

## TÓPICO 4 – Património Histórico

### Análise de pavimentos de madeira através de ensaios *in situ*. O caso dos edifícios antigos do Porto

Ilharco, T.<sup>1,a</sup>, Guedes, J.<sup>1,b</sup>, Costa, A.,<sup>2,c</sup> Paupério, E.<sup>1,d</sup> and Arêde, A.<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Porto, Portugal

<sup>2</sup>Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil - Aveiro, Portugal

<sup>a</sup> tiagoid@fe.up.pt, <sup>b</sup> jguedes@fe.up.pt, <sup>c</sup> agc@ua.pt, <sup>d</sup> pauperio@fe.up.pt, <sup>e</sup> aarede@fe.up.pt

**Palavras-chave:** Ensaios; Caracterização; Pavimentos madeira; Edifícios antigos Porto

**Resumo.** O Centro Histórico da cidade do Porto foi considerado em 1996 Património Mundial pela UNESCO, devido ao valor excepcional do local, cuja malha urbana e edifícios históricos são um testemunho notável do desenvolvimento, ao longo dos últimos mil anos, de uma importante cidade europeia. De forma a permitir que este conjunto com elevado valor patrimonial, arquitectónico, construtivo e histórico seja preservado, contrariando o gravíssimo problema de degradação do património edificado, assim como os sérios problemas sociais e o abandono por parte da população, o NCREP-FEUP tem participado em inúmeros projectos, avaliando o estado de conservação dos elementos estruturais dos edifícios (paredes em alvenaria de granito e pavimentos e coberturas em madeira) A presente comunicação focar-se-á nas estruturas de madeira destes edifícios, abordando os passos e ferramentas das fases de inspecção e diagnóstico, como o recurso a diversos ensaios não destrutivos (NDT) e a alguns ensaios semi-destrutivos.

#### 1. Introdução

A nomeação do Centro Histórico da cidade do Porto como Património Mundial pela UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) foi feita com base no critério cultural (iv), tendo este organismo considerado que o local apresenta um valor excepcional na medida em que a sua malha urbana e os seus vários edifícios históricos são um testemunho notável do desenvolvimento, ao longo dos últimos mil anos, de uma importante cidade europeia, figura 1. A escolha da UNESCO baseou-se assim no conhecimento de que um conjunto de edifícios marcantes de uma época, com características próprias e irrepetíveis transmite testemunhos valiosíssimos acerca da história da cidade e dos seus antepassados.



Figura 1. Vista aérea do Centro Histórico do Porto.

Acontece que toda a parte antiga da cidade apresenta um grave problema de degradação do património edificado, com inúmeros edifícios que necessitam de reabilitação, a que se juntam sérios problemas sociais e de abandono por parte da população, comércio e serviços, figura 2.



**Figura 2. Centro Histórico do Porto.**

É assim fundamental envidar esforços para que este conjunto característico e harmonioso de soluções arquitectónicas, sistemas e tipologias construtivos e elementos decorativos, que apresenta elevado valor patrimonial, arquitectónico, construtivo e histórico seja preservado (adaptando-se naturalmente aos parâmetros de conforto actuais) contrariando, por um lado, a degradação do património edificado e por outro, o seu abandono.

Surge então uma questão fundamental: Reabilitar sim. Mas a que custo? De facto, a premência das intervenções não deve levar a tomadas de decisão irreflectidas. Pelo contrário, estas devem-se basear numa análise cuidada das construções efectuada por técnicos especializados e sensibilizados para questões históricas, patrimoniais e sociais.

Com o objectivo de promover intervenções de reabilitação mais sustentadas, tentando seguir as recomendações preconizadas pelo ICOMOS (International Council on Monuments and Sites), o NCREP (Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património), integrado na FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) tem participado em diversos projectos, desenvolvendo numerosas inspecções e análises de estruturas e edifícios antigos, em particular no Centro Histórico do Porto. O trabalho do NCREP incide na avaliação dos elementos estruturais que, nesse tipo de edifícios, consistem basicamente em paredes resistentes de alvenaria de granito e em pavimentos e coberturas de madeira, pronunciando-se sobre o seu estado de conservação e consequentemente sobre a possibilidade de serem reabilitados. A presente comunicação focará a análise dos elementos estruturais de madeira, abordando as essenciais fases de inspecção e de diagnóstico.

A importância destas duas fases como suporte da intervenção é reforçada no texto do ICOMOS Princípios para a preservação de Edifícios Históricos em madeira: “Um diagnóstico minucioso e exacto da condição e das causas de degradação e falha estrutural da estrutura de madeira deve anteceder qualquer intervenção. O diagnóstico deve basear-se em evidências documentais, inspecção física, análise e, se necessário, medidas das condições físicas e métodos de ensaio não destrutivos”.

## **2. Edifícios do Centro Histórico do Porto**

### **2.1. Aspectos Arquitectónicos e construtivos**

Os edifícios existentes na parte antiga da cidade do Porto e em particular no Centro Histórico foram, na sua grande maioria, construídos entre os séculos XVII e XIX, tendo evoluído a partir das primitivas construções. Apresentam planta rectangular, com frente estreita e profundidade elevada e

a sua cércea é variável, sendo em média de 3 ou 4 andares e podendo chegar até aos 7, sendo os últimos normalmente resultantes de acrescentos, figura 3.



Figura 3. Fachadas principais de edifícios do Porto do séc. XIX.

As tipologias construtivas repetem-se, sendo o elemento central a caixa de escadas, pontuada por uma clarabóia, e encontrando-se as divisões voltadas para as frentes e traseiras.

