção a madeira na proximidade de redes de água ou esgotos e locais mal ventilados, assim como a paredes húmidas [23] e a outros indícios como deformação excessiva de tetos ou pavimentos, manchas na madeira aplicada, presença de serrim, a existência de canais de terra sobre a madeira ou aderentes às alvenarias próximas, entre outros [22].

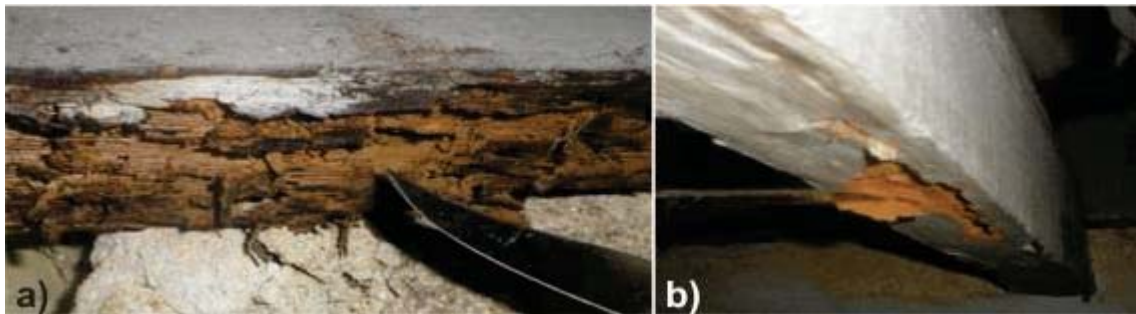


Figura 96 - a);b) Utilização de objeto cortante no auxílio à inspeção visual

Esta observação, que passa por uma análise direta da madeira, pode ser complementada pela utilização de um objeto cortante simples, como demonstrado pela figura 5. Pretende-se obter um levantamento geral da estrutura e dos seus danos, que servirá de base para um plano de intervenção, onde se definem depois os meios auxiliares a utilizar caso se justifique. No presente caso de estudo recorreu-se aos equipamentos *Pilodyn®* e *Resistograph®* como meios auxiliares de diagnóstico, pretendendo-se correlacionar os valores obtidos com os ensaios realizados na campanha laboratorial e assim estimar algumas das propriedades de referência dos elementos intervencionados.

Pontos de ensaio. Foram escolhidos três pontos de ensaio (Fig.6) de madeira não degradada, situados no último piso do edifício: costaneira de parede de tabique, troço de uma escada e viga de pavimento, para representatividade do estudo.



Figura 97 - a) Costaneira; b) Escada; c) Viga do pavimento

Discussão e análise de resultados

No sentido de estudar correlações entre variáveis, recorreu-se a gráficos de dispersão, apresentando as equações das retas de tendência e o seu valor de R^2 , o qual irá ditar a significância ou não dos resultados encontrados.

Neste sentido e indo ao encontro do estudado por outros autores [16, 17, 8, 14, 13, 24, 25, 26], foram estudadas as seguintes correlações:

- Com a medida resistográfica, MR: massa volúmica, ρ ; resistência à compressão, $f_{c,o}$; resistência à indentação, $H_{c,12\%}$;
- Com a profundidade do *Pilodyn®*: massa volúmica, ρ ; resistência à compressão, $f_{c,o}$; resistência à indentação, $H_{c,12\%}$; medida resistográfica, MR.

Sendo a madeira um material natural, apresenta por esse facto grande heterogeneidade e anisotropia, não sendo por vezes fácil a sua caracterização. Faz-se então acompanhar a

apresentação de resultados com as conclusões conseguidas por outros autores em estudos semelhantes, sempre que adequado.

Correlações com a medida resistográfica, MR.

