

PAREDES DE ALVENARIA DE PEDRA DE FOLHA ÚNICA: CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

ONE-LEAF STONE MASONRY WALLS: GEOMETRIC CHARACTERIZATION AND STRUCTURAL BEHAVIOR

C. Almeida¹, J. P. Guedes², A. Arêde³, A. Costa⁴

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

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

³ Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

⁴ Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro



RESUMO

No âmbito de uma tese doutoramento foi estudado o comportamento estrutural de paredes em alvenaria de granito de pano único presentes na maioria dos edifícios antigos do centro histórico da cidade do Porto. A identificação das tipologias mais frequentes foi realizada a partir da observação visual e levantamento geométrico e material de paredes reais aplicando metodologias e indicadores geométricos na quantificação da irregularidade. A caracterização mecânica passou pela realização de um programa de ensaios em paredes construídas em laboratório, tendo como referência os resultados obtidos em ensaios efetuados em paredes reais. Esta análise permitiu quantificar diversos parâmetros mecânicos (resistência, deformabilidade, ductilidade, capacidade de dissipação de energia) e avaliar a influência da geometria na resposta estrutural de paredes pouco abordadas na literatura.

ABSTRACT

In the context of a PhD thesis, the structural behavior of one-leaf granite masonry walls, typical of most of the old buildings in Porto historical center, was studied. The identification of the more frequent typologies of walls was based on geometric and material records of real walls from several case studies by applying methodologies and geometric indicators to quantify the irregularity. The mechanical characterization was made resorting to a large testing program of walls built in laboratory, based on the outcome of a reference study which involved experimental testing of real walls. This analysis allowed quantifying several mechanical parameters (strength, deformability, ductility, energy dissipation capacity) and evaluating the geometry influence on walls structural response, which is scarcely addressed in the literature.

1. INTRODUÇÃO

A reabilitação de edifícios antigos, inicialmente dirigida para construções com particular valor histórico ou patrimonial, abrange hoje em dia edifícios correntes que

constituem maioritariamente os designados centros históricos. A complexidade inerente a este tipo de construções, a par da necessidade de encontrar técnicas de intervenção mais adequadas e sustentáveis,

faz da reabilitação de edifícios antigos um tema que continua a despertar particular interesse no seio da comunidade científica. Neste contexto, com este trabalho pretende-se dar um contributo para uma melhor compreensão do funcionamento estrutural de paredes em alvenaria de granito de pano único, presentes na maioria dos edifícios antigos do centro histórico da cidade do Porto. Sendo as paredes em alvenaria um dos principais elementos de suporte destas construções, a caracterização geométrica, material e mecânica destas estruturas consiste numa etapa essencial de investigação nesta área.

Tendo como referência procedimentos de análise desenvolvidos em Itália, é proposta uma metodologia de classificação de alvenarias baseada na observação visual de paredes reais, procurando também relacionar a geometria em alçado com as propriedades mecânicas sob ações verticais e ações horizontais no seu plano. Para tal, foram realizados ensaios de compressão uniaxial e ensaios de corte cíclicos no plano com compressão em modelos de paredes construídos em laboratório, tendo por base as características materiais e geométricas observadas em paredes reais. Esta análise permitiu estimar diferentes parâmetros mecânicos e avaliar a influência da estereotomia do aparelho murário no correspondente comportamento mecânico.

2. ALVENARIAS DO PORTO

De acordo com as características arquitetónicas e funcionais nos núcleos urbanos, e em particular na cidade do Porto, conseguem-se distinguir dois tipos de construções, nomeadamente a casa popular burguesa e a casa nobre, com predomínio da primeira sobre a segunda.

A casa popular burguesa caracteriza-se pela sua forma estreita e grande desenvolvimento em profundidade, com um número de pisos acima da cota da via principal que varia, usualmente, entre os dois a quatro, incluindo um piso recuado no topo do edifício. Apresenta vulgarmente duas ou três aberturas (portas e/ou janelas)

por fachada (principal e tardo) e por piso, eventualmente com varandas individuais ou corridas em toda a largura do edifício com guardas em ferro (Fig. 1).



Fig. 1 – Casas tipo popular burguesa da cidade do Porto.

O sistema construtivo mais comum consiste em pavimentos, cobertura e escadas em estrutura de madeira apoiados em paredes, usualmente de empena, meeiras (comuns a edifícios adjacentes) e sem aberturas, em alvenaria de granito de espessura variável em altura (entre cerca de 25 a 50cm no caso de pano simples e superior a 50cm no caso de plano duplo). As paredes da fachada e tardo são geralmente de pano duplo devido ao número significativo de aberturas; não servem de suporte ao vigamento dos pisos, mas asseguram o apoio às asnas de cobertura e garantem o funcionamento em conjunto com as paredes de empena. Exteriormente, as paredes de pedra são rebocadas e pintadas ficando com a moldura dos vãos à vista, surgindo a partir do século XIX os azulejos como forma de revestimento. Pelo interior são habitualmente rebocadas e pintadas, surgindo também casos de paredes com pedra à vista, principalmente em zonas enterradas, ou semienterradas.

Da observação e levantamento de paredes de pedra à vista foi possível verificar que predominam as alvenarias de granito de junta argamassada, com pedras por vezes de grande dimensão (medida na diagonal entre cerca de 0,30 a 1,2m). O aparelho das pedras pode variar desde um alinhamento próximo do regular, até uma

disposição completamente aleatória, e na maioria dos casos foram visíveis calços no assentamento das pedras (Fig. 2).

A pedra, vulgarmente granito de cor amarelada, apresenta uma forma próxima do retangular e encontra-se frequentemente em razoável estado de conservação. A argamassa das juntas apresenta espessura variável entre 0,5 a 2,0cm e exibe uma coloração creme. Das observações realizadas verificou-se que desempenha funções de assentamento e apresenta-se geralmente bastante friável.