Estas construções, que pertenciam normalmente ao estrato popular e burguês da população, não são características apenas da cidade do Porto, existindo um pouco por todo o país e mesmo em vários países europeus. A originalidade do Porto está em que, na parte antiga da cidade, as casas esguias representam a quase totalidade dos edifícios civis.

## 2.2. Esquemas e materiais estruturais

Os sistemas estruturais destes edifícios são muito característicos consistindo em quatro paredes principais de alvenaria de granito com função resistente, as duas fachadas e as duas empenas. As restantes paredes são de tabique, por vezes reforçadas com sistemas de escora-tirante, que melhoram o seu comportamento no plano e as ligações entre as paredes e pavimentos. Esta estrutura interna juntamente com pavimentos e coberturas de madeira, contribuem fortemente para o comportamento dos edifícios às acções verticais e particularmente às acções horizontais. Sendo assim é importante assegurar uma boa ligação entre estes elementos para garantir um bom e estável comportamento global.

Os pavimentos, que estão normalmente apoiados nas empenas, e por isso orientados paralelamente à fachada principal, consistem em vigas de secção circular, (diâmetros variáveis entre 0,15m e 0,40m) espaçadas de cerca de 0,60m e tarugadas, figura 4. Por vezes encontram-se elementos estruturais com secção rectangular, normalmente resultado de intervenções de substituição de vigamentos originais efectuadas a partir do início do séc. XX. As espécies mais utilizadas na sua construção eram o castanho, o carvalho, o pinho e o eucalipto, existindo ainda assim pavimentos executados com outras espécies de madeiras.



Figura 4. Vigamento e tarugos de um pavimento, Edifício São Domingos, séc. XIX (1856), Porto.

Por sua vez, as coberturas de madeira apresentam configurações variáveis com a dimensão do edifício. Como os vãos a vencer eram em geral inferiores a 6m, usavam-se coberturas muito simples, com asnas constituídas apenas por duas pernas e uma linha. Noutros casos eram utilizadas as asnas mais comuns, constituídas por duas pernas, duas escoras, um pendural e a linha, figura 5. Os vários elementos estruturais apresentam secção circular com diâmetros variáveis entre os 0,10m e os 0,30m e as espécies utilizadas na sua construção eram as mesmas dos pavimentos.



**Figura 5. Asna simples de cobertura de madeira do Edifício António Carneiro, séc. XX (1916), Porto.**

### **2.3. Danos estruturais comuns**

Este tipo de edifícios, nomeadamente no que diz respeito às estruturas de madeira, apresenta danos estruturais muito bem definidos.

Em relação aos pavimentos, verificam-se essencialmente dois tipos de danos: rotura por corte nas entregas das vigas nas paredes de alvenaria, devido à redução da secção por ataque de agentes bióticos (caruncho, fungos e térmitas) associado à presença de um elevado teor de humidade; rotura por flexão a meio vão das vigas, originada pela presença de defeitos e nós, fendas de secagem, redução da secção útil devido a ataques de agentes bióticos, excesso de carga devido a mudanças de uso, etc. Estas degradações, associadas à fluência natural da madeira, são normalmente responsáveis pela deformação excessiva dos pavimentos. Além desta deformação, os pavimentos podem apresentar vibração excessiva, que normalmente tem como causa um insuficiente tarugamento, a existência de secções reduzidas ou de espaçamentos excessivos entre vigas, etc.

Por sua vez, os elementos estruturais das coberturas apresentam um maior potencial de ataques por agentes bióticos, já que se encontram mais expostos aos agentes atmosféricos. Para além das roturas por corte nas zonas das entregas, semelhantes às dos pavimentos, verificam-se ataques nos elementos mais expostos das asnas e na cumeeira e madres. Verifica-se ainda a deformação de alguns elementos que, se não for tida em conta, pode contribuir para a entrada de água no edifício.

Além dos danos que normalmente se verificam nos pavimentos e nas coberturas, é importante referir um dano observado num edifício do séc. XIX, com implicações a um nível mais global, e que teve origem em alterações estruturais executadas em meados do séc. XX. Nessa época foram removidas as escadas de madeira ao nível do rés-do-chão, com o objectivo de ampliar o espaço permitindo o seu uso para comércio. Esta alteração originou um aumento de carga nos pavimentos dos vários pisos devido à remoção do apoio inferior das escadas, com a sua consequente deformação na zona da caixa de escadas. Na figura 6 é possível observar a deformação de um dos pavimentos.

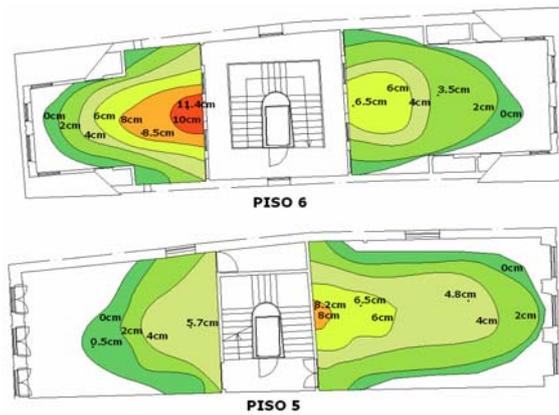


Figura 6. Deformações dos pavimentos de um edifício do largo de São Domingos devido à remoção de caixa de escadas, séc. XIX (1856), Porto.

### 3. A fase de Inspeção

#### 3.1. Introdução

A reabilitação de construções existentes implica uma metodologia que inclui as fases de Inspeção, Diagnóstico, Terapia e Controlo. As duas primeiras são essenciais para uma correcta intervenção, ajudando a definir, tanto as tecnologias como os materiais que melhor se adequam às características da construção [1]. Os resultados obtidos nestas fases aparecem normalmente no designado “Relatório de Inspeção e Diagnóstico”, que é o suporte fundamental das opções de intervenção (Terapia e Controlo), sendo um instrumento importante no processo de decisão, contribuindo para o aumento do conhecimento sobre a construção e focando as abordagens de cada área de conhecimento.

