

ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS COMPONENTES E MATERIAIS DE PONTES EM ARCO DE ALVENARIA DE PEDRA

*EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF
COMPONENTS AND MATERIALS OF STONE MASONRY ARCH BRIDGES*

SILVA, Rúben

CONSTRUCT-LESE FEUP, Porto, Portugal
rubensilva@fe.up.pt

COSTA, Cristina

Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, Portugal
CONSTRUCT-LESE FEUP, Porto, Portugal
c.costa@ipt.pt

ARÊDE, António; TOPA GOMES, António

CONSTRUCT-LESE FEUP, Porto, Portugal
aarede@fe.up.pt

MENEZES, José

FEUP, Porto, Portugal

RESUMO

Este artigo descreve os estudos experimentais realizados em pontes em arco de alvenaria de pedra com o objetivo de obter uma caracterização realista dos componentes e materiais das pontes. O trabalho faz parte de um estudo mais abrangente centrado na caracterização numérica e experimental de pontes em arco de alvenaria de pedra sob a ação do tráfego ferroviário. A campanha experimental decorreu em duas pontes ferroviárias inseridas na rede ferroviária Portuguesa, o viaduto de Durrães e a ponte PK124, ambas localizadas na Linha do Minho. Em ambas as pontes foram aplicadas técnicas de ensaio “in-situ”, como a extração de carotes, ensaios com macacos planos e com pressiómetro de Ménard e laboratoriais em amostras representativas dos materiais constituintes das pontes, cujos principais resultados e conclusões são aqui apresentados.

Palavras-chave: Pontes em arco de alvenaria de pedra, caracterização experimental, ensaios “in-situ”, ensaios laboratoriais

ABSTRACT

This paper discusses the experimental characterisation of the constituent materials of stone arch masonry bridges. This work is part of a more comprehensive study focusing on the numerical and experimental characterization of stone masonry arch bridges with railway traffic. The experimental campaign comprises two railway bridges, the Durrães overpass and PK124 bridge, both located in the Minho railway line. In both bridges different testing techniques were applied, “in-situ” tests, like core extraction, flat-jack and pressuremeter tests, and laboratory tests on representative samples of the constituent materials taken from the bridges, whose main results and conclusions are presented.

Keywords: Stone masonry arch bridges; experimental assessment, in-situ material testing, laboratory tests

1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento estrutural de pontes em arco de alvenaria tem revelado que a caracterização experimental dos seus componentes e materiais constituintes é um aspeto fundamental para uma melhor compreensão deste tipo de estruturas (SB, 2007). Devido à heterogeneidade e anisotropia dos seus materiais constituintes (alvenaria e enchimento), e às técnicas de construção usadas neste tipo de estruturas, existe uma grande dificuldade na definição dos parâmetros constitutivos dos materiais a adotar em modelos numéricos de simulação das pontes. Assim a realização de ensaios experimentais para a caracterização física e mecânica dos materiais das pontes constitui um passo importante para a simulação numérica das pontes com modelos numéricos devidamente calibrados.

Diversas técnicas não-destrutivas têm-se mostrado eficientes para estimar os parâmetros físicos e mecânicos dos materiais deste tipo de pontes, permitindo estudar as suas propriedades, avaliar o seu estado de conservação e validar os modelos numéricos das pontes. Os ensaios com macacos-planos e os ensaios pressiométricos são dois exemplos de técnicas de ensaio “in-situ” que no contexto deste trabalho são aplicadas para caracterizar experimentalmente a alvenaria e o material de enchimento das pontes, respetivamente. A extração de carotes é outra técnica “in-situ” com muita aplicabilidade neste tipo de pontes, permitindo a recolha de amostras de pedra e de pedra com junta para a realização de ensaios laboratoriais com vista à sua caracterização mecânica.

Os ensaios com macacos planos permitem determinar “in-situ” a tensão instalada e as características de deformabilidade da alvenaria, sem necessidade de extrair qualquer tipo de amostra (Binda *et al.*, 1983). A técnica de ensaio teve origem no âmbito da mecânica das rochas e atualmente é comum a sua aplicação em paredes de alvenaria nas suas duas variantes: ensaio simples e ensaio duplo. O ensaio pressiométrico foi desenvolvido por Louis Ménard (1975) e tem maior aplicação nos solos e rochas brandas ou solos duros. A sua aplicação para o estudo de estruturas de alvenaria é ainda muito incipiente, havendo muito poucos trabalhos na bibliografia sobre esta aplicação alternativa. O ensaio permite estimar os parâmetros de deformabilidade do material testado e consiste na introdução de uma sonda dentro de um furo aberto no material, e na aplicação de uma pressão que leva à expansão da sonda, tendo como consequência uma compressão radial do material na zona envolvente.

Neste contexto, são apresentados neste artigo os principais resultados das campanhas experimentais decorridas em duas pontes ferroviárias de alvenaria de pedra, no âmbito do projeto

de investigação *StonArcRail*, entretanto já finalizado. O projeto visava a caracterização numérica e experimental do comportamento estrutural de pontes ferroviárias de alvenaria de pedra existentes em Portugal e foi desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e Instituto Politécnico de Tomar (IPT) com o apoio da Infraestruturas de Portugal (IP).

