

CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E MECÂNICA DE PAREDES EM PERPIANHO DE GRANITO

C. Almeida¹, J. Guedes², A. Arêde², A. Costa³

¹Aluna Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

²Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

³Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro



RESUMO

O presente trabalho teve por objectivo o estudo de caracterização geométrica, material e mecânica de paredes de alvenaria de pedra pertencentes a um edifício do início do séc. XX, localizado no centro da cidade do Porto, que foi sujeito a obras de reabilitação. O levantamento geométrico das paredes foi realizado mediante registo fotográfico, sendo recolhidas amostras de material para análise em laboratório. Paralelamente, foi realizada uma campanha de ensaios de compressão em laboratório em painéis de parede extraídos de um elemento a demolir, de modo a estimar a capacidade resistente e a deformabilidade destas alvenarias. Na tentativa de avaliar a influência do preenchimento dos vazios internos, foi injectada argamassa de cal compatível com a original numa das paredes previamente ensaiadas à compressão em fase elástica, levando-a posteriormente à rotura. Os resultados deste ensaio foram devidamente analisados e comparados com os obtidos na parede no estado original.

1. INTRODUÇÃO

A reabilitação de edifícios antigos em alvenaria de pedra constitui um tema de interesse actual dada a crescente preocupação em revitalizar centros históricos onde predominam construções deste tipo. Trata-se de edifícios caracterizados por uma considerável complexidade associada aos materiais empregues, à sua disposição e funcionamento conjunto, para os quais a definição de leis de comportamento continua a constituir um grande desafio. Focando em particular as paredes em alvenaria de pedra, a caracterização mecânica destas estruturas deve ser efectuada atendendo aos seus elementos constituintes e à sua geometria, procurando definir tipologias mais frequentes.

Trabalhos de investigação desenvolvidos em Itália por (Pennazi et al. 1997, Binda 2000) em edifícios danificados pelos sismos permitiram caracterizar e classificar as alvenarias de acordo com a análise da secção transversal. Em Portugal, salienta-se o trabalho realizado por Casella (2003) no levantamento de tipologias de construção muraria em diversas regiões do país e, como primeira tentativa de criação de uma base de dados, o trabalho de Pagaimo (2004) dedicado ao estudo de paredes de pedra da Vila de Tentúgal. Na avaliação das propriedades mecânicas de alvenarias vários autores procuraram reproduzir casos reais em laboratório, concebendo modelos físicos que pretendem respeitar as características da parede no seu estado original. Refere-se o estudo experimental realizado em Itália por Valluzzi et al.

(2001) na avaliação do comportamento mecânico de paredes de três folhas, submetendo-as a ensaios de compressão, bem como de outros autores como (Oliveira et al. 2006, Vintzileou et al. 2007 e Sorour et al. 2009). Relativamente a ensaios de paredes *in situ*, referem-se os trabalhos desenvolvidos na região de Umbria-Marche, em Itália, por Corradi et al. (2002) que envolveram a análise de painéis de alvenaria previamente isolados da restante estrutura para serem submetidos a ensaios de corte e de compressão diagonal.

Neste sentido, o presente trabalho pretende dar um contributo para a compreensão do comportamento estrutural de alvenarias de pano único, uma tipologia frequente em construções antigas na cidade do Porto. Este estudo inicia-se pela caracterização geométrica de paredes pertencentes a um caso de estudo, seguindo-se a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais isoladamente e em painéis extraídos de uma parede a demolir mediante a realização de ensaios de compressão em laboratório. Os resultados obtidos nos painéis originais são devidamente analisados e comparados com os obtidos após a injeção com argamassa. Este trabalho enquadra-se no âmbito de uma tese de doutoramento que se encontra em fase de desenvolvimento e que procura relacionar as características geométricas de panos de parede com as respectivas propriedades mecânicas.

2. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

O edifício em estudo, identificado por A na Fig. 1, localiza-se na Rua António Carneiro, nº 373, 375 e 381, no centro da cidade do Porto, tendo sido mandado construir em 1916 por um importante industrial portuense. Funcionou como armazém de apoio a uma fábrica têxtil situada no mesmo quarteirão e como centro político na tomada de decisões na vida social da cidade. Em 1918, o mesmo empresário decidiu construir um segundo edifício contíguo ao primeiro, com funções de balneário, creche e cantina, destinado aos operários das fábricas e respectivas famílias. Dada a sua finalidade, ambos os edifícios apresentam áreas bastante amplas

e a utilização conjunta dos espaços terá acontecido mais tarde, com a abertura de uma porta ao nível do piso superior. O edifício apresenta uma configuração rectangular em planta de $11.5 \times 30 \text{m}^2$, exibindo um piso enterrado (piso -1), dois pisos elevados (piso 0 e piso 1) e cobertura com altura considerável onde se situam as mansardas, Fig. 2. Os pisos 0 e 1 são totalmente amplos, enquanto no piso-1 surge uma parede estrutural em alvenaria de pedra que divide este espaço e serve de apoio ao vigamento de madeira, Fig. 3.