Na maioria dos casos as paredes resistentes são as paredes de empena que são meeiras, sendo constituídas por uma folha única de pedra (Fig. 3).



Fig. 2 – Diferentes texturas de paredes de alvenaria de pedra.

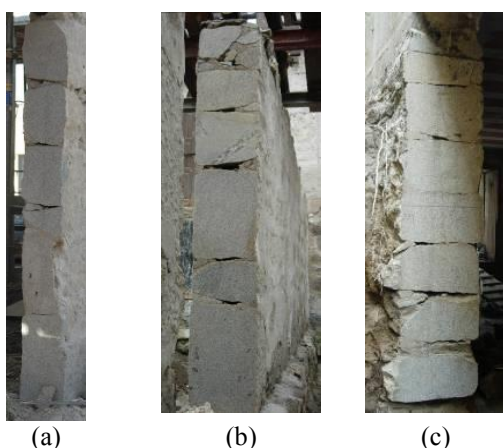


Fig. 3 – Exemplos de tipologias de secção transversal de panos simples: (a) espessura de 30cm; (b) espessura de 40cm e (c) espessura de 50cm.

Nalguns casos de estudo foi possível analisar a constituição da sua secção

transversal, verificando-se a existência de vazios de considerável dimensão no interior das paredes (tanto maiores quanto maior a espessura do pano de parede), impercetíveis pela análise do alçado. De facto, dada a sua dimensão e forma, as pedras encontram-se apoiadas nos bordos exteriores em calços e argamassa, sendo o preenchimento interior menos cuidado, denotando-se a ausência de argamassa nestas zonas.

3. MODELOS DE PAREDES E PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental estabelecido teve como objetivo avaliar o comportamento estrutural de paredes de granito de folha única, um elemento estrutural que está presente em muitos dos edifícios antigos da zona norte de Portugal, facultando também informações preciosas sobre as propriedades mecânicas dessas paredes, tipologia pouco abordada na literatura. Por outro lado, também pretendeu avaliar a influencia da geometria no desempenho estrutural destas paredes, fazendo variar a forma, a dimensão e a disposição das pedras no paramento exterior.

Tendo em vista a pesquisa das tipologias mais frequentes, procedeu-se ao levantamento geométrico e material de vinte e quatro paredes de alvenaria de pedra pertencentes a edifícios antigos submetidos a obras de reabilitação. Recorrendo a técnicas de processamento digital de imagens bidimensionais e seguindo procedimentos desenvolvidos em Itália (Borri 2006, Binda et al. 2009) e novos contributos definidos neste estudo Almeida et al. (2004), foi proposta uma classificação das alvenarias quanto à sua irregularidade por observação direta da geometria do alçado. De acordo com a análise de parâmetros e índices geométricos que têm em consideração a aplicação das boas práticas de construção, as paredes estudadas foram enquadradas em três classes pré-definidas, nomeadamente classe regular (**c.R**), classe parcialmente regular (**c.PR**) e classe irregular (**c.IR**). A classe **c.R** corresponde a paredes de alvenaria de pedra que, em geral, cumprem integralmente as

boas práticas de construção, a classe **c.PR** para aquelas que respeitam parcialmente as boas práticas e a classe **c.IR** para as paredes que não estão em conformidade com a maioria das boas práticas de construção.

Num dos edifícios estudado, para além da caracterização geométrica e material, também foi possível extrair e transportar para o laboratório painéis de parede para serem submetidos a um programa de ensaios (compressão uniaxial, corte no plano com compressão e compressão diagonal) (Almeida et al. 2011, Almeida et al. 2012). Tais ensaios permitiram estimar as propriedades mecânicas de paredes reais e serviram como referência aos trabalhos agora apresentados, que envolveram a construção em laboratório de modelos de paredes definidos de acordo com as tipologias identificadas na cidade do Porto.

Deste modo, foram construídos quatro modelos de paredes com 7,20m de largura, 1,80m de altura e 0,28m de espessura, que correspondem a diferentes texturas de aparelho e que se pretendiam enquadrar nas classes de irregularidade pré-definidas, sendo este modelos designados por Regular (R), Parcialmente Regular (PR), IRregular (IR) e muito IRegular (IR++). A sequência de montagem procurou seguir a prática construtiva aplicada neste tipo de paredes e os trabalhos foram realizados por pedreiros experientes em construção tradicional em alvenaria de pedra, recorrendo a materiais que procuraram ser próximos dos utilizados em casos reais. Cada um dos modelos foi posteriormente dividido em seis painéis com aproximadamente 1,20m de largura. Na Fig. 4 esquematiza-se o alçado de cada modelo de parede, realçando-se o aparelho de pedras segundo cada classe de irregularidade e a zona de corte a vermelho para a individualização dos painéis.