As campanhas experimentais decorreram em duas pontes ferroviárias inseridas na linha do Minho, o Viaduto de Durrães (localizado perto de Barcelos) e a ponte PK124 (localizada perto de Valença). Estes ensaios tiveram como objetivo a caracterização experimental das propriedades mecânicas dos materiais constituintes das pontes, e envolveram ensaios “in-situ” como a extração de carotes, ensaios de macacos-planos e ensaios pressiométricos, bem como ensaios laboratoriais em amostras recolhidas das pontes. Poderá ser consultada informação complementar sobre estas campanhas experimentais em Arêde *et al.* (2017).

Com vista à caracterização global do comportamento das pontes, foram também realizados ensaios dinâmicos de vibração ambiental e forçada nas duas pontes referenciadas, com e sem tráfego de comboios. Detalhes sobre esses ensaios podem ser encontrados em Costa *et al.* (2015), para a ponte PK124, e em Costa *et al.* (2016), para o viaduto de Durrães. Estes ensaios foram alvo de um outro artigo apresentado na primeira edição deste congresso, e cuja descrição dos ensaios e principais resultados obtidos podem ser consultados em Ribeiro *et al.* (2016).

2. CASOS DE ESTUDO

2.1 VIADUTO DE DURRÃES

O viaduto de Durrães, também designado de ponte seca de Durrães, foi construído em 1878 pela Real Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses, com um projeto datado de 1876 (REFER, 1876). O viaduto desenvolve-se ao longo de uma extensão de cerca de 178 m, com 5,3 m de largura e um desnível máximo de 22 m entre o nível do tabuleiro e o terreno atravessado. É constituído por 16 arcos com cerca de 9 m de vão, assentes em 15 pilares e 2 encontros. O tabuleiro é constituído por uma via única balastrada em bitola ibérica. Uma vista geral do viaduto é apresentada na Fig. 1.

Figura 1: Vista geral do viaduto de Durrães



2.2 PONTE PK124

A ponte ao PK124 da linha do Minho constitui uma passagem hidráulica com uma tipologia estrutural em alvenaria muito frequente na rede ferroviária nacional. A sua construção e projeto (REFER, 1875) remontam ao período de construção do troço da linha entre Caminha e Valença que abriu à exploração em Janeiro de 1879. A ponte tem cerca de 11 m de extensão e 5,9 m de largura. É constituída por um único arco com vão livre de aproximadamente 8 m e 11 m de altura, assente em dois encontros. A montante e a jusante da ponte existem 4 muros ala com 12 de comprimento e que sustentam um talude terroso com vegetação. Sobre o tabuleiro existe uma via única balastrada. Uma vista geral da ponte é apresentada na Fig. 2.

Figura 2: Vista geral da ponte PK124



3. CAMPANHA EXPERIMENTAL “IN-SITU”

3.1 DESCRIÇÃO GERAL

A campanha experimental teve como objetivo a caracterização física e mecânica dos componentes e materiais das duas pontes. Para o viaduto de Durrães, várias amostras de pedra e pedra com junta foram extraídas da superfície dos pilares P10 e P11, do muro tímpano localizado sobre o pilar P14 e de um dos encontros, conforme ilustrado na Fig. 3a. No caso da ponte PK124, as amostras de pedra e pedra com junta foram extraídas na área de um dos encontros, no muro-ala e no intradorso do arco, conforme ilustrado na Fig. 3b. Na tabela 01 é incluída a identificação de todas as amostras retiradas das duas pontes.

Figura 3: Localização dos pontos de extração de amostras das pontes: a) viaduto de Durrães; b) ponte PK124

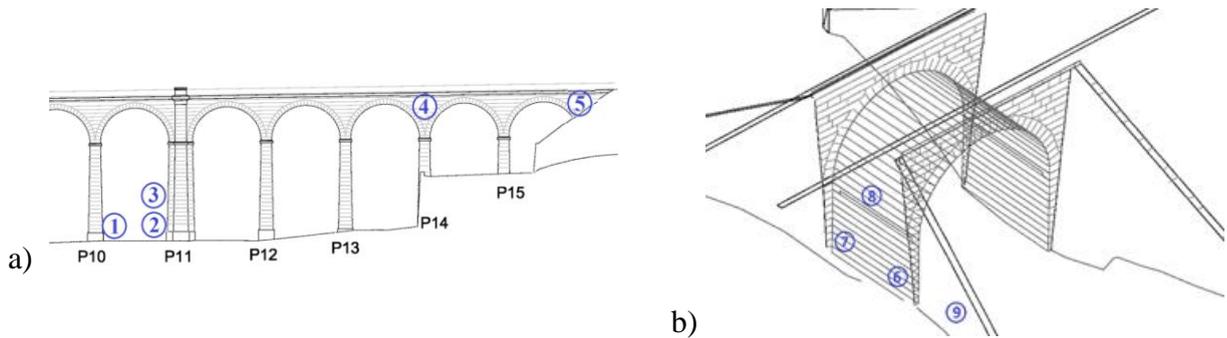


Tabela 01 - Identificação das amostras recolhidas nas pontes

Viaduto Durrães	Ponte PK124
① Cc1_P10 / Cj1_P10	⑥ Cc6_E / Cj6_E
② Cc2_P11 / Cj2_P11	⑦ Cc7_E / Cj7_E
③ Cc3_P11 / Cj3_P11	⑧ Cj8_A
④ Cc4_P14 / Cj4_P14	⑨ Cc9_MA
⑤ Cj5_E	

Cc – amostras de pedra; Cj – amostras de pedra com junta

A caracterização dos materiais tanto da estrutura das pontes como da sua fundação envolveu a realização de ensaios “in-situ”, nomeadamente ensaios com macacos planos e ensaios pressiométricos. A localização destes ensaios nas duas pontes está assinalada na Fig.4. Na tabela 02 é incluída a identificação e a localização detalhada de cada um dos ensaios.