Massa volúmica, ρ . Após a realização de uma longa campanha experimental em 100 vigas de *Pinus radiata* espanhol, Lladró et al., 2006 [16], afirmam ser possível recorrer ao Resistograph® para conhecer in situ o valor da massa volúmica com alguma fiabilidade. Por outro lado, Feio, 2006 [17], verifica uma grande dispersão de resultados, afirmando não existir correlação entre a medida resistográfica e a massa volúmica. Também Riggio & Piazza, 2011 [25], ao estudar várias espécies de madeira, indicam não ser possível estabelecer uma correlação direta entre estas variáveis, a não ser que os elementos apresentem perfis resistográficos semelhantes nas diferentes secções em estudo.

Já Machado & Cruz, 1997 [13], ao estudarem madeira de Pinho bravo, afirmam que, embora o Resistograph® não permita estimar com rigor a massa volúmica de elementos estruturais, para alguns casos fornece uma aproximação significativa. Num estudo semelhante, Henriques, 2011, após ensaiar um grupo de 67 provetes, concluiu existir uma boa correlação entre estas variáveis, apresentando um valor de $R^2=0,87$.

Os resultados obtidos com o presente estudo não foram tão significativos, contudo, apontam igualmente para a existência de correlação entre as variáveis, conforme se verifica na figura 7.

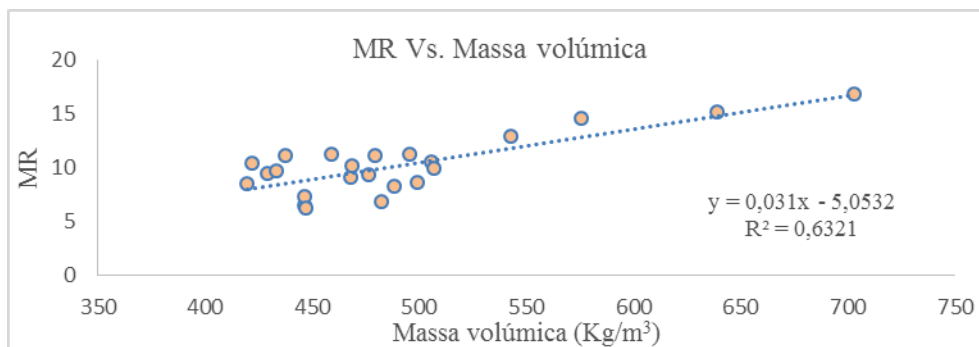


Figura 98 - Gráfico MR Vs. Massa volúmica

Chama-se a atenção para o facto de a amostra ter sido recolhida de vários edifícios e apresentar uma gama alargada de idades e massas volúmicas. Desta forma, e uma vez que mesmo com a heterogeneidade apresentada se conseguiu um resultado satisfatório comparativamente a outros estudos, considera-se existência de correlação.

Resistência à compressão, $f_{c,0}$. A correlação com a resistência à compressão parece ser mais unânime. Machado *et al.*, 2000 [27], indicam ser possível, pela utilização do *Resistograph*®, usar a medida resistográfica como indicativo para aferir a resistência à compressão da madeira sã, desde que seja por comparação.

Também Feio, 2006 [17], ao estudar a correlação destas duas variáveis para a madeira de Castanho, obteve uma correlação moderada. Contudo, chama a atenção para a variação que se verifica em função da orientação da carga e da idade da madeira. Mais tarde, Henriques, 2011 [8], ao estudar provetes de Pinho bravo e Casquinha chega a um $R^2=0,69$, apontando para a existência de correlação.

No presente estudo, encontrou-se uma correlação com $R^2=0,53$ (Fig.8). A grande heterogeneidade da amostra justifica o valor apresentado, acreditando-se que para uma amostra mais homogénea a correlação seria bastante mais representativa. Desta forma, pensa-se existir uma relação entre estas variáveis.