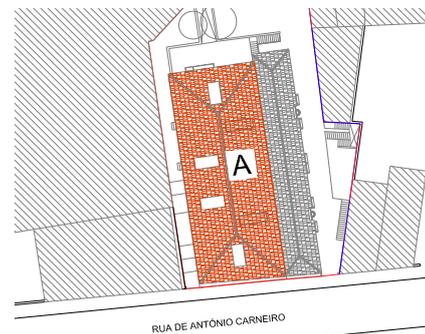


Fig. 1 – Planta de localização do edifício em estudo, identificado por A



Fig. 2 – Alçado principal do edifício

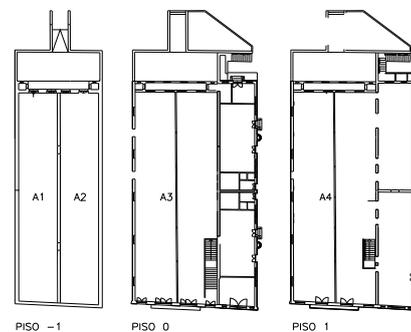


Fig. 3 – Configuração em planta (piso -1, piso 0 e piso 1)

Trata-se de uma construção tradicional, típica da cidade do Porto, caracterizada por

paredes estruturais em alvenaria de pedra, a maioria rebocadas, pavimentos em vigado de madeira cobertos por soalho e cobertura em asna de madeira revestida a telha cerâmica, Fig. 4 e Fig. 5. As paredes da fachada principal são rebocadas ou revestidas a azulejo, apresentando elementos em cantaria de granito, nomeadamente nas molduras dos vãos. Na fachada posterior e ao nível do piso 1 surge uma varanda em betão armado para as instalações sanitárias, construída numa fase posterior.

À data do estudo, o edifício encontrava-se em obras de reabilitação que envolveram a substituição dos pavimentos de madeira por lajes aligeiradas em betão armado e da cobertura em madeira por uma estrutura metálica. A maioria das paredes foram picadas colocando a pedra à vista e as obras incluíram a demolição total da parede estrutural interior localizada no piso -1, bem como a demolição parcial de determinadas zonas das paredes das empenas para abertura de vãos para janelas e portas, Fig. 6.



Fig. 4 – Compartimento A1 no piso -1



Fig. 5 – Compartimento A4 no piso 1



Fig. 6 – Interior do edifício após a retirada dos pavimentos e da cobertura

3. CARACTERIZAÇÃO DA ALVENARIA

A caracterização de paredes antigas em alvenaria de pedra deve passar por uma investigação exaustiva da sua geometria, dos materiais constituintes e das técnicas de construção adoptadas. Neste sentido, a primeira abordagem ao edifício consistiu na aplicação de uma ficha tipo concebida para esse efeito, com a finalidade de recolher e registar as informações necessárias à realização deste estudo. Foi inspirada em fichas desenvolvidas em Itália no levantamento de edifícios antigos em alvenaria de pedra danificados pelos sismos, sendo a informação agrupada em secções, desde a descrição geral do edifício até ao detalhe dos seus elementos constituintes, focando em especial os aspectos relacionados com a caracterização da alvenaria.

Na caracterização geométrica das paredes foram seleccionadas zonas de estudo com a finalidade de identificar o tipo de aparelho, de assentamento e a tipologia da secção transversal, sendo avaliadas as percentagens de material (pedra, argamassa e vazios) em alçado e na secção transversal após corte com disco de serra diamantado. O procedimento adoptado consistiu em fotografar as zonas a estudar, utilizando uma régua como factor de escala idealizada para esse efeito. A partir desta informação e após devido tratamento da imagem aplicando ferramentas computacionais, foram avaliadas as quantidades de cada material.

Um dos casos estudados diz respeito à parede da empena direita, onde foram seleccionadas três zonas ao nível do piso 1

(E1, E2 e E3), Fig. 7, obtendo-se os levantamentos geométricos em alçado e em corte visualizados, respectivamente, na Fig. 8 e Fig. 9, após o tratamento da imagem.

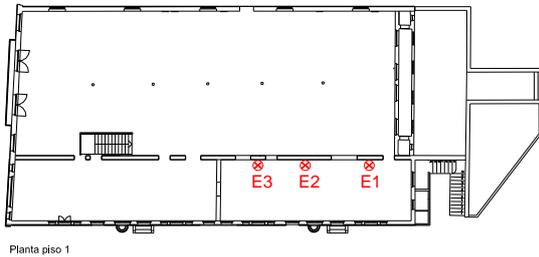


Fig. 7 – Levantamento geométrico da parede da empena direita, piso 1

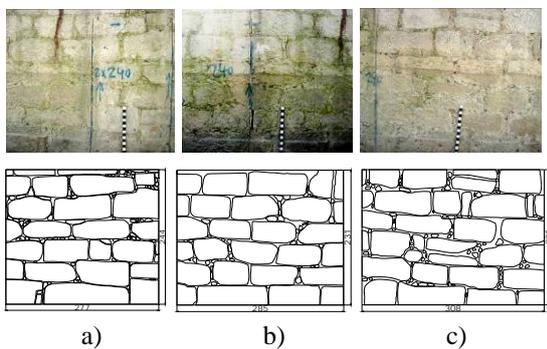


Fig. 8 – Levantamento geométrico do alçado da parede da empena direita: a) E1, b) E2 e c) E3

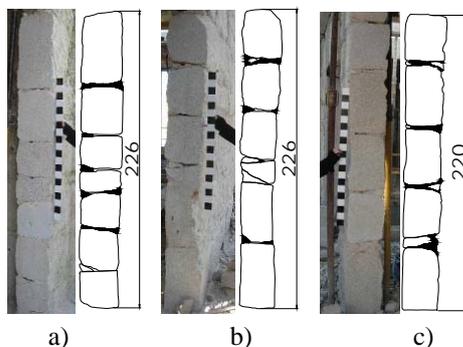


Fig. 9 – Levantamento geométrico da secção transversal da parede da empena direita: a) E1, b) E2 e c) E3