A primeira destas fases consiste então na análise detalhada da construção, que é conseguida através de uma inspeção técnica à construção existente. Esta inspeção deve ser exaustiva, procurando analisar a construção tanto ao nível global como ao nível dos pormenores, fornecendo indicações acerca das zonas críticas e dos elementos construtivos com maior necessidade de reparação [2].

Neste capítulo será abordada a fase de inspeção, sendo referidos os procedimentos e ferramentas mais utilizados, tais como os registos geométricos e fotográficos, a recolha de informação relativa à história da construção e, em especial, a inspeção visual. O recurso a meios complementares de diagnóstico, como os ensaios não destrutivos (NDT) será referido no capítulo 4. Por último, no capítulo 5 será abordado um caso de estudo de um edifício cujos pavimentos iriam ser demolidos pelo dono de obra, em que foram feitos ensaios destrutivos, com carácter particularmente académico.

#### 3.1. Trabalhos prévios à Inspeção

Os primeiros passos a dar no processo de inspeção e diagnóstico de um edifício consistem na recolha de informação acerca do objecto de estudo, de forma a conhecer o seu enquadramento histórico, arquitectónico e paisagístico. Normalmente é possível obter informação através de licenças de obra ou das plantas, nos arquivos municipais. Esta informação, juntamente com dados relativos a eventuais obras ou alterações de projecto é essencial, na medida em que pode revelar soluções construtivas e esquemas estruturais do edifício dificilmente reconhecíveis sem esse auxílio. Em alguns edifícios a consulta de projectos antigos facilitou a percepção de alterações estruturais ao projecto inicial, tendo contribuído para a resolução dos problemas existentes, figura 7.

Outro instrumento importante no conhecimento destas construções consiste na consulta de manuais antigos, que transmitem as tecnologias de construção utilizadas na época.

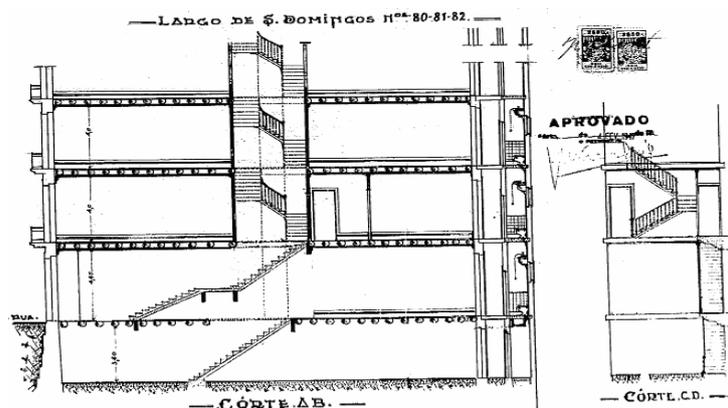


Figura 7. Projecto de remodelação do Edifício do Largo de São Domingos, séc. XIX (1856), Porto. Arquivo Histórico Municipal do Porto.

### 3.2. Inspeção visual

A inspeção visual ao edifício tem em vista dois objectivos principais:

a) Fazer o levantamento das características dos elementos estruturais, tais como dimensões e materiais das vigas dos pavimentos e cobertura, espaçamento, espessura e materiais das paredes, ligações paredes/vigas, etc., procurando compreender o seu funcionamento. A informação relativa aos materiais estruturais tornar-se-á completa com a realização de uma campanha de ensaios (destrutivos ou não destrutivos) e sondagens. A informação recolhida é normalmente apresentada através de esquemas estruturais do edifício, juntamente com cortes de secções, podendo ser utilizada para efectuar a modelação numérica do edifício ou de alguns elementos estruturais, se tal se vier a verificar necessário.

b) Fazer um levantamento detalhado dos danos ou patologias existentes nas fachadas e no interior, sendo que, mais uma vez a realização de ensaios e sondagens será primordial para completar a informação recolhida.

## 4. Meios complementares de Diagnóstico. Ensaio Não Destrutivos

### 4.1. Introdução

Existem actualmente inúmeros equipamentos que permitem avaliar, de uma forma expedita e pouco intrusiva, o estado de conservação dos elementos estruturais de madeira e inclusivamente chegar à obtenção de valores de características físicas ou mecânicas do material. Faz-se em seguida uma breve descrição de alguns destes equipamentos utilizados em ensaios não destrutivos (NDT) realizados pelo NCREP.

### 4.2. Martelo, formão e higrómetro

O martelo e o formão são instrumentos simples que permitem avaliar de uma forma expedita a existência de danos nos elementos estruturais de madeira. Através da comparação entre o som originado pelo embate de um martelo numa peça de madeira sã e numa deteriorada, é possível perceber a existência de partes degradadas (vazios, fendas, etc.). Por sua vez, com a utilização do formão é possível perceber a dureza superficial da madeira, avaliando, de uma forma expedita, a sua integridade.

Por sua vez, o higrómetro permite obter o valor do teor de humidade da madeira, contribuindo assim para a percepção do potencial de ataques de agentes bióticos. Um teor de humidade elevado

será revelador de uma deficiência na impermeabilização de fachadas ou coberturas. Desta forma, através de leituras periódicas com o higrómetro, é possível actuar de forma a eliminar entradas de água. Na inspecção de uma cobertura de um edifício do séc. XIX, a leitura de valores de teor de humidade superiores a 20% indicou a existência de entradas de água pelo telhado que foram responsáveis pela presença de ataques de agentes bióticos (caruncho). Por sua vez, nalguns pavimentos de madeira de um edifício do início do séc. XX, a presença de teores de humidade da ordem dos 18%, juntamente com deficientes condições de ventilação, foi apontada como responsável pelo aparecimento de um fungo de podridão cúbica do tipo *Serpula Lacrymans*.