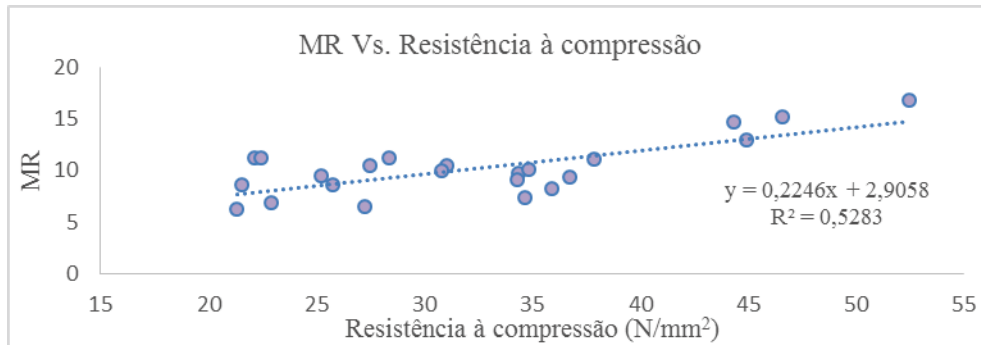


Figura 99 - Gráfico MR Vs. Resistência à compressão

Resistência à indentação, $H_{c,12\%}$. A correlação com a resistência à indentação tem sido menos estudada. Apresenta-se no gráfico da figura 9 o resultado obtido, onde se verifica a existência de correlação entre a medida resistográfica e a dureza estática, com um valor de $R^2=0,74$.

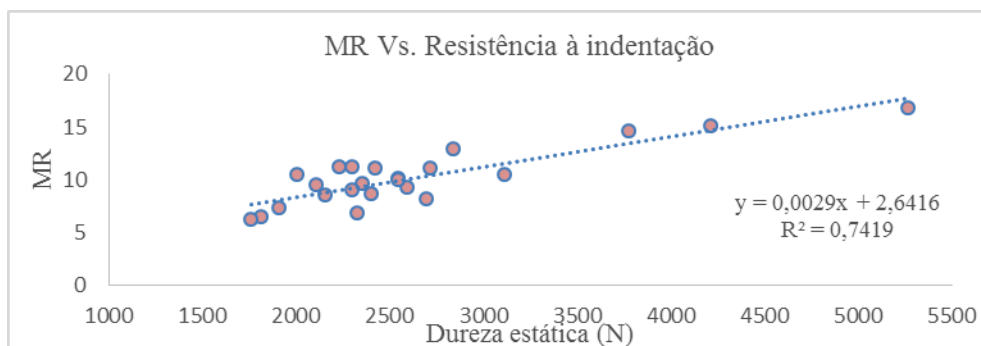


Figura 100 - Gráfico MR Vs. Resistência à indentação

Este ensaio parece ser pouco afetado pela heterogeneidade da amostra. Contudo, a comparação destas variáveis só é válida para peças isentas de defeitos, chamando-se a atenção para a variabilidade possível de resultados, caso esse fator não seja garantido. Desta forma, a extrapolação para valores *in situ*, deve ser bastante cuidada.

Correlação com a profundidade com o Pilodyn®

Massa volúmica, ρ . Parece existir um consenso no que respeita à correlação entre a profundidade atingida com o Pilodyn® e a massa volúmica. Feio, 2006 [17], afirma existir correlação para a madeira de Castanho, apresentando $R^2 \approx 0,8$. Também Henriques, 2011 [8], encontrou uma correlação com $R^2=0,8$ para madeira de Pinho bravo e Casquinha. Gorlacher [14], já em 1987, encontrou excelentes correlações entre estas variáveis, com R^2 entre 0,74 e 0,92, em função da espécie e do número de medições. Mais recentemente, Giuriani et al, 2013 [26], ao estudarem a madeira de Castanho, encontraram também correlações bastante significativas, com R^2 próximo de 0,8.