Da observação efectuada constatou-se que, de uma forma genérica, se trata de uma alvenaria de junta argamassada, constituída por pedras de média/grande dimensão (50 a 90cm medida na diagonal) dispostas segundo um alinhamento regular, evidenciando significativo número de calços com pequenos fragmentos de pedras e, pontualmente, com pedaços de tijolo. A pedra, de cor amarelada, apresenta uma forma rectangular e encontra-se em razoável

estado de conservação. A argamassa das juntas tem espessura variável entre 0.5 e 2cm, de coloração creme, desempenhando funções de assentamento e enchimento e apresenta-se bastante friável. A secção transversal é constituída por uma única folha de pedra com 30cm de espessura, observando-se uma distribuição de vazios generalizada em altura que se torna mais evidente na linha média da secção. De facto, as pedras encontram-se calçadas nos bordos exteriores com pedras e argamassa, sendo o preenchimento interior menos cuidado, denotando-se a ausência de argamassa nestas zonas. A partir das imagens obtidas foram analisadas as percentagens de material no alçado e na secção transversal, cujos resultados se encontram indicados na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente. No paramento exterior apenas foi possível identificar a percentagem de pedra, sendo o restante material, designado por enchimento, obtido do somatório de calços de pedra, argamassa e vazios.

Esta análise permitiu verificar que a avaliação da quantidade de material pela observação do alçado induz em erros resultantes da dificuldade de estimar a real dimensão das pedras que, no presente caso, correspondeu a uma subavaliação da quantidade de pedra em cerca de 11 % face aos restantes materiais. Por outro lado, o estudo da secção transversal permitiu obter resultados mais realistas. No entanto, nem sempre é possível ou viável o acesso a esta secção.

Foram, ainda, estudadas outras secções transversais, nomeadamente da parede de empena esquerda resultante da necessidade de criar uma abertura com cerca de 7m de vão, bem como da parede interior a demolir que foi seccionada em vários painéis para

Tabela 1 – Caracterização material em alçado da parede da empena direita, piso 1

| Zona | P % | E % |
|-------|--------|--------|
| E1 | 86.05 | 13.95 |
| E2 | 85.50 | 14.50 |
| E3 | 81.54 | 18.46 |
| média | 84.36 | 15.64 |

P- pedra; E- enchimento (calços+argamassa+vazios)

Tabela 2 – Caracterização material em corte da parede da empena direita, piso 1

| Zona | P % | C % | A % | V % | E % |
|-------|------|-----|-----|-----|-----|
| E1 | 94.9 | 0.5 | 3.5 | 1.1 | 5.1 |
| E2 | 93.9 | 2.6 | 2.3 | 1.2 | 6.1 |
| E3 | 91.8 | 3.8 | 4.0 | 0.4 | 8.2 |
| média | 93.5 | 2.3 | 3.4 | 0.8 | 6.5 |

P-pedra, C-calços, A-argamassa, V-vazios, E-enchimento (C+A+V)

que foi seccionada em vários painéis para posterior campanha experimental, ambas localizadas no piso-1, Fig. 10. A este nível, a parede da empena esquerda caracteriza-se por um pano único com 50cm de espessura, as pedras apresentam uma forma rectangular com dimensão variável entre 50 e 90cm, observando-se igualmente a ausência de material na zona interior da parede. A parede interior caracteriza-se por uma folha única com cerca de 40cm de espessura, apresentando uma distribuição de vazios muito generalizada em altura, mais evidente na zona interior da secção.

A partir do tratamento das imagens foram medidas as percentagens de material ao longo das secções, Fig. 11 e Fig. 12, obtendo-se os valores indicados na Tabela 3 e Tabela 4. Apesar das paredes apresentarem a pedra à vista, não foi possível efectuar o levantamento geométrico em alçado devido à existência de uma considerável camada de argamassa nas juntas que impedia a correcta avaliação do contorno da pedra.

Face aos resultados obtidos da análise da secção transversal, na Fig. 13 pode observar-se a evolução da percentagem dos materiais para espessuras de pano de parede de 50, 40 e 30 cm, relativas à empena esquerda, interior e empena direita. Desta análise verificou-se que a percentagem de calços, argamassa e vazios aumenta com o aumento da espessura da parede.

Este tipo de informação constitui um ponto de partida na caracterização material de alvenarias de pano único, tendo em vista a construção de modelos de parede representativos de casos reais.

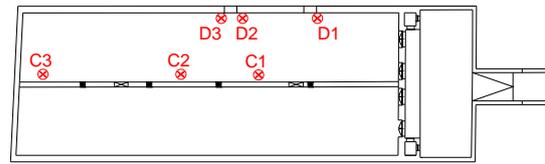


Fig. 10 – Levantamento geométrico da parede da empena esquerda e interior

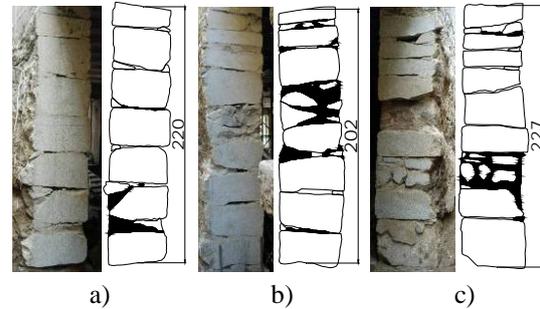


Fig. 11 – Levantamento geométrico da secção transversal da parede da empena esquerda: a) D1, b) D2 e c) D3