Figura 4: Localização dos ensaios “in-situ” em: a) viaduto de Durrães; b) ponte PK124

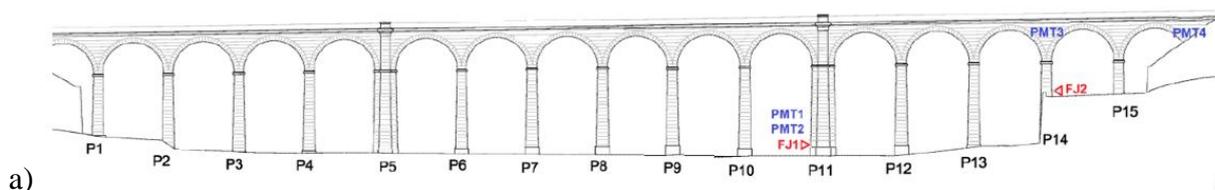
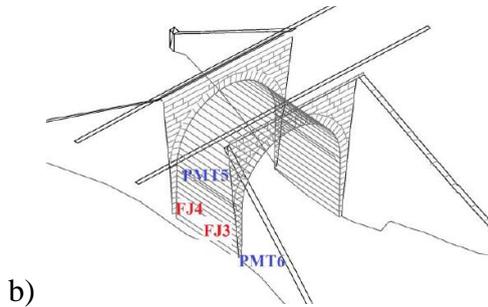


Tabela 02 – Identificação de cada ensaio “in-situ”:



Viaduto Durrães	Ponte PK124
Ensaio pressiométrico no material de enchimento:	
PMT1: Pilar 11	PMT5: Intradorso arco
PMT2: Pilar 11	PMT6: Muro-ala
PMT3: Pilar 14	
PMT4: Encontro	
Ensaio macacos planos na alvenaria:	
FJ1: Pilar 11	FJ3: Encontro
FJ2: Pilar 14	FJ4: Encontro

3.2 EXTRAÇÃO DE CAROTES

Para os ensaios laboratoriais de caracterização mecânica foram extraídas carotes em locais que não comprometessem a estética e a resistência da construção e que permitissem uma boa caracterização dos diferentes componentes das pontes. A extração de carotes de pedra foi efetuada utilizando uma máquina de corte rotativa com coroa diamantada. Este equipamento também foi utilizado para realização dos furos para os ensaios pressiométricos, permitindo obter amostras extraídas de zonas dos blocos de pedra, juntas e enchimentos das duas pontes.

3.3 ENSAIO DE MACACOS PLANOS

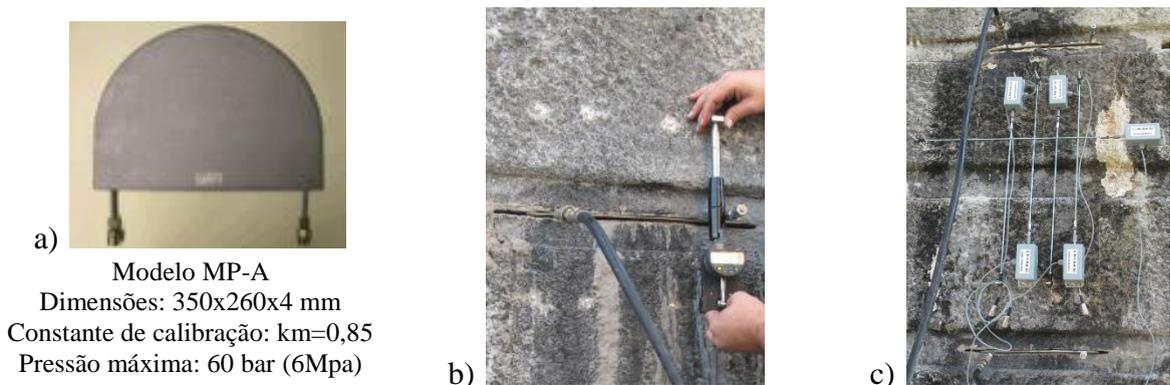
A tensão “in-situ” instalada e as propriedades de deformabilidade da alvenaria foram estimadas através de ensaios de macacos planos simples e duplos, respetivamente. Essa técnica de ensaio foi aplicada a dois pilares do Viaduto de Durrães e ao encontro da ponte PK124. O modelo de macaco plano adotado nos ensaios é o que consta da Fig. 5a.