O processo construtivo adotado no modelo regular diferenciou-se do utilizado nas restantes paredes. Na tipologia R, as pedras muito regulares foram assentes sobre uma camada de argamassa com cerca de 1,5cm de espessura, com total preenchimento das juntas horizontais e verticais. Nas restantes tipologias, as pedras com for-

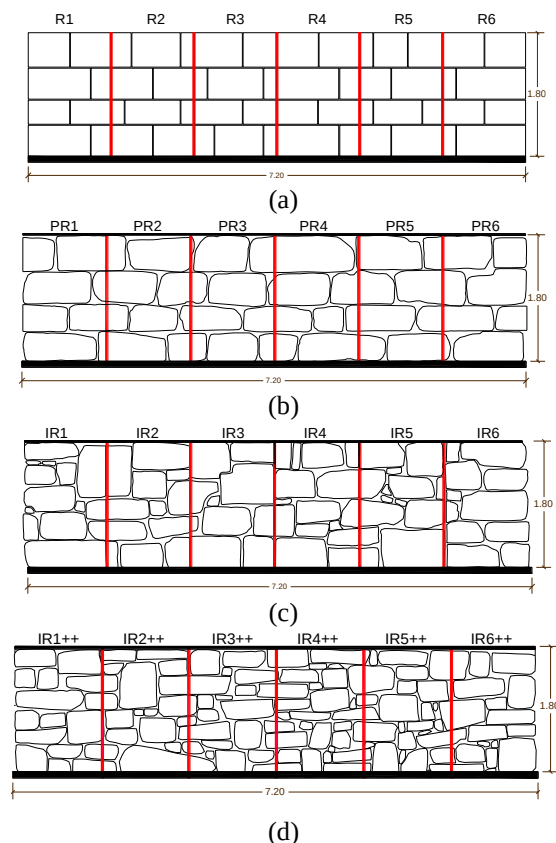


Fig. 4 – Esquema representativo da disposição das pedras nos modelos concebidos em laboratório: (a) parede regular (R); (b) parede parcialmente regular (PR); (c) parede irregular (IR); (d) parede muito irregular (IR++).

ma mais irregular foram assentes por camadas recorrendo a calços de pedra para garantir a estabilidade do conjunto e a argamassa foi colocada posteriormente no refechamento das juntas.

Na construção dos modelos aplicou-se granito amarelo originário da região norte de Portugal, que exibiu uma resistência média à compressão de cerca de 55N/mm². A argamassa aplicada consistiu numa mistura de cal aérea hidratada (hidróxido de cálcio) e saibro com o traço 1:3. Previamente, foi efetuada a análise granulométrica do saibro a aplicar, comparando a curva obtida com a análise realizada em amostras reais. A resistência à compressão foi estimada em prismas com 40x40x160mm³ a várias idades de cura, sendo de cerca de 1,58N/mm² aos 28 dias de idade. Constatou-se uma boa proximidade entre as propriedades mecânicas dos materiais extraídos de paredes reais e os aplicados nos modelos experimentais (Almeida C., 2013).

O programa experimental consistiu na realização de ensaios de compressão uniaxial e ensaios cíclicos de corte no plano com compressão em painéis com 1,20m de largura. Para cada tipologia foram ensaiados seis painéis, num total de vinte e quatro paredes estudadas. Três paredes por tipologia foram submetidas a ensaio de compressão (identificados de 1 a 3) e as restantes três a ensaios cíclicos de corte para diferentes níveis de tensão vertical (identificados de 4 a 6).

4. ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

4.1. Aspetos gerais do programa experimental

Os ensaios de compressão uniaxial foram, na sua maioria, realizados no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE), sendo a carga vertical aplicada por dois atuadores com capacidade máxima total de 3,0MN a funcionar em conjunto (Fig. 5a). Paralelamente, foi necessário recorrer a uma prensa com maior capacidade (10MN) disponível no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMC) da FEUP, para ensaiar à rotura os painéis regulares (Fig. 5b).

No pórtico do LESE, o ensaio decorreu sob controlo de deslocamentos (velocidade de ensaio de 0,05mm/s), enquanto na prensa do LEMC o controlo foi efetuado em força por imposição do próprio equipamento (velocidade de ensaio de 5kN/s).

De modo a garantir uniformidade na distribuição das cargas verticais, foi colocada na face superior das paredes uma viga metálica constituída por perfis HEB soldados e rigidificados com nervuras transversais. A medição dos deslocamentos foi realizada mediante a colocação de LVDTs em ambas as faces das paredes, devidamente fixados às pedras e com diferentes cursos (Fig. 6).

Numa primeira fase, realizaram-se ensaios monotónicos em quatro painéis (um por tipologia), de modo a estimar a resistência à compressão por tipologia. Numa segunda fase, os restantes painéis (dois

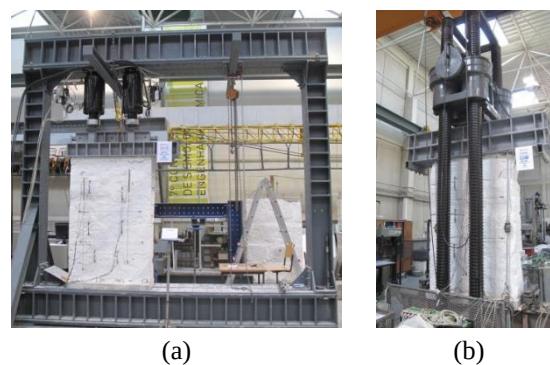


Fig. 5 – (a) Pórtico de ensaio do LESE e (b) prensa de 10MN do LEMC.

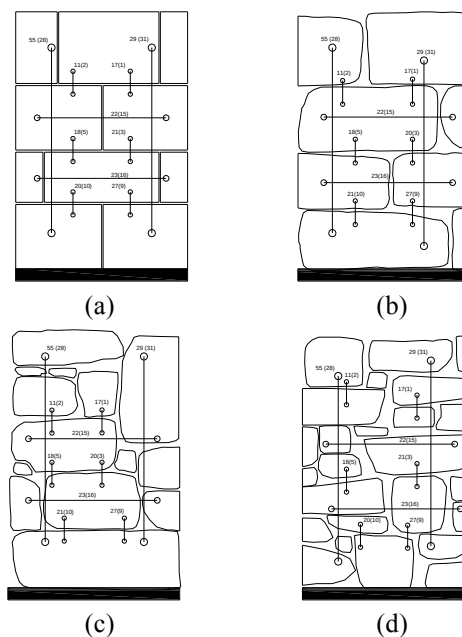


Fig. 6 – (a) parede regular (R); (b) parede parcialmente regular (PR); (c) parede irregular (IR) e (d) parede muito irregular (IR++).

por tipologia, num total de oito) foram submetidos a ensaios cíclicos no LESE de modo a avaliar o módulo de elasticidade. Após a conclusão da fase cíclica, os painéis foram ensaiados até à rotura.