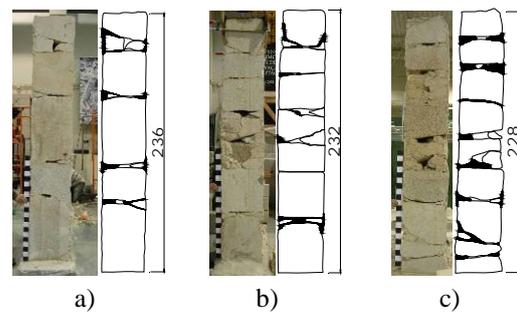


Fig. 12 – Levantamento geométrico da secção transversal da parede interior: a) C1, b) C2 e c) C3

Tabela 3 – Caracterização material em corte da parede da empena esquerda, piso -1

| Zona | P % | C % | A % | V % | E % |
|-------|------|-----|------|-----|------|
| D1 | 87.7 | 4.7 | 4.8 | 2.8 | 12.3 |
| D2 | 78.6 | 4.1 | 11.1 | 6.2 | 21.4 |
| D3 | 78.7 | 9.1 | 8.0 | 4.2 | 21.3 |
| média | 81.7 | 6.0 | 7.9 | 4.4 | 18.3 |

P-pedra, C-calços, A-argamassa, V-vazios e E-enchimento (C+A+V)

Tabela 4 – Caracterização material em corte da parede interior, piso -1

| Zona | P % | C % | A % | V % | E % |
|-------|------|-----|-----|-----|------|
| C1 | 89.4 | 5.6 | 3.3 | 1.7 | 10.6 |
| C2 | 89.7 | 5.1 | 2.9 | 2.3 | 10.3 |
| C3 | 84.7 | 3.9 | 7.8 | 3.6 | 15.3 |
| média | 87.9 | 4.8 | 4.7 | 2.6 | 12.1 |

P-pedra, C-calços, A-argamassa, V-vazios e E-enchimento (C+A+V)

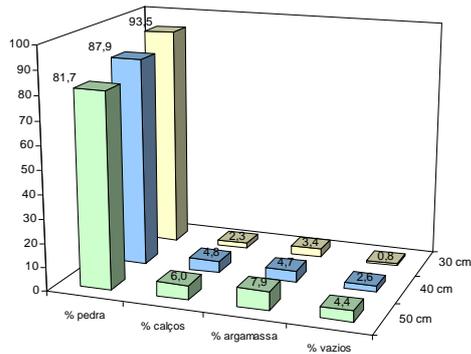


Fig. 13 – Evolução da percentagem de material para diferentes espessuras de pano de parede

4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Durante a fase de demolição da parede interior foram recolhidas amostras de pedras para posterior caracterização mecânica em laboratório. Foram extraídas quinze carotes cilíndricos de seis pedras devidamente identificadas, de modo a avaliar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Estes ensaios foram realizados na prensa do Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural (LABEST), em provetes secos mantidos nas condições ambiente do laboratório. Em termos de resistência à compressão obteve-se o valor médio de 60.84MPa e para o módulo de elasticidade o valor de 26GPa.

Paralelamente, foram recolhidas amostras de argamassa com vista à caracterização química e mineralógica. Os ensaios foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e compreenderam a análise em dissolução ácida para a definição do traço, a aplicação de Difracção de raios X (DRX) para a determinação da composição mineralógica e a utilização de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) para a avaliação da composição química. Os resultados obtidos permitiram concluir que se trata de uma argamassa à base de cal aérea e areia, com o traço 1:3.

5. TRANSPORTE DE PAINÉIS PARA O LABORATÓRIO

Dado o interesse no estudo deste tipo de alvenarias e atendendo à dificuldade de encontrar paredes disponíveis para serem

ensaiadas, procedeu-se ao corte e transporte para o laboratório de troços da parede interior a demolir, de modo a elaborar uma campanha de ensaios de caracterização mecânica. A parede com cerca de 30m de desenvolvimento foi seccionada em vários troços dando origem a quatro painéis de 1.20m de largura (PP1 a PP4) e a dois painéis de 1.60m de largura (PG1 e PG2), ambos com 2.50m de altura e 0.40m de espessura. Para tal, recorreu-se a uma máquina de corte com disco de serra diamantado que, após a identificação dos troços a extrair, permitiu realizar os cortes necessários até ao nível da fundação, Fig. 14.



Fig. 14 – Corte de troços de parede em obra

Por se tratar de troços de parede de consideráveis dimensões situados num piso abaixo do arruamento, foi necessário estudar um sistema de confinamento que permitisse a extracção, a elevação e o transporte para o laboratório em adequadas condições de segurança. Efectivamente, consistiu numa operação delicada que envolveu cuidados especiais durante a sua execução. Foi solicitado apoio à empresa Mota-Engil na definição do sistema de acondicionamento e de transporte, adoptando-se uma estrutura da Doka-Cofragens. A sequência de operações realizada pode ser visualizada na Fig. 15.

Após efectuar o corte até ao nível da fundação foram realizados furos na base da parede de modo a introduzir varões Dywidag que garantiram a fixação à estrutura de confinamento. Esta estrutura foi introduzida de cima para baixo, sendo posteriormente sujeita a aperto mediante os varões Dywidag dispostos na base e no topo da parede. Este procedimento foi aplicado a todos os painéis de parede a transportar,



Fig. 15 – Extracção e transporte de troços de parede para o laboratório

cuja elevação e colocação no veículo de transporte foi assegurado pela grua disponível em obra.