O ensaio simples de macacos planos foi executado de acordo com as normas ASTM e RILEM (ASTM 1196-91, 1991 e RILEM-LUM.D.2/3, 1990). O ensaio compreende várias fases, conforme ilustrado na Fig. 5. Numa primeira etapa é escolhida a zona de corte e marcação de (pelo menos) 4 alinhamentos verticais de referência, depois é feito um rasgo usando uma máquina de corte apropriada e, por fim, é colocado o macaco plano no rasgo e aplicada a pressão por patamares. O registo da variação de comprimento entre pontos de referência é efetuado em cada fase do ensaio através de um deformómetro com comprimento base de 300 mm e mostrador digital com uma resolução de 0,001 mm, conforme se mostra na Fig. 5b.

Após o ensaio simples é realizado o ensaio duplo, com o objetivo de aferir as características de deformabilidade da zona testada. O ensaio duplo consiste em comprimir uma zona delimitada por dois macacos planos e monitorizar as deformações impostas pela mesma pressão nesses dois macacos planos, permitindo traçar as curvas de tensão vs. deformação para os alinhamentos

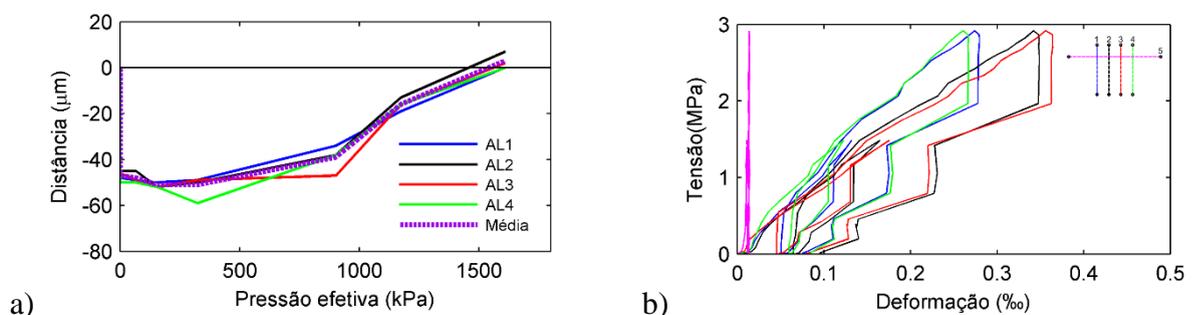
considerados. Na Fig.5c é visível um dos ensaios de macacos planos duplos executados e a sua configuração experimental, incluindo a localização dos aparelhos de medição e a localização dos rasgos e dos macacos planos em relação às juntas da alvenaria. Os transdutores de deslocamento (LVDTs) foram dispostos 4 na vertical e 1 na horizontal seguindo as recomendações encontradas em Binda et al. (1999). O ensaio duplo é monitorizado com o auxílio de um sistema de aquisição ligado a um computador portátil que regista os dados da célula de pressão instalada à saída da bomba manual e dos LVDTs.

Figura 5: Ensaio de macacos planos: a) modelo e características do macaco plano usado; b) medição num ensaio simples; c) configuração experimental do ensaio duplo



Na Fig. 6 apresentam-se os dois tipos de gráficos relativos aos resultados de um dos ensaios simples e duplos com macacos planos realizados nas duas pontes. Através da evolução dos deslocamentos verticais registados no ensaio simples é possível determinar a tensão de anulamento das deformações, que corresponde a uma estimativa da tensão instalada “in-situ” antes do ensaio. Pela análise dos ciclos carga/descarga obtidos do ensaio duplo e pelo cálculo do declive no gráfico tensão vs. deformação em cada alinhamento vertical, é possível estimar o módulo de elasticidade da zona de alvenaria ensaiada constituída por blocos de pedra e respetiva junta.

Figura 6: Resultados do ensaio de macacos planos FJ2 realizado no viaduto de Durrães: a) ensaio simples; b) ensaio duplo



Na tabela 03 encontram-se sumarizados o intervalo de valores encontrado para a estimativa de tensão instalada e para o módulo de elasticidade determinados a partir dos resultados obtidos com o ensaio de macacos planos nas duas pontes.

Tabela 03 - Identificação das amostras recolhidas nas pontes

Ensaio (ID)	Tensão “in-situ” (kPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
FJ (Durrães)	1534-1540	7-23
FJ (PK124)	198-986	0.9-1.3

Constata-se que existe uma grande variabilidade nos valores obtidos e que, na sua maioria, se encontram sobrestimados (por exemplo o valor superior de 23 GPa encontrado para a alvenaria ensaiada do viaduto de Durrães, é claramente um valor não expectável para este tipo de material). Este fato levanta algumas dúvidas sobre a aplicabilidade deste tipo de ensaio em alvenarias como as que são encontradas nos pilares da ponte de Durrães, com pedras regulares de grandes dimensões (0,5 m de altura e mais de 1 m de comprimento). Na ponte PK124 a alvenaria encontrada nos encontros, sendo mais irregular e de menores dimensões, com juntas de maior dimensão e características mais adequadas aos requisitos das normas, conduziu a melhores resultados e mais próximos da tensão estimada com base nas cargas permanentes na cota do macaco.