Também Branco et al., 2010 [15], apesar de terem chegado a um coeficiente de apenas 0,5 ao estudar asnas de madeira, afirmam parecer adequada uma correlação entre estas variáveis. Contudo, a correlação obtida no presente estudo apresenta um $R^2=0,54$ (Fig.10), claramente baixo comparativamente a valores obtidos por outros autores.

Chama-se no entanto a atenção para os valores de penetração conseguidos, em média na ordem de 16 mm, e por isso muito sensíveis a pequenas variações de superfície.

Resistência à compressão, f_c , o. Ao estudar madeira de Castanho, Feio [17], em 2006, não encontrou correlação entre a resistência à compressão e a profundidade registada com o ensaio do *Pilodyn*®, afirmando mesmo que não se deve considerar o valor do *Pilodyn*® como indicador quantitativo da resistência à compressão.

Por outro lado, Henriques, 2011 [8], encontrou uma correlação moderada entre estas variáveis, onde cerca de 60% dos valores de uma variável são explicados pela outra, justificando assim nova investigação.

Neste estudo, embora se verifique uma tendência, representada no gráfico da figura 11, não é possível estabelecer correlação entre as duas variáveis.

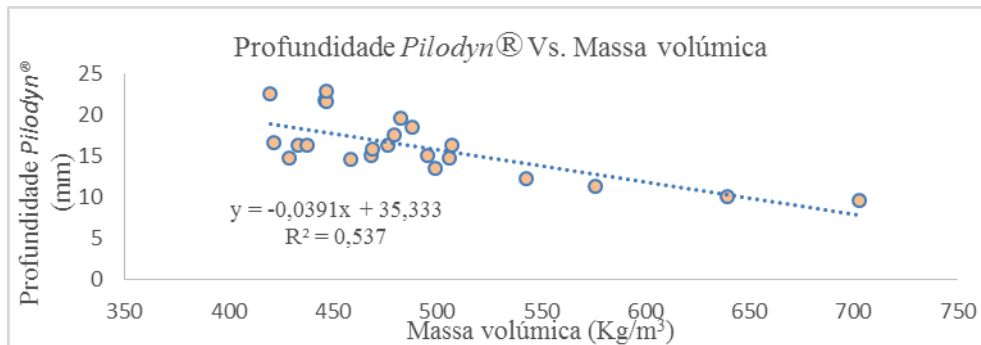


Figura 101 - Gráfico Profundidade *Pilodyn*® Vs. Massa volúmica

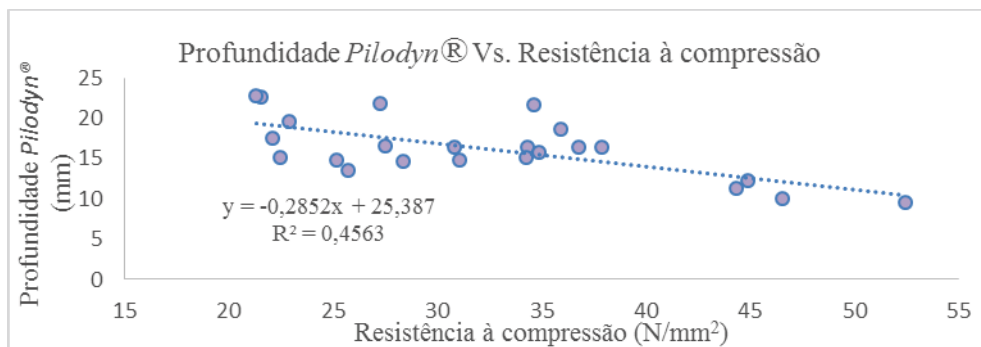


Figura 102 - Gráfico Profundidade *Pilodyn*® Vs. Resistência à compressão

A elevada sensibilidade deste aparelho a pequenas variações de superfície, aliada à heterogeneidade da amostra justificará o valor encontrado.

Resistência à indentação, H_c , 12%. No gráfico da figura 12 apresenta-se a relação entre a profundidade de penetração do *Pilodyn*® e a resistência à indentação, existindo uma correlação moderada entre as variáveis, com um valor de $R^2=0,57$.