### 4.3. Videoscópio

O videoscópio é um instrumento que permite observar zonas de difícil acesso ou não visíveis directamente, figura 8. Com este instrumento é possível observar, por exemplo, estruturas dos pavimentos de madeira através de pequenos buracos, aberturas ou falhas nos soalhos.



**Figura 8. Utilização do videoscópio para visualização de um pavimento do Palácio de Belomonte, séc. XVIII, Porto.**

No caso particular do Palácio de Belomonte, um imponente edifício do séc. XVIII onde funciona a Escola Superior Artística do Porto e que necessitava de reabilitação, o videoscópio foi um precioso auxílio, já que possibilitou a observação do vigamento de um dos pavimentos, tendo-se inclusivamente verificado a existência de perfis metálicos de reforço e de ataques de agentes bióticos. Com esta visualização, foi possível concluir, sem danos para a estruturas, que não era necessário proceder a reforços de vigas, optando-se apenas por preconizar um tratamento curativo contra insectos xilófagos.

### 4.4. Resistograph

Em diversos pavimentos e coberturas de madeira utilizou-se o Resistograph (modelo E300), um instrumento que relaciona a energia dispendida pela penetração de uma agulha com a resistência da madeira à perfuração, figura 9. O facto de realizar perfurações quase imperceptíveis e sem qualquer influência na resistência mecânica da peça faz com que seja um dos instrumentos mais utilizados na inspecção de estruturas de madeira.

De forma a garantir a adaptação à maioria das estruturas de madeira, utilizou-se uma agulha com 300mm de comprimento, tendo-se adoptado uma velocidade de penetração de 5cm/minuto.

Através das leituras com o Resistograph é possível detectar variações de densidade ao longo das secções dos elementos estruturais e podridões/vazios/defeitos internos. Os resultados obtidos são de interpretação simples e proporcionam informação qualitativa de grande interesse, já que fornecem um registo desenhado da variação da resistência da madeira à perfuração.

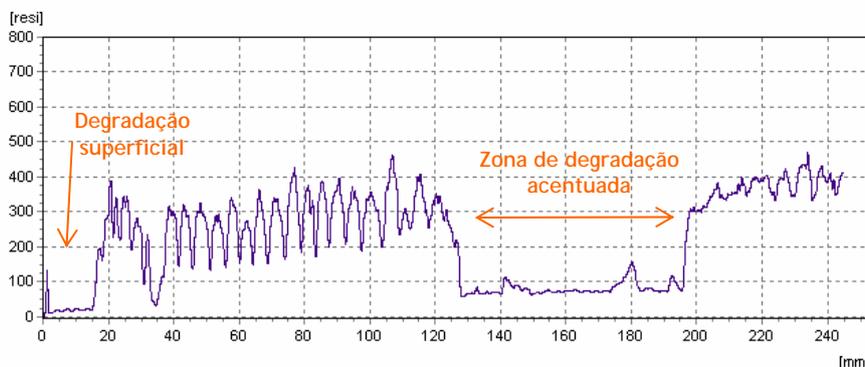


**Figura 9. Utilização do Resistograph para avaliação da integridade de elementos estruturais de escadas de madeira, Edifício São Domingos, séc. XIX (1856), Porto.**

No entanto, existem grandes limitações na sua utilização para a obtenção de valores quantitativos, uma vez que os estudos experimentais existentes são apenas para algumas espécies e nem todas as correlações existentes entre os resultados obtidos pelo Resistograph e as características mecânicas ou físicas da madeira são boas. Ainda assim, a característica que apresenta melhor correlação é a massa volúmica, sendo possível obter um perfil de variação radial desta ao longo da perfuração, nomeadamente, as diferenças de densidade entre o lenho inicial (ou de primavera) e o lenho final (ou de Outono), assim como as já referidas perdas de densidade devido a degradações/vazios [3].

Com este instrumento foi possível verificar, por exemplo, que os pavimentos e escadas de madeira de um edifício do séc. XIX (1856) situado no largo de São Domingos se encontravam em excelente estado de conservação, não necessitando de reforço.

Por sua vez, na cobertura do Palácio de Belomonte, com cerca de 300 anos de idade, foi possível descobrir um vazio interior na entrega da linha de uma das asnas que, em algumas zonas, chegava a atingir metade da secção. Foi feita a avaliação da extensão da degradação ao longo do comprimento dos elementos, permitindo estimar o comprimento de uma futura prótese a instalar, [4]. Na figura 10 é possível observar a saída de resultados do Resistograph, sendo visíveis as degradações/vazios existentes no perfil radial de uma das peças perfuradas e os anéis de crescimento. Como se pode observar, a informação qualitativa é muito útil, já que transmite a extensão do vazio existente ao longo da secção.



**Figura 10. Resultados obtidos com o Resistograph em linha de uma asna do Palácio de Belomonte, séc. XVIII, Porto.**

Para obter valores quantitativos é necessário efectuar um tratamento estatístico dos dados, chegando a um valor médio, que se designa correntemente por Valor de Resistograph (VR). Em seguida, e se tal for aplicável para a espécie de madeira em questão, recorre-se a um dos vários estudos existentes que correlacionam este valor (VR), com propriedades mecânicas da madeira

obtidas através de ensaios laboratoriais, tais como a densidade ou massa volúmica ( $\rho$ ), tensão de rotura na direcção do fio ( $f_m$ ) e módulo de elasticidade na direcção do fio ( $E_0$ ).