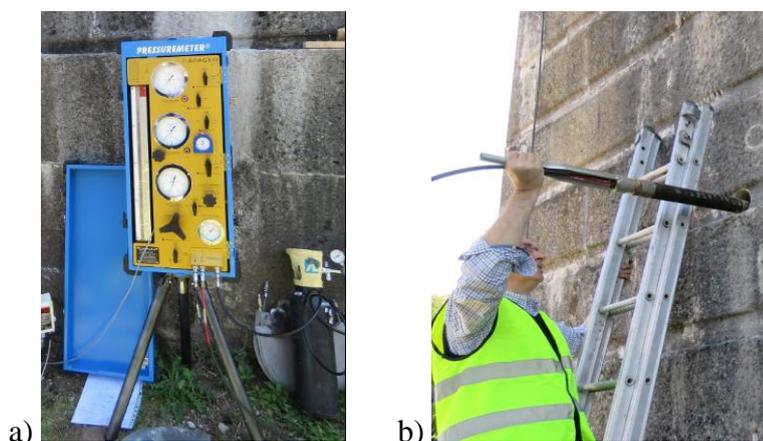
3.4 ENSAIO PRESSIOMÉTRICO

Os ensaios pressiométricos tiveram como objetivo a obtenção de uma estimativa para os parâmetros de deformabilidade do material de enchimento das pontes. No total, foram realizados 6 ensaios, 4 deles no viaduto de Durrães, na zona dos pilares (PMT1 e PMT2), num dos muros tímpano (PMT3) e na zona do encontro (PMT4), e 2 deles na ponte PK124, no intradorso do arco (PMT5) e num dos muros-ala (PMT6).

Os ensaios pressiométricos foram realizados de acordo com a Norma Francesa NFP94-110 (2000) em furos executados em diversas zonas das pontes. O equipamento usado foi um pressiómetro de Ménard, fabricado pela APAGEO e que é constituído por três partes distintas: a sonda, a unidade de controlo e a tubagem (Fig. 7a). A sonda está dividida em 3 células, 2 células de guarda e a célula central, unidas por um núcleo de aço que as mantém alinhadas. A unidade de controlo de pressão e volume tem como função controlar a expansão da sonda, resultante da aplicação de uma determinada pressão fornecida por uma garrafa de gás comprimido, e medir a variação volumétrica da célula central através de um volumímetro.

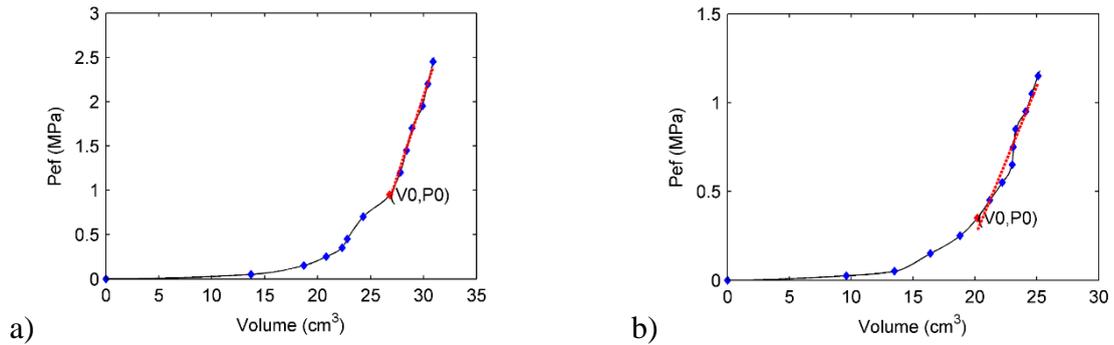
A preparação de cada ensaio envolveu uma primeira furação com $\phi 100$ mm que permitiu extrair uma carote para posterior ensaio em laboratório; após essa extração, seguiu-se a furação de $\phi 60$ mm até atingir a zona do enchimento. Seguidamente procedeu-se à introdução da sonda no interior do furo de menor diâmetro, conforme se ilustra na Fig. 7b, após a qual se deu início ao ensaio com a aplicação de patamares de pressão e leituras do volume.

Figura 7: Ensaio com pressiómetro de Ménard: a) equipamento; b) introdução da sonda



Os dados registados do ensaio pressiométrico, após correções para atender às perdas de volume e pressão, permitem traçar a curva pressiométrica que relaciona a pressão diametral aplicada nas paredes do furo (P_{ef}) com a sua variação de volume na zona da expansão da câmara pressiométrica. Na Fig. 8 são apresentadas duas curvas pressiométricas relativas a dois dos ensaios realizados. A Fig. 8a é relativa ao ensaio PMT2 no viaduto de Durrães e a Fig. 8b é relativa ao ensaio PMT5 na ponte PK124. Foram também obtidas curvas semelhantes para todos os outros ensaios realizados em ambas as pontes.

Figura 8: Curvas pressiométricas experimentais: a) viaduto de Durrães; b) ponte PK124



Em ambos os casos apenas foi possível identificar as primeiras duas fases de um ensaio pressiométrico tipo, conforme é evidenciado pela Fig. 8 onde nenhum dos ensaios apresenta uma curva em forma de S. De fato, isto permite concluir que durante o ensaio nunca foram atingidas pressões capazes de provocar a cedência do material, portanto permanecendo sempre abaixo de valores que originassem deformações plásticas no material.

Com base nas curvas pressiométricas é possível obter os parâmetros de deformabilidade designados de módulo de distorção pressiométrico (GPMT) e de módulo pressiométrico (EPMT) conhecido por módulo de Ménard. Estes parâmetros são calculados com base nos valores da fase elástica da curva tensão-deformação corrigida, tendo sido usados no seu cálculo no mínimo três pontos da curva e um valor de 0,2 para o coeficiente de Poisson.