4.2. Análise de resultados

Mecanismos de rotura

Nestes ensaios verificou-se claramente que o modo de rotura das paredes de alvenaria de pedra está fortemente relacionado com a geometria dos blocos e o modo como contactam entre si. O padrão de fissuras registado nos painéis regulares (R) foi significativamente diferente do padrão observado nas restantes tipologias; as juntas perfeitamente horizontais completamente

preenchidas com argamassa, ou seja sem praticamente qualquer vazio, permitiram uma distribuição de tensões mais uniforme entre as pedras (ver Fig. 7a). Isto é igualmente realçado pelo estado de compactação da argamassa no final do teste, verificado após o desmonte da parede; as camadas de argamassa foram fortemente confinadas entre as pedras, destacando-se facilmente em grandes placas (Fig. 7b), apesar do cuidado que houve em garantir que as faces de assentamento apresentassem alguma rugosidade e que antes da colocação da argamassa a superfície das pedras estivesse humedecida para melhorar a aderência pedra/argamassa.

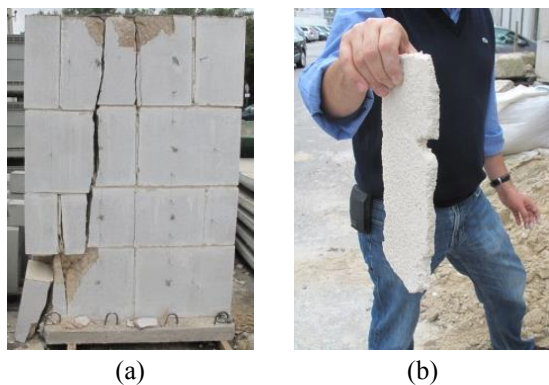


Fig. 7 – (a) Modo de rotura das paredes da tipologia Re (b) Aparência da argamassa no final do ensaio dos painéis regulares.

Nas tipologias PR, IR e IR++ o padrão de fissuração observado foi semelhante, apesar das primeiras fissuras surgirem para diferentes níveis de tensão. De referir que nestas tipologias existem espaços vazios no interior das paredes e o contacto entre as pedra não é uniforme, mas localizado em pequenas áreas, sendo na maioria dos casos materializado por cunhas de pedra. Por este motivo, a deformação vertical inicia principalmente com o esmagamento das cunhas e o "preenchimento" das cavidades. Além disso, o desvio das tensões de compressão para estes pontos de contacto preferenciais induz tensões de tracção na parte inferior das pedras que origina fissuras verticais. Apesar das linhas de rotura, na maioria dos casos os painéis foram capazes de recuperar a rigidez e resistência após o rearranjo dos elementos.

Na Fig. 8 apresenta-se um exemplo do padrão de fissuração registado nas tipologias PR, IR e IR++, onde as linhas de rotura estão marcadas a vermelho e as zonas preenchidas a vermelho correspondem à delaminação das pedras.

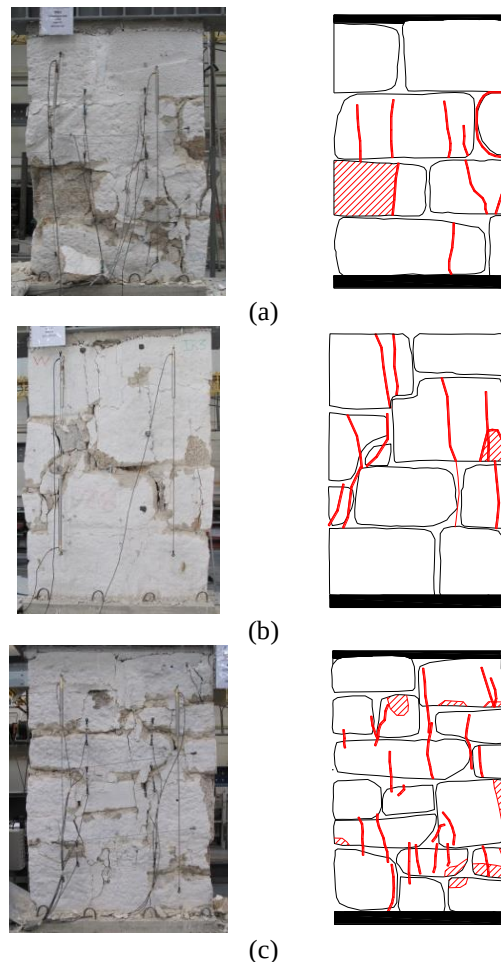


Fig. 8 – Exemplo de padrão de fissuração de paredes por tipologia: (a) PR1; (b) IR3 e (c) IR1++.

Quantificação de parâmetros mecânicos

Baseado nos resultados obtidos, foi possível quantificar parâmetros de resistência e de deformabilidade dos diversos painéis. A partir dos níveis de força registados, e tendo em conta a dimensão da secção transversal, foi avaliada a tensão instalada (σ_c), cujo valor máximo corresponde à resistência à compressão do painel (f_{cp}). O módulo de elasticidade (E_{cp}) foi quantificado a partir da análise dos diagramas (σ - ϵ) para valores entre 10 e 40% da tensão máxima. A relação entre a deformabilidade e a resistência à compressão obtida

nestes ensaios foi comparada com propostas referidas na literatura.