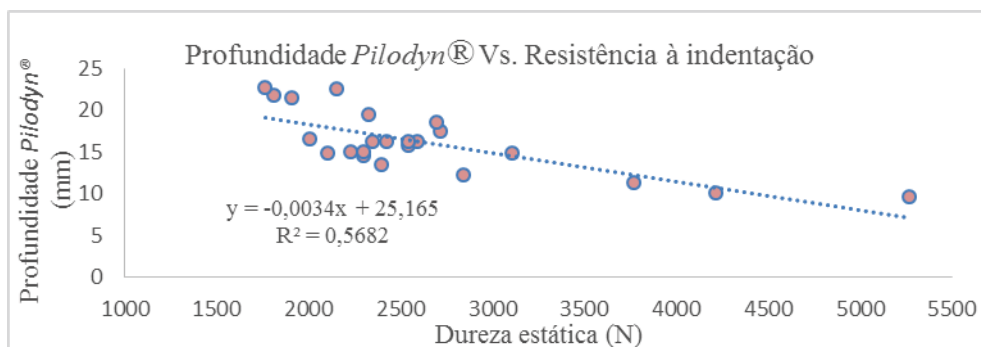


Figura 103 - Gráfico Profundidade *Pilodyn*® Vs. Resistência à indentação

O facto de a profundidade atingida ser baixa e por isso, muito sensível a pequenas alterações de superfície, remete para o cuidado na extrapolação destes dados para madeira aplicada em edifícios. No entanto, uma vez que ambos os ensaios medem a dureza superficial da madeira, e

sendo um, um ensaio laboratorial destrutivo e o outro um ensaio não destrutivo de aplicação *in situ*, será lógica a sua comparação.

Medida resistográfica, MR. Avalia-se neste ponto a relação existente entre os ensaios não destrutivos realizados. Sendo um facto relevante a diferença de profundidades atingida pelos mesmos, a sua comparação será apenas válida para madeira isenta de defeitos.

Henriques, 2011 [8], ao estabelecer a mesma comparação para madeira de Pinho bravo e Casquinha, chegou a um valor de $R^2=0,74$. No presente estudo, chegou-se um valor ligeiramente superior, $R^2=0,76$ (Fig.13), e para uma amostra muito mais heterogénea, o que se considera bastante promissor.

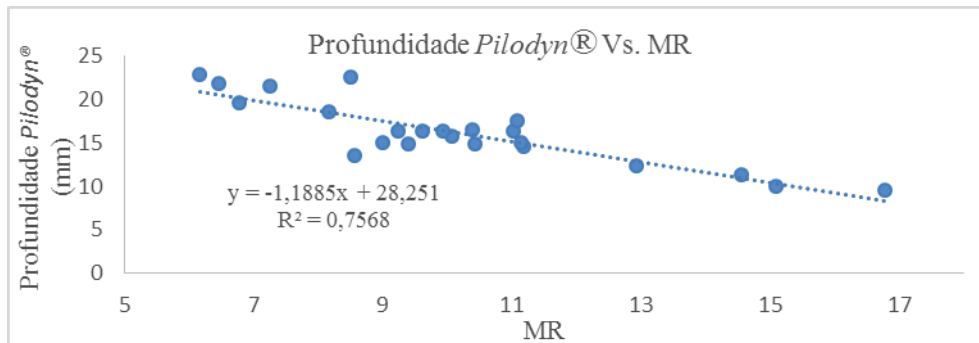


Figura 104 - Gráfico Profundidade *Pilodyn*® Vs. MR

Neste sentido, pensa-se existir um elevado grau de confiança nos resultados apresentados. Parece então adequado o uso destes dois equipamentos num processo de inspeção e diagnóstico, para que os seus resultados se complementem.