Apesar de, como já se referiu, algumas correlações, particularmente para os parâmetros mecânicos ( $f_m$  e  $E_0$ ) serem baixas, existem alguns níveis de correlação aceitáveis. Por exemplo, [3] chegou a uma correlação  $R^2 = 70,09\%$  entre a massa volúmica da madeira e o valor de Resistograph para a espécie de *Pinus radiata*.

#### 4.5. Pilodyn

Outro instrumento normalmente utilizado na inspecção de pavimentos e coberturas de madeira designa-se Pilodyn e apresenta um funcionamento semelhante ao Esclerómetro utilizado para o betão, figura 11. Enquanto o primeiro mede a profundidade de penetração de uma agulha disparada contra a madeira através de uma mola, o segundo mede o ressalto de uma massa projectada contra a amostra de betão através de uma mola.

O objectivo deste instrumento é chegar a parâmetros físicos da madeira, como a densidade, a partir de correlações com a dureza superficial, ou seja, com a resistência à penetração superficial da madeira.

É um equipamento muito utilizado na determinação prévia do aparecimento de doenças através de medições periódicas, no estabelecimento de classes e categorias de resistência entre diversas espécies de madeira e no estabelecimento de parâmetros de produtividade relativo à densidade da madeira entre diversas espécies [5].



**Figura 11. Utilização do Pilodyn para avaliação do estado de conservação de elementos estruturais de um pavimento de madeira, Edifício António Carneiro, séc. XX (1916), Porto.**

Nas estruturas inspeccionadas procurou-se detectar a existência de defeitos, associando a redução de resistência da madeira à penetração da agulha. Foram feitas medições em diversos pontos do mesmo elemento estrutural (meio vão e entregas) e entre diferentes elementos estruturais para que, com um número alargado de elementos ensaiados, fosse possível fazer uma análise comparativa e concluir acerca da integridade dos vários elementos. De referir que, devido ao baixo número de correlações existentes, para as espécies avaliadas, não foi possível chegar a valores quantitativos, tendo sido apenas possível concluir qualitativamente acerca do estado de conservação dos elementos de madeira.

A maioria das correlações existentes entre os valores obtidos por este equipamento e as propriedades da madeira relaciona apenas a dureza superficial e a densidade, o que acaba por ser uma desvantagem deste equipamento. De referir que uma grande parte dos ensaios demonstrou que o teor de humidade afecta consideravelmente a profundidade de penetração, sendo por isso importante avaliar correctamente o teor de humidade na altura das leituras.

[6] obteve bons coeficientes de correlação ( $r^2 = 0.74-0.92$ ) entre a densidade e a profundidade de penetração do Pilodyn, para um número de medições elevado. Por sua vez, [5] chegou a alguns valores de correlações para a densidade, módulo de elasticidade e resistência para a espécie de castanho (*Castanea Sativa*, Mill), sendo que para a densidade, a correlação média é aceitável. No

entanto, tanto para o módulo de elasticidade, como para os valores de resistência,  $f_c$ , 90, a correlação encontrada é baixa, e o autor não aconselha a sua utilização como medida quantitativa.

[7] propôs relações empíricas correlacionando a força de impacto e o módulo de elasticidade, adoptando um factor de redução para o módulo de elasticidade baseado na classificação visual dos elementos: 80% para elementos sem defeitos e 50% para elementos com nós e pequenas partes degradadas.

#### 4.6. Sismógrafos

Os sismógrafos são instrumentos utilizados frequentemente pelo NCREP na inspecção de pavimentos de madeira de edificios antigos. Para os ensaios de medição de vibração ambiental são normalmente utilizados dois sismógrafos com 18 bits de resolução, figura 12, que possuem acelerómetros em três direcções, permitindo obter os registos de acelerações nessas direcções, que são depois transferidos para um computador onde pode ser realizada a análise dos sinais recolhidos.



Figura 12. Sismógrafo utilizado pelo NCREP.

As leituras são normalmente efectuadas em diferentes locais dos pavimentos e a partir dos registos de acelerações de cada estação são calculadas as correspondentes densidades espectrais de potência e que fornecem as frequências próprias de vibração do pavimento. Por sua vez, a leitura das frequências próprias permite estimar a rigidez dos pavimentos e consequentemente o seu estado de conservação.

#### 4.7. Ensaio de Carga

Os ensaios de carga permitem avaliar, de uma forma realista, a capacidade resistente e a deformabilidade de pavimentos e de coberturas, já que simulam condições reais de carga. Deste modo, são utilizados pelo NCREP sempre que se considera conveniente para a aferição destas características. O ensaio é normalmente feito para cargas da ordem de 1,5x a carga de serviço, e consiste basicamente na aplicação de ciclos carga-descarga e na medição continua das deformações. Convém referir que as descargas devem ser feitas sem que haja deformações residuais.

Naturalmente que antes de realizar o ensaio é importante efectuar o cálculo da estrutura de forma a estimar o seu comportamento, tentando assim evitar que o carregamento ultrapassasse o comportamento elástico da estrutura. Ainda assim, é normalmente instalada uma estrutura de segurança sob o pavimento ou cobertura a ensaiar, de forma a prever alguma rotura que possa eventualmente acontecer. No capítulo 5 apresentar-se-á um caso de estudo em que foi efectuado um ensaio de carga num pavimento.

## 5. Edifício António Carneiro. Um caso de estudo

### 5.1. Introdução

Num dos edifícios analisados pelo NCREP, surgiu a possibilidade de efectuar ensaios semi-destrutivos e destrutivos aos pavimentos, na medida em que, devido a incompatibilidades de ordem arquitectónica, o projecto geral ditava a sua demolição.