A Fig. 9 apresenta as curvas tensão-deformação dos ensaios monotônicos realizados em quatro painéis, tomando o valor médio dos deslocamentos verticais e horizontais registados pelos LVDTs. posicionados nas duas faces das paredes.

Os resultados experimentais evidenciam claramente as diferenças no comportamento global das paredes regulares quando comparado com os outros painéis. Na verdade, a forma regular da superfície de pedra produz um contacto regular, fazendo com que o painel R apresente uma muito maior resistência e rigidez (aproximadamente sete vezes maior do que a das outras tipologias). Note-se que mesmo recorrendo ao actuador de maior capacidade do LEMC, não foi possível garantir que a força máxima resistente tivesse sido alcançada. Os valores de tensão máximos definidos nos painéis R correspondem, por isso, a um limite inferior da sua capacidade resistente.

Por outro lado, as paredes PR1, IR1 e IR1++ tiveram um comportamento quase linear até próximo de atingir a tensão máxima. As pequenas discontinuidades observadas correspondem a fissuras em pedras e rearranjos dos elementos. Em termos de resistência e de deformação, as diferenças são pequenas, embora se tenha detectado uma redução da resistência e da rigidez com o aumento da irregularidade painéis.

Os restantes oito painéis (dois para cada tipologia) foram sujeitos a ensaios cíclicos

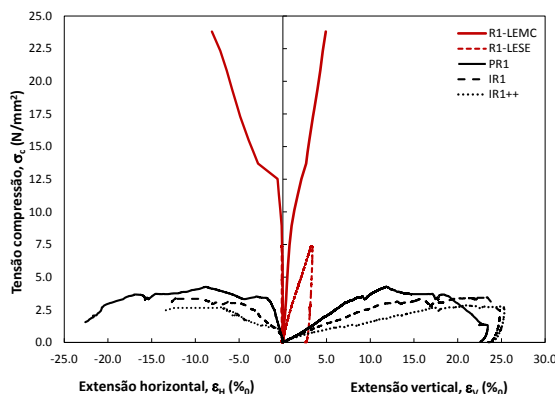


Fig. 9 – Diagrama (σ - ϵ) no ensaio monotônico dos painéis R1, PR1, IR1 e IR1++.

de compressão (carga-descarga) para avaliar o módulo de elasticidade. Depois disso, os painéis foram levados à rotura. Para todas as tipologias observou-se que a rigidez avaliada na fase de recarga é de cerca de quatro a cinco vezes superior à rigidez da fase de carga. Este fenómeno já foi observado por vários autores em ensaios deste tipo em paredes de alvenaria de pedra, e está relacionado com a elevada deformabilidade e comportamento plástico das juntas (Vasconcelos e Lourenço, 2009), entendidas no contexto destas paredes como sendo o conjunto formado pelas cunhas, argamassa e vazios.

A Tabela 1 apresenta os valores médios da resistência à compressão e os módulos de elasticidade obtidos a partir das curvas de tensão-deformação. Os valores obtidos nos painéis PR, IR e IR++ são semelhantes aos resultados estimados em paredes reais com idêntica textura, ensaiados no LESE em condições semelhantes (Almeida et al., 2011).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas obtidas dos ensaios de compressão por tipologia de parede.

Tipologia	f_{cp} (N/mm ²)	E_{cp} (kN/mm ²)	
		carga	recarga
R	27,26	2,10	8,60
PR	4,14	0,34	1,16
IR	3,93	0,29	1,26
IR++	3,16	0,22	1,19

Admitindo uma relação linear entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão ($E_{cp} = k \times f_{cp}$), o parâmetro de proporcionalidade k encontrado foi idêntico em todas as tipologias. Verificou-se que o acréscimo de k entre a fase de primeira carga e de recarga é de cerca de quatro vezes, sendo de cerca de 76 em fase de carga e de 325 em fase de recarga. Nos ensaios de paredes reais descritos em (Almeida et al., 2011), este parâmetro foi na ordem dos 95 em fase de carga e de 430 em fase de recarga, logo um pouco superior aos valores aqui obtidos. Comparativamente com as relações definidas na bibliografia e códigos (entre 700 e 1000), os valores encontrados são bastante inferiores (Valluzzi et al. 2001; Corradi et al. 2002; CEN 2005; Vintzileou e Miltiadou-Fezans 2007).

5. ENSAIOS CÍCLICOS DE CORTE COM COMPRESSÃO

5.1. Aspetos gerais do programa experimental

Os ensaios de corte com compressão foram realizados no mesmo pórtico de reação do LESE, agora nos painéis de parede identificados de 4 a 6. Consistiram na imposição de deslocamentos cíclicos no plano e no topo da parede após a aplicação de uma carga vertical que se manteve constante ao longo do ensaio. Foram ensaiados três painéis por tipologia (R, PR, IR e IR++), num total de doze paredes analisadas.

A carga horizontal foi imposta por um atuador hidráulico com 200kN de capacidade. O sistema de pré-compressão consistiu em adotar um atuador hidráulico de 500kN que faz reação num perfil metálico transversal fixo na parte posterior do atuador e amarrado por dois varões Dywidag (um em cada lado da parede) à base do pórtico através de rótulas e de chapas soldadas, criando um sistema auto-equilibrado (ver Fig. 10).

Foram considerados três níveis de pré-compressão: 0,4; 0,8 e 1,2N/mm². O primeiro nível pretende simular o estado de tensão presente em casos reais (edifícios com cerca de cinco pisos, tipologia frequente na cidade do Porto) e os restantes o comportamento destas alvenarias em situação de maior carga de forma a conduzirem a modos de rotura distintos.