Apesar dos devidos cuidados durante a fase de corte e de transporte para o

laboratório foi necessário proceder a pequenas reparações resultantes do destacamento de pedras junto aos bordos das paredes, realizada por experientes pedreiros, Fig. 16. Durante esta operação foi aplicada uma argamassa de cal hidratada e saibro no seu assentamento com traço 1:3, tendo-se preenchido moldes prismáticos ($16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$) para ensaiar à flexão e à compressão aos 28, 60 e 90 dias de idade. Em termos de resistência à compressão obtiveram-se valores de 1.68MPa, 1.78MPa e 1.54MPa correspondentes às idades indicadas, obtidos da média de três provetes ensaiados. Verificou-se uma redução imprevista da resistência dos 60 para os 90 dias, provavelmente devida à fissuração interna resultante da retracção das amostras.

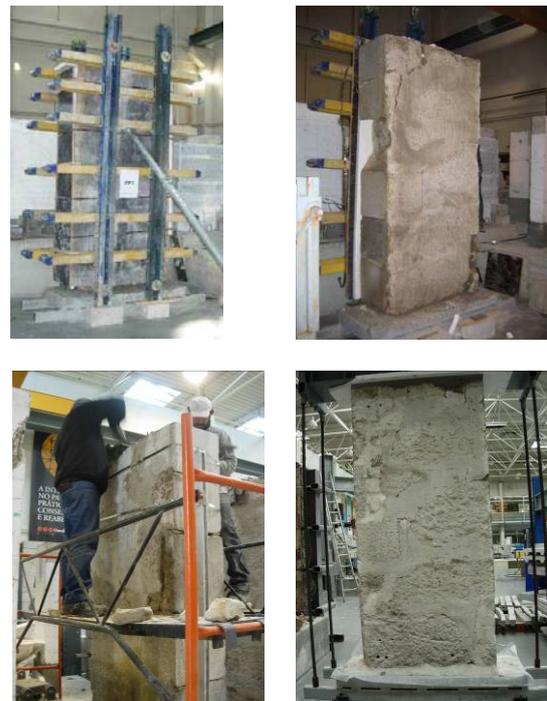


Fig. 16 – Reparação de painéis de parede em laboratório

6. ENSAIO DE COMPRESSÃO

Na caracterização mecânica da alvenaria em estudo foi definida uma campanha de ensaios experimentais nas paredes extraídas do local. Os painéis identificados por PP1, PP2 e PP3 foram submetidos a ensaios de compressão. O painel PP4 será dividido em dois para a realização do ensaio de compressão diagonal e os painéis PG1 e

PG2 vão ser submetidos a ensaios de corte horizontal.

6.1. Programa do ensaio

O ensaio de compressão foi realizado com controlo de deslocamentos ($15\mu\text{m/s}$) na prensa do laboratório de materiais de construção da FEUP (LMC), segundo a norma NP EN 1052-1 (2002).

Pelo facto dos painéis terem sido extraídos de uma parede existente houve a necessidade de conceber uma estrutura de confinamento lateral que garantisse a estabilidade das faces de corte. Esta estrutura de confinamento foi aplicada nos topos da parede, sendo constituída por perfis e chapas metálicas, cujo aperto foi assegurado por varões Dywidag dispostos ao longo da altura da parede e instrumentados por células de carga.

De modo a garantir o adequado ajuste entre a superfície da parede e a da estrutura metálica foi entreposta, em ambos os lados, uma manga plástica preenchida com calda de cimento. Para garantir uniformidade na distribuição das cargas verticais foi colocada na face superior da parede uma viga metálica constituída por quatro perfis HEB200 soldados e rigidificados com nervuras verticais.

A medição da deformação, em cada face da parede, foi realizada mediante a colocação de quatro LVDT's para o registo dos deslocamentos verticais (dois a toda a altura e dois mais localizados) e quatro LVDT's para a medição da deformação horizontal. Para a aquisição dos dados dos canais de leitura foi adoptado o programa desenvolvido no Laboratório de Engenharia Sísmica Estrutural (LESE), recorrendo ao software Labview, (www.ni.com). O esquema adoptado no ensaio pode ser visualizado na Fig. 17.

Para os painéis PP1 e PP2, a primeira fase do ensaio consistiu no aperto dos tirantes (1kN/tirante, perfazendo 8kN no total), seguindo-se a aplicação da carga vertical monotónica até à rotura. Durante esta fase foram registadas as forças horizontais transmitidas aos tirantes. No entanto, o comportamento da parede na direcção horizontal não é analisado no âmbito deste

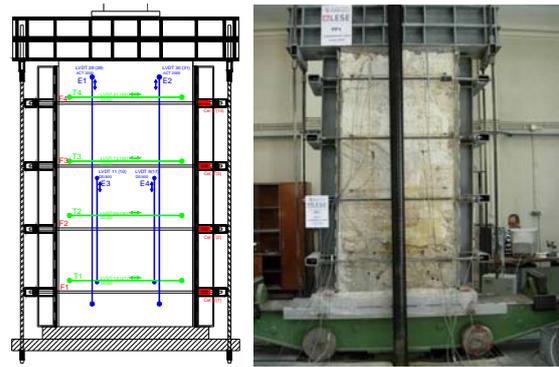


Fig. 17 – Setup do ensaio

artigo. Numa segunda fase, e após aliviar o confinamento lateral, foi novamente aplicada uma carga crescente na estrutura até se observar a rotura generalizada. Este procedimento permitiu avaliar a resistência e a deformabilidade durante a primeira fase do ensaio e observar a resposta da estrutura danificada sem confinamento. Nesta segunda fase avaliou-se de forma sumária o efeito do confinamento na rigidez e na capacidade resistente da parede.