Naturalmente que, à partida, a adopção de ensaios destrutivos é de evitar, na medida em que impossibilita a manutenção dos elementos estruturais ensaiados. No entanto, esta oportunidade de ensaiar um conjunto de pavimentos que iriam ser demolidos acabou por ser extremamente importante já que permitiu a avaliação de parâmetros e características que poderão vir a ser úteis em futuras intervenções de reabilitação de estruturas semelhantes.

O edifício em questão foi construído em 1916, tem área em planta de 6,0x30,0m<sup>2</sup> e apresenta pavimentos com vigamento de secção circular de 0,20m de diâmetro e espaçamento de 0,60m a vencer o vão de 6,0m. Sobre estas vigas principais existe uma camada de soalho com 2,5cm de espessura e a efectuar o seu contraventamento existem tarugos espaçados de 2,0m (diâmetro de 0,10m).

Além da utilização de instrumentos de ensaio não destrutivos, como o Pilodyn, foi efectuada uma campanha de ensaios que englobou ensaios de carga, leituras com Sismógrafos e um ensaio de avaliação do atrito viga-parede com o recurso a um actuador hidráulico.

A campanha de ensaios realizada, particularmente o ensaio de carga e avaliação das frequências, teve como objectivo a avaliação do comportamento do pavimento e das vigas de madeira isoladas quando submetidos a cargas concentradas e distribuídas, tendo-se procurado avaliar a eficácia do tarugamento e a participação do soalho na resistência e distribuição de esforços e deformações nos pavimentos.

### 5.2. Ensaio de carga

A capacidade resistente dos pavimentos é fortemente afectada por diversos factores, como a presença de humidade e o mau funcionamento dos vários elementos que os constituem, tais como as vigas, os tarugos e o soalho.

Os ensaios de carga realizados tiveram como finalidade registar a evolução da deformação/deslocamento do vigamento em função da carga aplicada, de forma a avaliar o seu comportamento estrutural, particularmente a contribuição dos vários elementos do pavimento para a resistência e deformabilidade, figura 13.

De forma a avaliar correctamente o comportamento bi-direccional dos elementos estruturais optou-se por ensaiar uma faixa de pavimento de cerca de 3,5m, abrangendo um conjunto de 7 vigas.



Figura 13. Ensaio de carga em pavimento, Edifício António Carneiro, séc. XX (1916), Porto.

Procurou-se carregar apenas a viga central, para estimar fidedignamente a eficácia da transmissão de cargas para as outras vigas através dos tarugos e do soalho. Os três reservatórios utilizados tinham capacidade de 600 litros cada um, perfazendo um total de 1,80 toneladas de carga.

À entrada dos reservatórios foi colocado um caudalímetro para controlo e registo do volume de água entrado ou seja, da carga a actuar sobre o pavimento.

O vigamento do pavimento foi monitorizado de modo a que durante o processo de carregamento pudesse controlar-se e registar-se a sua deformação. Em particular, foram utilizados comparadores digitais em diferentes pontos das vigas do pavimento para medição dos deslocamentos verticais. As leituras dos comparadores foram efectuadas no decorrer do ensaio para os diferentes patamares de carga, sendo a informação transmitida continuamente e processada por um software de recepção de dados.

Tendo em vista os objectivos atrás referidos para o ensaio, foi escolhida uma zona do pavimento que se encontrasse em boas condições (vigas, tarugos e soalho) e ensaiou-se em três condições: a) tal como se encontrava in-situ, i.e., com tarugos e soalho; b) sem os tarugos de ambos os lados da viga central, i.e., só com o soalho; c) uma viga isolada. Desta forma o ensaio de carga, normalmente não destrutivo, acabou por ter um carácter semi-destrutivo.

De forma a conseguir proceder-se à sequência de (a) para (c), procurou-se que o carregamento não ultrapassasse o comportamento elástico da estrutura. No entanto, para complementar a informação recolhida, tentou-se em laboratório, com vigas retiradas do mesmo pavimento, realizar um teste de carga até uma situação próxima da rotura de modo a avaliar o seu comportamento em regime último, não-linear plástico.

A análise dos resultados, em particular das curvas força instalada/deslocamento medido, mostra um comportamento linear, sem indícios de tendência para uma rotura imediata. Nesta análise salvaguarda-se a hipótese de ocorrência de uma rotura instantânea sem qualquer “patamar de deformação plástica”, tal como sucede nas estruturas de madeira quando submetidas a esforços de tracção, figura 14. A partir dos resultados obtidos foi possível estimar o módulo de elasticidade da madeira do pavimento (cerca de 8,0GPa).

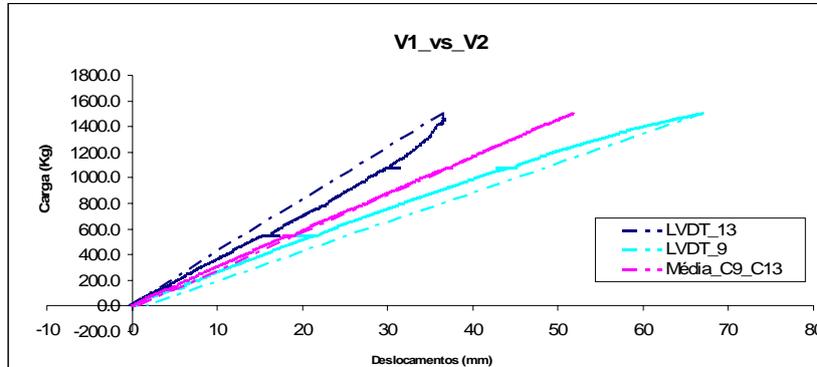


Figura 14. Diagrama força-deslocamento para duas vigas ensaiadas.