Do total de resultados obtidos para cada ensaio, foi possível obter intervalos de variação para o módulo de distorção e para o módulo pressiométrico calculados para o material de enchimento das duas pontes, conforme listado na tabela 04. Esses valores são úteis para estimar o módulo de deformabilidade (E) do material de enchimento para usar em simulações numéricas, e que pode ser determinado dividindo o módulo pressiométrico por um coeficiente determinado empiricamente por Briaud (1992) e que depende do tipo de material e estado de compactação.

Tabela 04 - Intervalo de valores dos módulos GPMT e EPMT determinados para os ensaios pressiométricos

Ensaio (ID)	G_{PMT} (MPa)	E_{PMT} (MPa)
PMT (Durrães)	135-226	190-680
PMT (PK124)	110-140	160-408

Uma das dificuldades sentidas na aplicação desta técnica de ensaio para o estudo do material de enchimento destas pontes, relaciona-se com a elevada resistência do material, mais próxima de uma rocha do que de um solo. De fato, o nível de pressão aplicado foi elevado, com valores máximos da ordem de 20 bar, consentâneo com os valores máximos obtidos para o módulo pressiométrico da ordem de 400-600 MPa para o material de enchimento das duas pontes.

4. ENSAIOS LABORATORIAIS

Para caracterização física e mecânica das amostras de pedra e junta extraídas das pontes foram realizados ensaios de materiais nos laboratórios da FEUP. As amostras utilizadas nos ensaios provieram de carotes que não tinham evidenciado quaisquer sinais de fratura.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA PEDRA

A caracterização mecânica da pedra baseou-se na determinação da resistência à compressão e à tração bem do módulo de elasticidade em compressão. A resistência à compressão foi obtida através de ensaios correntes de compressão uniaxial utilizando uma prensa que permite a aplicação de forças progressivamente crescentes até se atingir a rotura do provete. Desse tipo de ensaios foram também estimados valores do módulo de elasticidade secante, recorrendo à medição das extensões em vários de ciclos de carga/descarga usando transdutores elétricos de deslocamento do tipo LVDT para os vários níveis de tensão de compressão instalados. A resistência à tração da pedra foi caracterizada com base no ensaio clássico de tração por compressão diametral. Ambos os ensaios foram realizados sobre amostras cilíndricas com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 05, em termos de peso volúmico, resistência à compressão e à tração e Módulo de Young. É observada uma boa concordância nos valores obtidos para as amostras de pedra granito ensaiadas. Contudo, valores consideravelmente superiores de Módulo de Young foram encontrados para as amostras do viaduto de Durrães em relação aos valores obtidos para a ponte PK124, o que sugere nesta última, um granito de pior qualidade ou num estado de degradação mais acentuado.

Tabela 05 – Parâmetros físicos e mecânicos das amostras de pedra extraídas das duas pontes

Parâmetro	Durrães	PK124
Peso volúmico (kN/m ³)	25,9-26,5	25,2-25,7
Resistência à compressão (MPa)	34,8-59,4	35,9-81,4
Resistência à compressão (MPa)	3,7-5,4	2,3-5,2
Módulo Young (GPa)	20,0-23,5	6,8-10,9

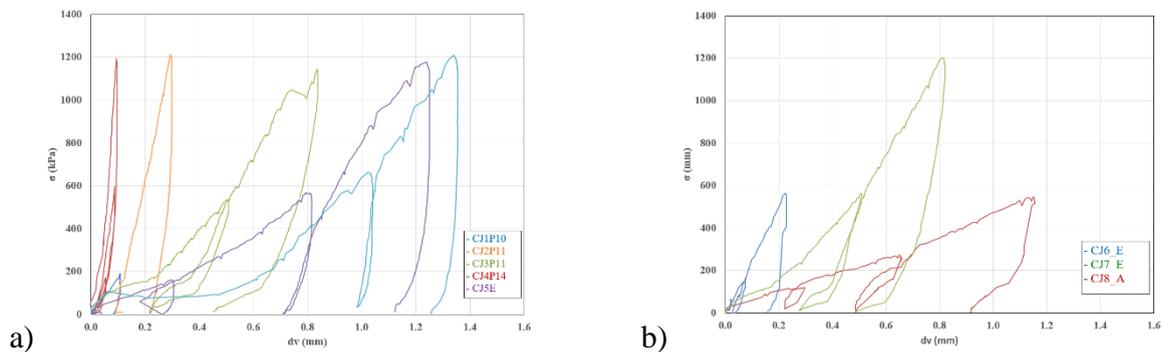
4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS JUNTAS

A caracterização do comportamento das juntas é baseada na determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade, obtidos através de ensaios de compressão e corte em amostras extraídas das pontes, e, que serão necessários definir na modelação numérica das pontes. Os

ensaios decorreram no Laboratório de Geotecnia da FEUP, com recurso a um equipamento de ensaio projetado e desenvolvido pelo próprio laboratório que permite avaliar a resistência ao corte das amostras através do escorregamento da junta ao longo do seu plano de descontinuidade. Cada amostra de junta foi preparada a partir das amostras cilíndricas extraídas das pontes, consistindo no encabeçamento de cada metade num paralelepípedo maciço de betão de forma a ser introduzido na caixa de corte do equipamento (com dimensões 200x200x150 mm³) garantindo que o plano de descontinuidade da junta fique coincidente com o plano de corte da máquina. As dimensões do plano de corte das amostras é de 100x100 mm². As amostras exibiam diferentes condições iniciais (antes do ensaio), tendo sido separadas em grupos pelo seu estado de preservação.