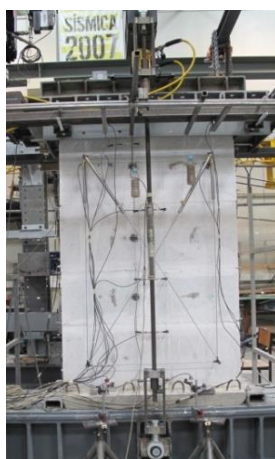


Fig. 10 – Setup do ensaio de corte-compressão.

No registo dos deslocamentos verticais, horizontais e fora do plano, os painéis foram monitorizados com um denso sistema de instrumentação que incluiu cerca de 30 LVDTs, como ilustrado na Fig. 11. De uma parede para a outra a instrumentação sofreu alterações na localização e número de sensores devido às variações da dimensão e arranjo das pedras.

5.2. Análise de resultados

Os painéis foram submetidos a deslocamentos horizontais cíclicos de amplitude crescente até ao colapso, sendo cada ciclo repetido três vezes, de modo a avaliar os efeitos de degradação da resistência e da possível acumulação do dano, Tabela 2. Este procedimento permitiu estimar a resistência lateral e a capacidade de dissipação de energia histerética destas alvenarias. Na generalidade dos casos, o ensaio terminou quando foi registado um dano considerável na estrutura, verificado por observação visual e tendo em consideração a potencial instabilidade dos blocos de granito, facto que em muitos dos ensaios não esteve associado a qualquer decréscimo de resistência.

Mecanismos de rotura

As paredes de alvenaria solicitadas por ações horizontais no seu plano podem apresentar diferentes modos de rotura, nomeadamente: flexão, deslizamento horizontal e corte diagonal. A ocorrência de um modo em detrimento dos restantes depende de vários parâmetros.

Nos ensaios efetuados verificou-se que o comportamento destas paredes é claramente

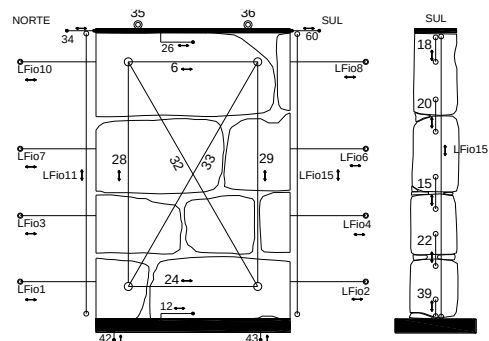


Fig. 11 – Exemplo da instrumentação aplicada no ensaio de corte-compressão.

Tabela 2 – Lei de deslocamentos imposta no ensaio de corte com compressão.

Ciclo	Deslocamento (mm)	Drift (%)
1A	0,9	0,05
2A	1,8	0,10
3A	2,7	0,15
4A	3,6	0,20
5A	4,5	0,25
6A	5,4	0,30
7A	6,3	0,35
8A	7,2	0,40
9A	9,0	0,50
10A	10,8	0,60
11A	12,6	0,70
12A	14,4	0,80
13A	16,2	0,90
14A	18,0	1,0
15A	22,5	1,25
16A	27,0	1,50
17A	36,0	2,0
18A	45,0	2,50

influenciado pela textura e nível de tensão vertical. Na Fig. 12 observa-se a aparência final de quatro painéis de parede (um por cada tipologia) sob tensão de compressão de $0,4\text{N/mm}^2$.

Numa fase inicial todas as tipologias exibiram abertura de fendas na junta da base. Nas fases seguintes, nas paredes regulares (R) predominou o mecanismo de flexão (*rocking*), acompanhado pelo deslizamento das pedras; quanto maior o nível de compressão menor o dano observado. Nas paredes PR e IR o mecanismo de dano passou pela formação de linhas de rotura aproximadamente diagonais que conduziram a *rocking* no final do ensaio, registrando-se também danos ao nível das pedras de canto. Na tipologia IR++ verificou-se a formação de linhas de rotura diagonais e o esmagamento de pedras localizadas nos cantos inferiores das paredes, principalmente para os níveis de tensão vertical mais elevados.

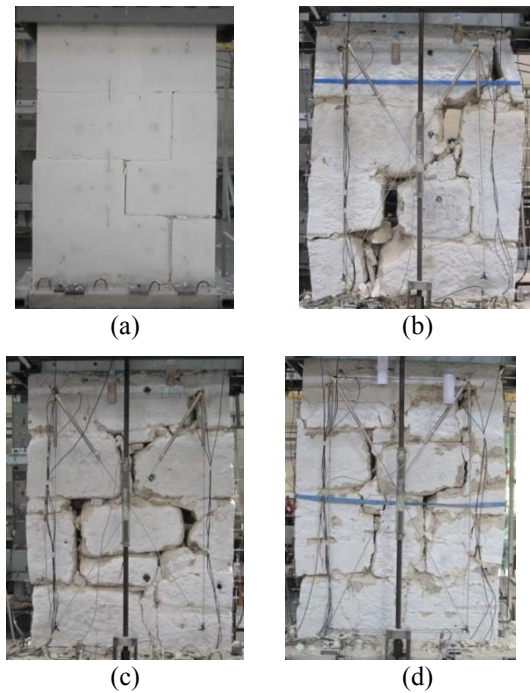


Fig. 12 – Aparência final dos painéis após ensaio de corte-compressão para $\sigma_0 = 0,4\text{N/mm}^2$: (a) R; (b) PR; (c) IR e (d) IR++.

Diagramas força-deslocamento

Os diagramas força-deslocamento para o nível de tensão vertical de $0,4\text{N/mm}^2$ encontram-se representados na Fig. 13. Os restantes diagramas podem ser consultados em Almeida C. (2013).