No ensaio com soalho e tarugos a viga central, na qual a carga foi directamente aplicada, recebeu cerca de 40% da carga total, sendo o restante dividido pelas outras vigas: 20% para cada uma das vigas mais próximas e 10% para cada uma das duas mais distantes. Por outro lado, no ensaio em que os tarugos foram removidos a deformação do pavimento foi apenas 4% superior ao ensaio com tarugos, sendo que a distribuição de carga pelas diferentes vigas se manteve igual.

Com estes resultados é possível afirmar que, para cargas verticais, o soalho fornece um elevado factor de distribuição de carga aos pavimentos de madeira, contribuindo para o aumento da sua rigidez e resistência. Por outro lado, os tarugos têm pouca eficácia na distribuição das cargas, quando comparados com o soalho. No entanto, é importante dizer que com cargas horizontais a eficácia dos tarugos é maior.

### 5.3. Sismógrafos

As leituras com os sismógrafos foram particularmente úteis na avaliação da importância relativa dos vários elementos do pavimento. Para perceber a influência dos tarugos e da largura da faixa de pavimento na sua vibração, fizeram-se várias leituras. Primeiro analisou-se o pavimento com o comprimento original (30,0m); em seguida foi efectuado um corte no soalho numa faixa de 3,5m, (ficando-se com uma área de 6,0x3,5m<sup>2</sup>). Posteriormente removeram-se os tarugos dessa faixa de pavimento e, finalmente, fez-se a leitura numa viga isolada, figura 15. A comparação das leituras destas quatro situações, que andam entre os 7,0Hz e os 10,0Hz, permitiu avaliar a importância dos vários elementos, soalho, tarugos e vigas, no comportamento estrutural do pavimento e, simultaneamente, fazer uma avaliação de valores médios do módulo de elasticidade da madeira. Verificou-se ainda que os valores das frequências de vibração, resultantes da campanha de medições experimentais in-situ, se aproximaram dos valores teóricos calculados segundo o EC5 [8].

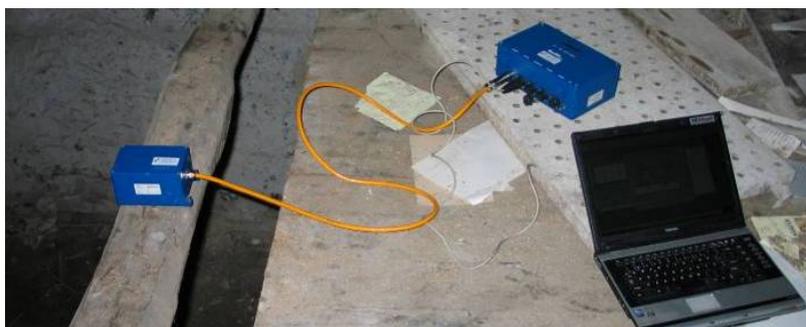


Figura 15. Sismógrafo utilizado em pavimento, Edifício António Carneiro, séc. XX (1916), Porto.

Através da comparação entre zonas de pavimentos degradadas e zonas sãs, é possível quantificar a melhoria de comportamento devida ao estado de conservação do soalho, as suas ligações às vigas e às paredes, que são assim factores relevantes e condicionantes para o comportamento dinâmico deste tipo de estruturas.

As leituras dos sismógrafos poderão permitir ainda aperfeiçoar as modelações numéricas de edifícios antigos, que apresentam como uma das grandes dificuldades a calibração da modelação dos pavimentos de madeira. Nestes casos, uma das opções costuma ser a modelação dos pavimentos com as suas vigas e tarugos e a adopção de barras auxiliares de reduzida inércia que simulam o soalho, a ligar as várias vigas para assim se homogeneizar as deformações dos pavimentos. Outra modelação possível, que tenderá a aproximar o efeito real do soalho na estrutura consiste na inclusão de elementos de laje de muito reduzida espessura para simular o soalho. Esses elementos apoiam nas vigas e tarugos mas não são ligados às paredes resistentes, como normalmente se verifica nos edifícios [9].

### 5.4. Ensaio com actuador hidráulico

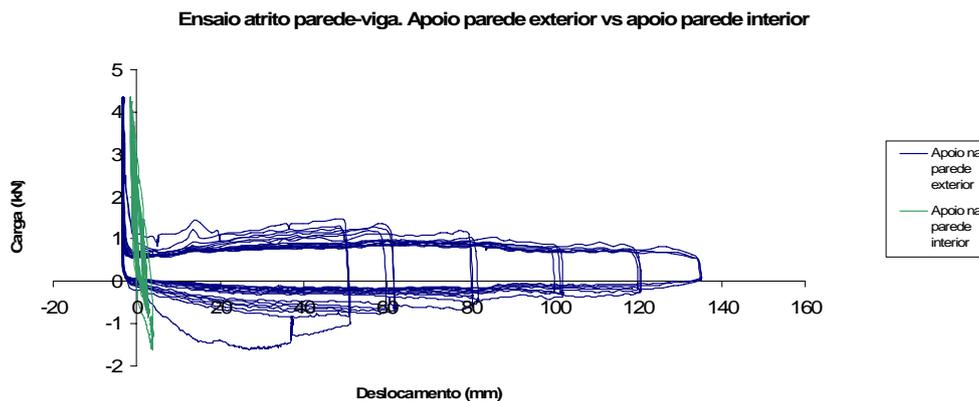
Para avaliar a resistência das ligações por atrito das vigas de madeira às paredes de alvenaria decidiu-se realizar um ensaio destrutivo. Procedeu-se então ao corte de um segmento de uma viga de forma a instalar um actuador hidráulico que funcionasse ao longo do seu eixo. Para conseguir manter os dois segmentos da viga a ensaiar na posição original foi concebida uma estrutura metálica com roldanas que fazia o seu suporte (não deixando que se movessem verticalmente, mas permitindo ao mesmo tempo o seu livre movimento horizontal, figura 16. Para fixar o actuador à viga foram utilizadas cantoneiras metálicas fixadas por parafusos autoroscantes M12. Foi utilizada uma central hidráulica para transmitir carga ao actuador.