Estimar propriedades físico-mecânicas *in situ*. Pretendia-se que, em harmonia com a procura de informação como a idade e a história do edifício, fosse possível fazer uma caracterização aproximada do estado de conservação do elemento avaliado através de técnicas não destrutivas, nomeadamente através de ensaios com Resistograph® e Pilodyn®.

Apresenta-se neste tópico uma estimativa para as propriedades dos elementos analisados *in situ*, assente nas correlações estabelecidas na campanha laboratorial.

Tabela 37 - Estimativa das características em função da medida resistográfica

Propriedade	Teor de água [%]	Mr médio [20cm/min] <i>in situ</i>	Resistência à compressão, $f_{c,0}$ [N/mm ²]	Resistência à indentação, $H_{c,12\%}$ [N]	Massa volúmica [Kg/m ³]
Reta de tendência	-	-	$y = 0,2246x + 2,9058$	$y = 0,0029x + 2,6416$	$y = 0,031x - 5,0532$
Costaneira	12	13,11	45,45	3611	586
Escadas	9	11,61	38,77	3094	537
Pavimento	7	12,79	44,00	3499	575

Chama-se a atenção para o facto de as equações das retas de tendência serem estabelecidas para teores em água de 12%. Desta forma, existe ainda um erro acrescido nos valores apresentados em função das diferenças dos teores de água, pela influência que este fator apresenta [28]. De facto, apenas na costaneira se verificou um teor de água de 12%, sendo por isso os valores apresentados para este elemento os mais próximos da realidade. Assim, com base no valor médio de MR e na equação da reta de tendência da correlação, a resistência à compressão deste elemento seria de aproximadamente 45 N/mm², sendo este um valor aceitável da tensão de rotura para madeira de Casquinha de acordo com a ficha técnica M4 do LNEC [29].

Na tabela 2 apresenta-se uma estimativa das propriedades dos elementos em função do ensaio com o *Pilodyn*®.

Tabela 38 - Estimativa das características em função da profundidade com Pilodyn®

Propriedade	Teor de água [%]	Pilodyn® [mm] <i>in situ</i>	Resistência à compressão, $f_{c,0}$ [N/mm ²]	Resistência à indentação, $H_{e,12\%}$ [N]	Massa volúmica [Kg/m ³]
Reta de tendência	-	-	$y = -0,2852x + 25,387$	$y = -0,0034x + 25,165$	$y = -0,0391x + 35,333$
Costaneira	12	12,33	45,77	3774	588
Escadas	9	11,40	49,04	4049	612
Pavimento	7	16,17	32,33	2646	490

Conclui-se que para a costaneira, a correlação encontrada através do ensaio com *Pilodyn*® conduziu a um valor semelhante de resistência à compressão ao obtido com o *Resistograph*®. De facto, mesmo as estimativas das outras propriedades para este elemento, são bastante semelhantes das conseguidas através do ensaio com *Resistograph*®, em linha de conta com a existência de correlação entre os resultados destes dois ensaios. Consegue-se assim alguma confiança nos valores apresentados para teores em água próximos de 12%.

Alerta-se no entanto mais uma vez, para o facto da extrapolação de dados laboratoriais para situações reais ainda não ser um processo seguro, e por isso ter de ser feito com extremo cuidado. Desta forma, em linha com outros autores [16, 15, 8, 24], aconselha-se uma aplicação cautelosa deste método e dos seus resultados, uma vez que *in situ*, a limitação de defeitos é bastante difícil.

Conclusões

Da campanha laboratorial resultaram correlações aceitáveis para a maioria das situações estudadas. De facto, obtiveram-se valores para o fator de determinação (R^2) situados entre 0,5 e 0,6 para a maioria dos casos, podendo afirmar-se que tanto o *Resistograph*® como o *Pilodyn*® parecem ser úteis na estimativa da massa volúmica, resistência à compressão e resistência à indentação. O ensaio de dureza estática revelou-se ser o menos afetado pela heterogeneidade da amostra, apresentando-se por isso como um bom indicador da massa volúmica e das propriedades mecânicas da madeira. Parece ainda existir uma correlação forte entre os resultados dos ensaios com o *Resistograph*® e com o *Pilodyn*®, pensando-se assim que estes se possam complementar num processo de avaliação e diagnóstico.