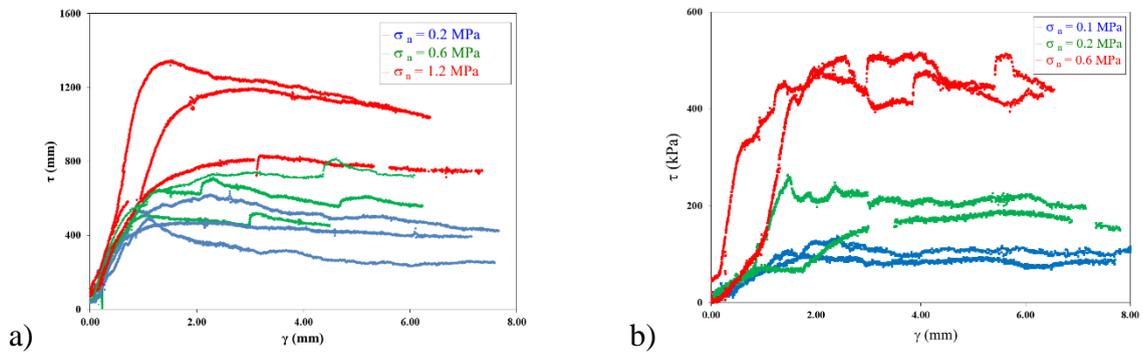
De modo a caracterizar o comportamento das juntas na direção normal, ensaios cíclicos de compressão foram realizados, onde foi registada a evolução da tensão de compressão com o correspondente deslocamento vertical e permitiu avaliar a rigidez normal das juntas em cada ciclo de carga/descarga. As curvas obtidas são apresentadas na Fig. 9, para o caso das amostras do viaduto de Durrães (Fig. 9a) e para o caso das amostras da ponte PK124 (Fig. 9b), evidenciando que os valores de deslocamento obtidos para cada amostra são bastante diferentes e dependentes do seu estado de condição inicial antes dos ensaios.

Figura 9: Curvas de tensão normal vs. deslocamento vertical: a) viaduto de Durrães; b) ponte PK124



Em relação ao comportamento das juntas na direção tangencial, ensaios de corte foram realizados usando a caixa de corte e o equipamento apresentados anteriormente, e aplicando diferentes níveis de pressão normal. Foram aplicados patamares de pressão de 0,2, 0,6 e 1,2 MPa no caso das amostras referentes ao viaduto de Durrães, e de 0,1, 0,2 e 0,6 MPa no caso das amostras referentes à ponte PK124. Na Fig. 10 são apresentados os resultados obtidos em termos de gráficos tensão de corte vs. deslocamento tangencial para as amostras do viaduto de Durrães (Fig. 10a) e ponte PK124 (Fig. 10b).

Figura 10: Curvas de tensão corte vs deslocamento horizontal: a) viaduto de Durrães; b) Ponte PK124



Dependendo da tensão normal instalada, as curvas da Fig. 10 apresentam diversas fases: uma inicial, que corresponde ao ajustamento entre os dois blocos que constituem a junta, uma segunda fase, que corresponde a uma fase linear que ocorre até se atingir o máximo valor de tensão de corte, e uma fase final de amaciamento com uma redução de resistência que tende para o patamar residual de tensão. Os resultados dos ensaios sugerem que o valor da rigidez elástica e a resistência de pico e residual tendem a aumentar com o incremento da tensão normal instalada. Na tabela 06 estão listados, para as amostras ensaiadas das duas pontes, os valores médios de tensão tangencial de pico e residual e a rigidez elástica para cada patamar de tensão normal aplicada.

Tabela 06 – Propriedades do comportamento ao corte das juntas

Parâmetro	Valores médios					
	Viaduto Durrães			Ponte PK124		
Tensão normal (MPa)	0,2	0,6	1,2	0,1	0,2	0,6
Tensão pico (MPa)	0,53	0,65	1,12	0,12	0,23	0,50
Tensão residual (MPa)	0,36	0,60	0,95	0,10	0,18	0,44
Rigidez tangencial (MPa/mm)	0,63	0,72	0,83	0,07	0,18	0,63

Com base nos valores de tensão normal e tangencial de pico e de tensão residual, foram determinadas envolventes de Mohr-Coulomb. Para o caso das amostras do viaduto de Durrães foi obtido um valor de $35,5^\circ$ para o ângulo de atrito e um valor de 63 kPa para o parâmetro da coesão, e no caso da ponte PK124 foi obtido um valor de $35,5^\circ$ para o ângulo de atrito e um valor de 63 kPa para o parâmetro da coesão, adotando em ambos os casos os valores de tensão de pico.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo encontra-se reportado os principais aspetos relacionados com a aplicação de diferentes técnicas de ensaio no estudo e caracterização dos materiais e componentes estruturais de

duas pontes em arco de alvenaria de pedra. Foi apresentado uma breve descrição de cada técnica de ensaio aplicada “in-situ” e em laboratório e os principais resultados. Duas técnicas de ensaio “in-situ” inovadoras em termos da sua aplicação a pontes de alvenaria de pedra, foram aplicadas com bons resultados nas duas pontes estudadas, o ensaio de macacos planos para a caracterização das propriedades da alvenaria e o ensaio pressiométrico para a caracterização das propriedades do material de enchimento das pontes. Recorrendo a ensaios laboratoriais em amostras de pedra e em amostras representativas das juntas existentes entre os blocos de pedra das pontes, foi possível estimar parâmetros de resistência e deformabilidade dos materiais existentes nas pontes.