Genericamente, todas as tipologias e independente do nível de tensão vertical, evidenciaram alguma capacidade de dissipação de energia e a redução de resistência entre ciclos foi muito reduzida, ou mesmo inexistente. Por outro lado, verificou-se o acréscimo de resistência lateral e do deslocamento máximo com o aumento do nível de pré-compressão. Na tipologia R, o fenómeno de flexão associado a movimentos de corpo rígido (*rocking*), acompanhado pelo deslizamento ao longo das juntas, dominou o comportamento das paredes, traduzindo-se num diagrama que exibe resposta não linear sem perda de resistência. Na tipologia PR verificou-se uma assimetria da resposta (principalmente para a tensão vertical de $0,4\text{N/mm}^2$) devido ao deslizamento de pedras que conduziu a uma significativa dilatação transversal. Apesar do dano registado, a perda de resistência no final do

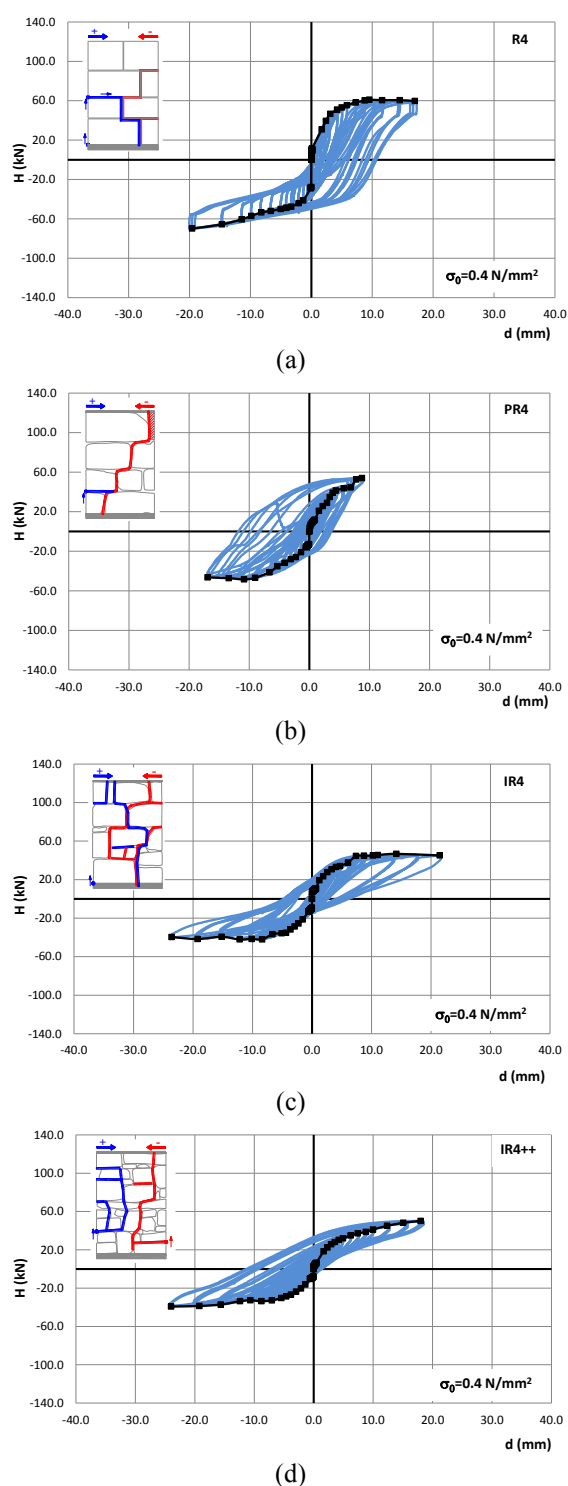


Fig. 13 – Diagramas força-deslocamento $\sigma_0=0,4\text{N/mm}^2$: (a) R4; (b) PR4; (c) IR4 e (d) IR4++.

ensaio apenas foi sentida na parede PR4 e foi de apenas cerca de 5,4%. Na tipologia IR verificou-se um ligeiro ganho de força entre deslocamentos sucessivos, provavelmente associado a novos imbricamentos das pedras, que requerem maior força para atingirem um dado deslocamento previamente alcançado. Foi também registado

algum dano ao nível das pedras (destacamento e fissuração) que ocorreu logo após a aplicação da carga vertical, e que se foi agravando ao longo do ensaio cíclico. Na tipologia IR++ verificaram-se dos diagramas força-deslocamento que estarão, provavelmente, associadas à geometria mais irregular destas paredes. A variação da forma e da dimensão das pedras condiciona o comportamento das paredes; neste tipo de geometria a rotura de pedras de menor dimensão influencia os mecanismos de dano, uma vez que estas podem assumir novas posições e empurrar outras pedras. Realça-se neste contexto que a assimetria em termos de capacidade resistente é mais vincada à medida que a tensão vertical aumenta. Apenas na parede IR5++ foi registada uma redução da capacidade resistente no final do ensaio da ordem dos 14%. Nas restantes paredes o decréscimo, quando ocorreu, foi no máximo de 3%.

A partir do traçado das curvas envolventes médias, e aplicando os procedimentos de análise habituais em estudos deste tipo e presente em ensaios similares de outros autores (Vintzileou e Miltiadou-Fezans 2007; Vasconcelos e Lourenço 2009; Pinho 2011; Silva et al. 2013) foram quantificados diferentes parâmetros mecânicos, como a capacidade resistente lateral máxima ($H_{\max}$), a ductilidade (μ) e o coeficiente de amortecimento (ξ). Os resultados obtidos encontram-se sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas obtidas dos ensaios de corte-compressão por tipologia e nível de tensão vertical.