Tendo uma estimativa da capacidade resistente desta alvenaria, o ensaio da parede PP3 iniciou-se com a aplicação de dois ciclos de carga-descarga sobre a parede confinada, tendo em vista a determinação do módulo de elasticidade no estado original. Numa segunda fase, procedeu-se à injeção desta parede PP3 com argamassa compatível com a original, de modo a preencher os vazios existentes e permitir avaliar o efeito desta operação num novo ensaio de compressão levado até à rotura do painel, após 90 dias de cura. Por último, e após a rotura da parede foi, ainda, analisado o seu comportamento aliviando o confinamento lateral.

6.2. Análise de resultados no estado original

a) Painéis PP1 e PP2

De acordo com os valores registados ao longo do ensaio foi possível quantificar parâmetros de resistência e de deformabilidade dos painéis PP1 e PP2. Da análise dos deslocamentos verticais verificou-se que as medições efectuadas nos LVDT's dispostos em cada face da parede são concordantes entre si durante a fase inicial do ensaio, surgindo um pequeno desfasa-

mento à medida que ocorrem danos localizados em pedras. Em termos globais, o máximo deslocamento vertical registado no painel PP1 foi de 40mm relativo a uma força de 1700kN e no painel PP2 foi de 23mm correspondente a uma força de 1200kN.

Mediante a análise do diagrama tensão-deformação, que inclui as duas fases do ensaio (com e sem confinamento lateral), Fig. 18, a tensão máxima de compressão atingida foi de 3.94MPa no painel PP1 e de 2.50MPa no painel PP2 durante a primeira fase, reduzindo para 1.87MPa e 1.34MPa, respectivamente, durante a segunda fase do ensaio, sem confinamento lateral. Da observação do referido diagrama verifica-se que a deformabilidade das duas paredes é semelhante. A diferença entre os valores de resistência resulta da existência de singularidades associadas à geometria e às características dos materiais que no caso da PP2 provocaram a localização do dano numa das pedras, antecipando a rotura.

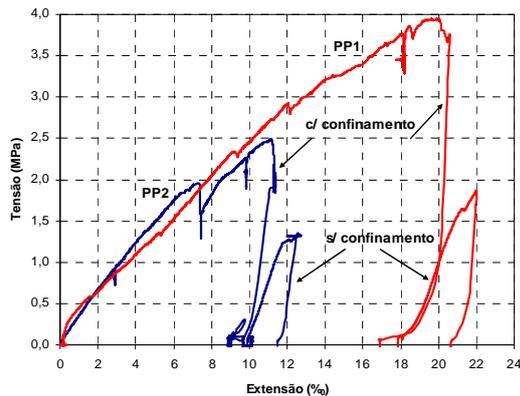


Fig. 18 – Diagrama σ - ϵ para o painel PP1 e PP2

O módulo de elasticidade avaliado na primeira fase do ensaio foi determinado considerando o seu valor secante (entre 10 e 30% da resistência máxima), admitindo dois tipos de análise. Numa primeira análise foi calculado sem atender ao confinamento lateral, obtendo-se valores de 0.22GPa para o PP1 e 0.33GPa para o PP2. Numa segunda análise, considerou-se o efeito do confinamento lateral, admitindo estado plano de tensão e aplicando as expressões clássicas da Teoria da Elasticidade, Eq. (1a) e Eq. (1b).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \end{Bmatrix} \Rightarrow \quad (1a)$$

$$\begin{Bmatrix} A \\ A\nu \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \epsilon_y \\ \epsilon_y & \epsilon_x \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix}; A = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (1b)$$

Os valores obtidos por esta análise e para $\nu_{\text{médio}} = 0.3$, foram da mesma ordem de grandeza dos determinadas inicialmente devido ao baixo nível de tensão horizontal instalado na parede durante esta primeira fase do ensaio (de facto, a tensão média horizontal foi apenas cerca de 6% da tensão vertical), o que permitiu constatar ser desprezável este efeito na avaliação do módulo de elasticidade. Em termos de valores médios, admitindo uma relação linear entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão obtém-se a expressão Eq. (2), muito diferente da relação que vem proposta no Eurocódigo 6 (2000).

$$E = 85 f_c \quad (2)$$

Durante a segunda fase do ensaio (sem confinamento) constatou-se que a rigidez de recarga é cerca do dobro da rigidez obtida durante a primeira fase do ensaio (com confinamento). Na realidade, estas paredes caracterizam-se por grandes deformações plásticas, evidenciando em fase de recarga uma rigidez superior à da fase de primeira carga.

O padrão de fissuração observado foi essencialmente vertical, sendo mais evidente a meia altura da parede, registando-se uma instabilidade decorrente do esmagamento de pedras que teve início para tensões na ordem de 1.5MPa. A aparência final da parede PP1 pode ser observada na Fig. 19, onde se representa o padrão de fissuração e as zonas de destacamento material observado em alçado e na secção transversal.

b) Painel PP3

O estudo do painel PP3 no estado original centrou-se na avaliação do módulo de elasticidade. Para tal, foram aplicados dois ciclos de carga-descarga, o primeiro

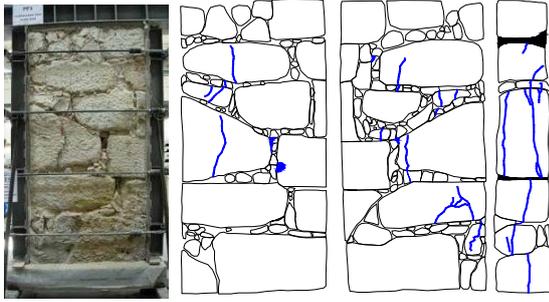


Fig. 19 – Padrão de fissuração do painel PP1

para uma força máxima de 500kN (cerca de 1/3 da carga máxima registada nos ensaios anteriores) e o segundo ciclo para uma carga até 700kN, estando a parede sujeita a confinamento lateral. A partir do diagrama tensão-extensão representado na Fig. 20 foi determinado o módulo de elasticidade de carga inicial e de recarga, cujos resultados estão indicados na

Tabela 5.