A primeira parte do ensaio consistiu num movimento de arrancamento da viga da parede, sendo que posteriormente o actuador induziu o movimento inverso à viga.



**Figura 16. Ensaio com actuador hidráulico em viga de madeira, Edifício António Carneiro, séc. XX (1916), Porto.**

Foram instalados transdutores de deslocamento (comparadores), posicionados em extremidades opostas da viga, de modo a avaliar a lei força-deslocamento da ligação por contacto entre a viga e a parede. De forma a verificar um possível movimento da parede por derrube ou arrastamento pela viga, foram ainda instalados comparadores nas paredes, em locais próximos da viga a ensaiar. Apesar da viga não estar carregada, facto que levou a uma diminuição do atrito, os resultados obtidos permitiram concluir acerca da reduzida eficácia da ligação entre os dois elementos, tendo-se chegado a uma força de atrito da ordem dos 1,5kN, figura 17.



**Figura 17. Gráfico carga-deslocamento do ensaio com actuador hidráulico em viga de madeira.**

## 6. Conclusões

De forma a permitir que o conjunto dos edifícios do Centro Histórico da cidade do Porto, Património Mundial pela UNESCO, seja preservado, o NCREP-FEUP tem participado em inúmeros projectos, avaliando o estado de conservação dos seus elementos estruturais. A presente comunicação procurou abordar os trabalhos desenvolvidos na análise das estruturas de madeira desses edifícios, explicitando os passos das fases de inspecção e diagnóstico.

Concluiu-se que a partir da utilização conjunta de vários ensaios não destrutivos é possível retirar informação útil acerca dos elementos estruturais de madeira. Ainda assim, verificam-se algumas limitações na sua utilização devido à dificuldade em estimar valores quantitativos de parâmetros físicos e mecânicos.

Tanto o Resistograph como o Pilodyn carecem ainda, para que possam ser utilizados de forma mais fidedigna, de estudos experimentais com diferentes espécies que permitam correlacionar os resultados obtidos. Ainda assim, nas estruturas em que foram utilizados, estes instrumentos foram muito úteis na obtenção de dados qualitativos, particularmente na percepção de secções de elementos com degradações, vazios ou fendas. Em particular, o Resistograph permitiu encontrar vazios interiores de grandes dimensões em secções que aparentemente estavam em bom estado de

conservação. Já o Pilodyn permitiu, através de leituras em vários elementos estruturais diferentes, concluir acerca do estado de conservação e da dureza superficial relativas.

Por sua vez, a utilização de sismógrafos em pavimentos permite a obtenção das frequências próprias e, conseqüentemente, a estimativa do valor médio do módulo de elasticidade. Com as informações que vão sendo recolhidas nos diferentes pavimentos inspeccionados é possível organizar uma base de dados que permita, futuramente, relacionar os valores obtidos nas leituras com a sua integridade. Finalmente, é importante referir que os ensaios semi-destrutivos ou destrutivos, apesar de só poderem ser aplicados em condições especiais, já que impedem a posterior utilização da estrutura ensaiada, podem ser um contributo valioso para o conhecimento do material, já que fornecem dados em condições mais realistas. Em particular, o ensaio de carga que neste caso, devido às condicionantes referidas teve um teor destrutivo, permitiu conhecer a contribuição do soalho para o aumento de rigidez do pavimento, bem como a relativa pouca eficácia dos tarugos na transmissão de cargas verticais. O ensaio de atrito viga-parede, só possível com a inutilização da viga ensaiada permitiu ainda quantificar as fracas condições de contacto entre a viga de madeira e a parede de alvenaria.

## Referências

- [1] Ilharco, T.; Romão, X.; Paupério, E.; Guedes, J.; Costa, A. 2007. *Organization of information on Built Heritage using Multimedia Technologies*. Euro-Mediterranean Regional Conference Traditional Mediterranean Architecture. Present and Future. Barcelona.
- [2] Costa, A.; Ornelas, C.; Paupério, E.; Guedes, J.; Ilharco, T. 2006. *A Inspeção como Instrumento de Decisão. Apresentação de um Caso Prático num Edifício com Valor Patrimonial*. Patorreb 2006: 2º Encontro sobre Patologias e Reabilitação de Edifícios. Porto.
- [3] Botelho, J. 2006 – *Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de Madeira de edifícios antigos*. Tese de Mestrado em Reabilitação do Património Edificado. Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia. Portugal.
- [4] Faria, A. 2002, *Reabilitação de Coberturas em madeira em edifícios históricos. A Intervenção no Património; Práticas de Conservação e Reabilitação*, Porto.
- [5] Feio, A. 2005 – *Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho – Escola de Engenharia. Portugal.
- [6] Gurlacher, R.. 1987. *Non destructive testing of wood: an in-situ method for determination of density*. Holz as Roh- und Werkstoff. Vol. 45.
- [7] Turrini, G.; Piazza, M. 1983. *Il recupero dei solai in legno. Esperienze e realizzazioni*. Recuperare, Vol. 7.
- [8] ENV 1995-1-4. 2004. Eurocode 5 – *Design of Timber Structures Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*.
- [9] Neves, N; Costa, A., Arêde, A. 2004. *Identificação Dinâmica e Análise do Comportamento Sísmico de um quarteirão localizado na cidade da Horta – Ilha do Faial*. Sísmica 2004. 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. Porto.