Quanto à estimativa das propriedades dos elementos ensaiados *in situ*, com base nas correlações estabelecidas, parece conseguir-se obter valores aceitáveis para teores de humidade próximos de 12%. Contudo, embora este seja o caminho a seguir, a realidade é que a grande heterogeneidade e variabilidade da madeira ainda não o permite fazer com rigor. Deve assim continuar-se a investigação neste campo, com vista a que um dia seja possível, através de simples ensaios não destrutivos, conseguir estimar *in situ* as propriedades físico-mecânicas da madeira. Se as condições de serviço dos elementos de madeira forem estimadas com rigor, as opções de intervenção serão certamente diferentes das que atualmente são efetuadas, conseguindo-se desta forma a manutenção das madeiras estruturais por redução do risco de incerteza atualmente presente nas campanhas de inspeção e diagnóstico. Note-se o impacto económico que esta manutenção irá representar, com a eliminação de gastos em recursos desnecessários, revelando-se assim um forte contributo para a sustentabilidade na construção.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do projeto CONSERV-TIMBER (ref. EXPL/ECM-COM/0664/2012). Desejam também agradecer à empresa East-Banc proprietária do imóvel estudado, pela sua preciosa disponibilidade.

Referências

- [1] H. Cruz e L. Nunes, Madeira, in: *Materiais de Construção - Guia de utilização*, Edição: Arquitectura e vida, Engenharia e vida, p. 311, 2005.
- [2] L. Nunes, H. Cruz, A. Duarte, J. Bordado e J. Nero, Wood consolidation by impregnation with reactive polymers, *International Conference Conservation of Historic Wooden Structures*, vol. II, nº Collegio degli Ingegneri della Toscana, Florença, pp. 323-327, 2005.
- [3] R. A. Eaton e M. Hale, in: *Wood. Decay, pests and protection*, London: Chapman & Hall, 1993.
- [4] T. Highley, Chapter 13 - Biodeterioration of wood, in: *Wood handbook- Wood as an engineering*, Madison, U.S. Depart. of Agriculture, Forest Products Laboratory, 1999, p. 16.
- [5] P. Lourenço, Recommendations for the restoration of acient buildings and the survival of masonry chimney, in: *Construction and Building Materials*, nº 20, pp. 239-251, 2006.
- [6] C. Groot e J. Gunneweg, Water permeance problems in single wythe mansony walls: the case of wind mills, in: *Construction and Building Materials*, vol. 18, pp. 325-329, 2004.
- [7] C. Clausen e V. Yang, Protecting wood from mould,decay,and termites with multicompenet biocide systems, in: *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, pp. 20-24.
- [8] M. D. Henriques, Tratamento e consolidação de madeira de pinho degradada em elementos estruturais de edificios antigos, Tese apresentada ao IST para obtenção do grau de doutor em Engenharia Lisboa: IST-UTL, 2011.
- [9] A. Valle, R. Brites e P. Lourenço, Uso da perfuração controlada na avaliação de degradação da madeira em edificações antigas - estudo de caso, in: *10º Encontro Brasileiro em Madeiras. Estruturas de Madeira*, São Pedro, Brasil, EBRAMEM, 2006.
- [10] A. Feio e P. B. Lourenço, Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos - Encontro sobre a madeira e suas aplicações nobres- Bem utilizar a madeira, Braga, 2005.
- [11] M. Mannucci, Diagnosi dello stato di conservazione di strutture di legno massico e lamellare, in: *Work shop strutturaLegno*, Florença, Itália, SAIE, 2001.
- [12] B. Zombori, In situ nondestructive testing of built in wooden members, in: *NDT.net*, vol. 6, nº 3, 2001.
- [13] J. Machado e H. Cruz, Avaliação do estado de conservação de estruturas de madeira. Determinação do perfil densidade por métodos não destrutivos., in: *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, nº 42, pp. 15-18, 1997.
- [14] R. Grolacher, Non destructive testing of wood: an in situ method for determination os density, in: *Holz as Roh-und werkstoff*, pp. 273-278, 1987.
- [15] J. Branco, M. Piazza e P. Cruz, Structural analysis of two King-post timber trusses: Non-destruct. eval. and load-carrying tests, *Const. and Build. Mat.*, vol. 24, nº 3, pp. 371-383, 2010.
- [16] R. Lladró, R. Barra, J. Botelho e J. Faria, Avaliação da capacidade resistente d estruturas de madeira com recurso a ensaios in situ, in: *2º Encontro sobre patologia e reabilitação de*