Verificou-se que durante a fase de carga a parede exibe uma rigidez semelhante em ambos os ciclos. Por outro lado, durante a fase de recarga a rigidez é, tal como nos casos anteriores, consideravelmente superior devido às características de deformabilidade do material das juntas, nomeadamente do efeito de compactação resultante da rotura de ligações materiais durante a aplicação da primeira carga. Numa fase de recarga corresponde a uma situação já experimentada envolvendo menores deformações. Para novos estados de tensão vão ser quebradas novas ligações materiais originando maiores deformações. Nesta fase do ensaio não foi observada fissuração, registando-se apenas algum destacamento de argamassa de reboco.

Tabela 5 – Módulo de Elasticidade do painel PP3

| 1º ciclo | | 2º ciclo | | recarga |
|---------------------|------------|---------------------|------------|------------|
| σ_c (MPa) | E (GPa) | σ_c (MPa) | E (GPa) | E (GPa) |
| 1.05 | 0.36 | 1.50 | 0.39 | 1.37 |

6.2. Injecção com argamassa

Na injecção da parede PP3 foi aplicada uma argamassa pobre constituída por uma mistura de cal hidratada, cal hidráulica, areia e água, tendo sido vibrada de modo a obter uma massa homogénea.

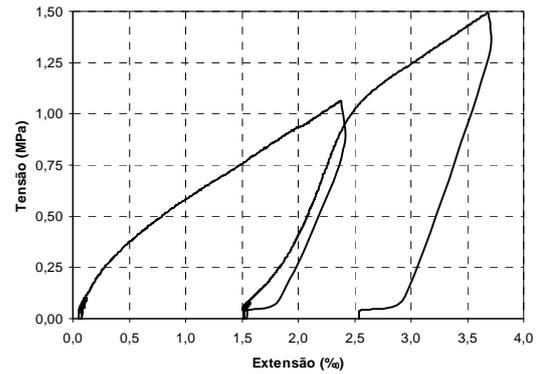


Fig. 20 – Diagrama σ - ϵ no ensaio do painel PP3

A sequência de operações adoptada consistiu, basicamente, em picar superficialmente as juntas de modo a definir pontos de inserção da argamassa. Seguidamente, foram introduzidos tubos de plástico em furos realizados nas duas faces da parede, desfasados entre si, de modo a garantir uma adequada penetração da argamassa e preenchimento dos vazios. Finalizada esta operação, as juntas foram seladas com argamassa à base de cal hidráulica e saibro (traço 1:3) para evitar fugas da injecção durante esta operação, colocando ainda gesso na base da parede. A injecção foi realizada a baixa pressão (3 bar), iniciando pela parte inferior da parede e procurando injectar a argamassa tubo a tubo por nível até ao preenchimento total de todos os tubos em ambas as faces da parede, Fig. 21.

Esta operação durou cerca de 30min., tendo sido gastos aproximadamente 85l de argamassa. Atendendo ao volume total da parede de 1.17m³ obteve-se um índice de vazios na ordem dos 7.3%, valor consideravelmente superior ao medido no levantamento geométrico da secção transversal do painel PP3 (2.35%). Esta diferença de valores deve estar relacionada com o facto de no primeiro estudo não ser contabilizado os vazios ao longo das juntas verticais, assim como a penetração da calda injectada na argamassa existente.

6.3. Análise de resultados pós injecção

Após a injecção, o painel PP3 foi novamente sujeito a uma primeira fase de aplicação de ciclos de carga-descarga de modo



Fig. 21 – Injeção com argamassa na parede PP3

a reproduzir a sequência de ensaio adoptada na parede no estado original. O primeiro ciclo decorreu até à carga de 500kN, efectuando de seguida três ciclos para uma força máxima de 700kN.

A partir do diagrama tensão-extensão e desprezando o efeito do confinamento lateral, procedeu-se à determinação do módulo de elasticidade secante para o primeiro e o segundo ciclo de carga, obtendo-se os valores indicados na

Tabela 6. Efectivamente, verificou-se que o preenchimento dos vazios internos da parede conduziu a um aumento significativo de rigidez relativamente à situação original, superior ao dobro. Apesar de se tratar de uma parede de paramento único constituída por pedras de considerável dimensão, os vazios internos influenciam em muito a deformabilidade da estrutura, tal como se pode observar na Fig. 22, onde se ilustram as curvas obtidas no ensaio da parede original e após a injeção.