Os ensaios com macacos planos mostraram ser uma opção fiável e pouco destrutiva para caracterizar a tensão vertical “in-situ” e a deformabilidade da alvenaria. No entanto, as dificuldades verificadas na aplicação desta técnica em blocos de alvenaria de grandes dimensões (0,5 m de altura) e juntas de espessura reduzida (1-2 mm), e envolvendo cargas axiais elevadas, permitiu expor os limites próprios deste tipo de ensaio que não é corrente no tipo das alvenarias testadas. Os ensaios com o Pressiómetro de Ménard conduziram a bons resultados dos parâmetros mecânicos dos enchimentos. A aplicação desta técnica em furos horizontais e com materiais mais resistentes que os solos correntes constituiu um desafio e uma variante de aplicação deste tipo de equipamento; não obstante os resultados revelaram boa aplicabilidade para o estudo destes materiais.

Os resultados obtidos com os ensaios “in-situ” e laboratoriais permitiram uma caracterização detalhada dos materiais constituintes das duas pontes estudadas, e os valores assim obtidos das propriedades mecânicas têm sido utilizados nos modelos numéricos de simulação do seu comportamento estrutural.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 - CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.; Projeto FCT-PTDC/ECM-EST_1691/2012 - Caracterização Experimental e Numérica do Comportamento Estrutural de Pontes em Arco de Alvenaria de Pedra sob Ação de Tráfego Ferroviário - Aplicação a Pontes Existentes em Portugal, através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P.

Os autores agradecem à Eng. Ana Isabel Silva, ao Eng. Hugo Patrício e ao Eng. Nuno Lopes, da IP, por toda a colaboração e informação cedida sobre as pontes, ao Eng. Nuno Pinto e ao Técnico

Valdemar, pelo apoio nos ensaios.

REFERÊNCIAS

- ARÊDE, A., COSTA, C., GOMES, A. T., MENEZES, J. E., SILVA, R., MORAIS, M. & GONÇALVES, R. **Experimental characterization of the mechanical behaviour of components and materials of stone masonry railway bridges**. *Construction and Building Materials*, 153, pp 663-681. 2017.
- ASTM1196-91. **In-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack measurements**. ASTM Standard C 1196-91. 1991.
- ASTM1197-91. **In-situ measurement of masonry deformability properties using flat-jack method**. ASTM Standard C 1197-91. 1991.
- BINDA, L. & TIRABOSCHI, C. **Flat-Jack Test: A Slightly Destructive Technique for the Diagnosis of Brick and Stone Masonry Structures**. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*. pp 449–472. 1999.
- BINDA, L., ROSSI, P., LANDRIANI, G. **Diagnostic Analysis of Masonry Buildings**. IABASE Symp. on Strengthening of building structures. Venezia. 1983.
- BRIAUD, J. **The Pressuremeter**. Trans Tech Publications Roterdão, Balkema. 1992
- COSTA C., RIBEIRO D., JORGE P., SILVA R., CALÇADA R. & ARÊDE A. **Calibration of the numerical model of a short-span masonry railway bridge based on experimental modal parameters**. *Procedia Engineering*, Volume 114, pp 846-853. 2015.
- COSTA, C., RIBEIRO, D., JORGE, P., SILVA, R., ARÊDE, A., CALÇADA, R. **Calibration of the numerical model of a stone masonry railway bridge based on experimentally identified modal parameters**. *Engineering Structures*, Volume 123, pp 354-371. 2016.
- MÉNARD, L. **The Ménard Pressuremeter, Interpretation and application of pressuremeter test results to Foundation Design**, Sols Soils. 1975.
- NF P 94 110-1. **Ménard Sols: reconnaissance et essais, Essai presiométrique Ménard**. 2000
- REFER, EPE. **Peças desenhadas do projeto da ponte de S. Pedro da Torre, Viana do Castelo**. 1875.
- REFER, EPE. **Peças desenhadas do projeto do viaduto de Durrães, Viana do Castelo**. 1876.
- RIBEIRO, D., COSTA, C., SILVA, R., JORGE, P., ARÊDE, A., CALÇADA, R. **Ensaio Dinâmicos de Pontes Ferroviários em Alvenaria de Pedra**. 1º Congresso de Ensaio e Experimentação em Engenharia Civil. Lisboa, Portugal. 2016.
- RILEM-LUM.D.2/3. **In-situ stress and strength tests on masonry based on the flat-jack**. 1990.
- SUSTAINABLE BRIDGES. **Masonry arch bridges**. Background document D4.7. Sustainable Bridges, EU FP6. 2007.