- edifícios*, Porto, PATORREB, 2006, pp. 139-148.
- [17] A. Feio, Inspection and diagnosis of historical timber structure: NDT correlation and Behavior, Tese apresentada à Universidade do Minho para obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil, Braga, Portugal: Uminho, 2006.
- [18] P. Lourenço, A. Feio e J. Machado, Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlation for test results in new and old wood, in: *Const. Build. Mater.*, nº 21, pp. 139-148, 2007.
- [19] M. Morales, C. Liñán e R. Hita, Application of Non-Destructive Techniques in the Inspection of the Wooden Roof of Historic Buildings: A Case Study, in: *2º International Conference on Structural Health Assessment of timber structures*, Trento, Itália, 2013, pp. 233-242.
- [20] C. Teles e A. Valle, Wood structures: Acting before deterioration, in: *3th International Seminar on Historical Constructions 2001*, Guimarães, Portugal, Universidade do Minho, 2001, pp. 857-866.
- [21] H. Hasníková e P. Kuklík, Investigation of timber members at masaryk station in prague by non-destructive methods, in: *2º International Conference on Structural Health Assessment of timber structures*, Trento, Itália, 2013, pp. 243-249.
- [22] H. Cruz, J. S. Machado e L. Nunes, Inspeção e avaliação de estruturas de madeira - Seminário: "Estruturas de Madeira: Reabilitação e Inovação", Lisboa, 1999.
- [23] H. Cruz, Inspeção, avaliação e conservação de estruturas de madeira - 1ª Jornadas de Materiais na Construção, Porto, 2011.
- [24] J. Jasienko, T. Nowak e K. Hamrol, Selected methods of diagnosis of historic timber structures – principles and possibilities of assessment, in: *2º International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*, Trento, Itália, 2013, pp. 225-232.
- [25] M. Riggio e M. Piazza, Hardness Test, in: *In Situ Assessment of Structural Timber - State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 215-AST*, Trento, Springer Netherlands, 2011, pp. 87-97.
- [26] E. Giurini, A. Marini, S. Cominelli e A. Gubana, The Penetration Test to Evaluate Wood Decay after 20 Years Timber Structure Assessment Experience, in: *Structural Health Assessment of Timber Structures*, Trento, Itália, 2013, pp. 201-208.
- [27] J. Machado, H. Cruz e L. Nunes, Inspeção de elementos estruturais de madeira. Selecção das técnicas não destrutivas a aplicar in situ, in: *Encontro Nacional sobre Conservação e Reparação de Estruturas*, Lisboa, LNEC, 2000, pp. 15-18.
- [28] J. Machado, In situ Evaluation of the Reference Properties of Structural Timber Members. Use of Available Tools and Information, in: *Structural Health Assessment of Timber Structures*, Trento, Itália, 2013, pp. 137- 144.
- [29] J. S. Machado e G. Monteiro, Casquinha. Ficha técnica M4, Lisboa: LNEC, 1997.