Tabela 6 – Módulo de Elasticidade do painel PP3, após injeção

| 1º ciclo | | 2º ciclo | |
|---------------------|------------|---------------------|------------|
| σ_c (MPa) | E (GPa) | σ_c (MPa) | E (GPa) |
| 1.05 | 0.93 | 1.50 | 1.09 |

A segunda fase do ensaio consistiu na aplicação de cargas crescentes até à rotura do painel, atingindo a tensão máxima de 5.4MPa, Fig. 23, embora não se tenha conseguido obter a zona de amolecimento da curva de resposta por questões de segurança de equipamento e pessoal. Comparando este resultado com o valor médio

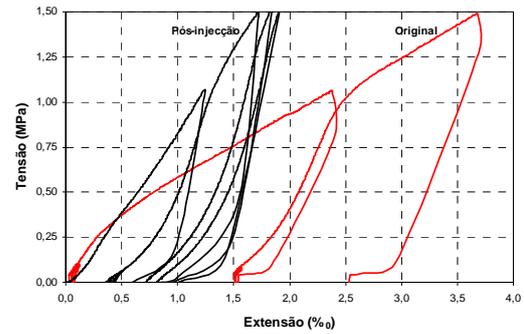


Fig. 22 – Comparação diagrama σ - ϵ antes e após a injeção, painel PP3

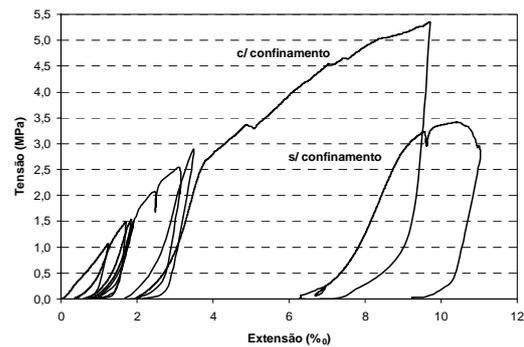


Fig. 23 – Diagrama σ - ϵ do ensaio de compressão do painel PP3, após injeção

obtido no ensaio dos painéis PP1 e PP2, verificou-se que correspondeu a um acréscimo de resistência de cerca de 68%. A análise do painel PP3 finalizou com a aplicação de novo carregamento na estrutura danificada após aliviar os tirantes laterais, alcançando a tensão de 3.4MPa. Em termos de rigidez, os valores encontrados nesta fase, 1.3GPa, são ligeiramente superiores aos obtidos na primeira fase do ensaio.

7. CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentadas as fases que envolveram a caracterização geométrica, material e mecânica de paredes em alvenaria de pedra de pano único pertencentes a um edifício do séc. XX da cidade do Porto. O levantamento geométrico de panos de parede mediante registo fotográfico permitiu obter uma estimativa da percentagem de materiais (pedra, calços, argamassa e vazios) nestas alvenarias e sua evolução em função da espessura da secção transversal. Apesar da escassez de informação deste tipo e dado o

número limitado de casos analisados, estes resultados servem como ponto de partida na construção de modelos em laboratório representativos de casos reais, permitindo a interpretação do comportamento deste tipo de estruturas. Os resultados dos ensaios de compressão em painéis extraídos do caso de estudo revelaram valores de resistência dentro do intervalo previsto e valores de módulo de elasticidade inferiores aos esperados, nomeadamente quando comparados com propostas regulamentares. Pela injeção de argamassa num dos painéis analisados foi possível constatar que a elevada deformabilidade da estrutura está em parte relacionada com a existência de grandes vazios no interior da secção da parede. A operação de injeção de uma argamassa pobre permitiu obter apreciáveis ganhos de rigidez e de resistência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração prestada pela empresa Mota-Engil durante as operações de transporte das paredes para o laboratório, à Arq. Adriana Florêt, Eng. Domingos Martins e à Empresa 3M2P pelo apoio concedido durante a execução dos trabalhos em obra, em particular o especial empenho do encarregado da obra Sr. Albertino e do pessoal do LESE, Sr. Valdemar Luís e André Martins. Este trabalho inclui pesquisas realizadas com o apoio financeiro da FCT, através da unidade de investigação CEC (Centro de Estudos de Construção da FEUP) e a bolsa de doutoramento concedida à primeira autora.

REFERÊNCIAS

Binda, L. 2000. Caratterizzazione delle murature in pietra e mattoni ai fini dell'individuazione di opportune tecniche di riparazione, CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti” - Roma, 2000, 181 pp.

Casella, G., 2003. Gramáticas de Pedra. Levantamento de Tipologias de Construção Muraria”, Centro Regional de Artes Tradicionais.

Corradi, M., Borri, A., Vignoli, A. 2002. Experimental study on the determination of strenght of masonry walls, *Construction and Building Materials* 17, p. 325–337.

Oliveira, D. V., Lourenço, P.B. 2006. Experimental Behaviour of Three-Leaf Stone Masonry Walls, Conference and Brokerage Event, The Construction Aspects of Built Heritage Protection, Dubrovnik, Croatia.

NP EN 1052-1 2002. Método de ensaio para alvenaria: Determinação da resistência à compressão.

NP ENV1996 1-1 2000. Eurocódigo 6, Projecto de estruturas de alvenaria, Parte 1-1: Regras gerais para edifícios, regras para alvenaria armada e não armada.

Pagaimo, F. 2004. Caracterização Morfológica e Mecânica de Alvenarias Antigas: Caso de estudo da Vila de Tentúgal, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil.

Penazzi, D., Palma, M. 1997. Studio e qualificazione di murature in pietra della Lunigiana per la scelta di adeguate tecniche di miglioramento strutturale in zona sismica, final year thesis, Faculty of Architecture, Politecnico di Milano.

Sorour, M.M., Parsekian, G.A., Duchesne, D., Paquette, J., Mufti, A., Jaeger, L., Shrive, N.G. 2009. Evaluation of Young’s modulus for stone masonry walls under compression, 11th Canadian Masonry Symposium, Toronto, Ontario.

Valluzzi, M. R., Porto, F. and Modena, C. 2001. Behaviour of multi-leaf stone masonry walls strengthened by different intervention techniques, University of Padua, Department of Structural and Transportation Engineering, Padua, Italy.

Vintzileou E., Miltiadou-Fezans A. 2007. Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts, *Engineering Structures*.