Tipologia	σ_0/f_{cp} (%)	σ_0 (N/mm ²)	$H_{\max}$ (kN)	μ	ξ (%)
R	1,5	0,4	64,8	5,7	14,1
	2,9	0,8	87,1	3,0	10,1
	4,4	1,2	125,4	3,5	8,0
PR	9,7	0,4	50,3	2,8	15,6
	19,3	0,8	87,9	3,1	12,0
	29,0	1,2	119,7	2,7	10,9
IR	10,2	0,4	44,2	4,0	14,8
	20,4	0,8	73,0	3,2	10,5
	30,5	1,2	113,0	3,6	19,5
IR++	12,6	0,4	44,7	4,8	15,4
	25,3	0,8	57,6	3,2	13,8
	38,0	1,2	92,8	3,1	13,6

Da análise dos resultados pode concluir-se que:

- Genericamente, e independentemente do nível de tensão vertical, a tipologia R exibiu a maior capacidade resistente, enquanto a tipologia IR++ apresentou a menor capacidade resistente. Assim, a capacidade resistente diminui com o aumento da irregularidade.
- Genericamente, e por tipologia, a ductilidade diminuiu com o aumento da tensão vertical. Entre tipologias, e para o mesmo nível de carga axial, a variabilidade dos resultados encontrados dificulta conclusões sistemáticas, realçando-se, no entanto, a maior ductilidade das paredes IR e IR++ relativamente à tipologia PR.
- As paredes mais irregulares (IR e IR++) apresentaram maior capacidade de dissipação de energia e amortecimento, nomeadamente para os níveis de tensão vertical mais elevados. Efeito contrário observou-se na tipologia R, uma vez que a aplicação de uma maior tensão vertical mobilizou um menor número de juntas, predominando os mecanismo de flexão.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

O presente trabalho de investigação centrou-se no estudo de alvenarias de granito de folha única típicas de paredes de edifícios antigos da cidade do Porto.

Tendo como referência procedimentos desenvolvidos em Itália, o estudo iniciou pela aplicação de uma metodologia na caracterização geométrica de paredes mediante a quantificação de índices de irregularidade. A partir da análise de parâmetros métricos foram propostas três classes de irregularidade, definidas após a aplicação da metodologia aos levantamentos geométricos de paredes pertencentes a casos de estudo.

A realização de um programa experimental em painéis de parede reais serviu de referência à construção em laboratório de quatro modelos de paredes à escala real para serem submetidos a ensaios

de compressão uniaxial e ensaios cíclicos de corte sob esforço axial constante. As tipologias foram definidas de modo a enquadrar-se nas três classes de irregularidade referidas anteriormente.

As principais conclusões extraídas dos ensaios de compressão são que a tipologia regular apresenta uma capacidade resistente e uma rigidez muito superior à das restantes paredes, mas em todas as tipologias obtiveram-se rácios entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão muito inferiores aos propostos na literatura. Relativamente aos ensaios de corte-compressão as principais conclusões são que as paredes regulares exibem uma maior capacidade resistente devido à maior regularidade das superfícies de contato entre pedras, e as paredes mais irregulares evidenciam maior capacidade de dissipação de energia e amortecimento, nomeadamente para os níveis de tensão vertical mais elevados, associados a um maior imbricamento das pedras no plano da parede; genericamente e por tipologia, a ductilidade diminui com o aumento da tensão vertical e verifica-se uma tendência de aumento deste parâmetro com o aumento da irregularidade nas paredes com calços

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração prestada pela “SRU Porto Vivo” (Sociedade de Reabilitação Urbana do Porto), Arq. Adriana Florêt, as empresas 3M3P, Lucios e ERI, 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

- Almeida C., Guedes J.P., Arêde A., Costa C.Q., Costa A. 2011. *Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls*, Construction and Building Materials, 30, 188-197.

- Almeida, C., Guedes, J., Arêde, A. e Costa, A. 2012. *Shear and Compression Experimental Behaviour of One Leaf Stone Masonry Walls*, 15th World Conference Earthquake Engineering, Lisbon.
- Almeida, C., Guedes, J., Arêde, A., Costa, A. 2014. *Quantification of parameters for the evaluation of the geometric irregularity of stone masonry walls*, 9th International Masonry Conference, Guimarães, Portugal, 2014.
- Almeida, C. 2013. *Paredes de alvenaria do Porto. Tipificação e caracterização experimental*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Binda L., Borri A., Cardani G., Doglioni F. 2009. Scheda qualità murario: relazione finale e linee guida per la compilazione della scheda di valutazione della qualità muraria. Progetto esecutivo 2005 – 2008, Progetto di ricerca N.1, Valutazione e Riduzione della Vulnerabilità di Edifici in Muratura, Rendicontazione Scientifica 3° anno, RELUIS: Italy.
- Borri A. 2006. Valutazione e Riduzione della Vulnerabilità di Edifici in Muratura. Progetto di ricerca N.1, Rendicontazione Scientifica 1° anno, Allegato 3b.1_UR06_1, Progetto esecutivo 2005 – 2008, RELUIS: Italy.
- CEN (2005) EN 1996-1-1. Eurocódigo 6: “Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures”. Comité Européen de Normalização, Bruxelas, Bélgica.
- Corradi M., Borri A., Vignoli A. 2002. *Strengthening techniques on masonry structures struck by the Umbria-Marche earthquake of 1997-1998*, Construction and Building Materials, 16: 229-239.
- Pinho F., Lúcio V., Baião M. 2011. *Rubble stone masonry walls in Portugal strengthened with reinforced micro-concrete layer*, Bulletin of Earthquake Engineering 10, 1, 161-180.
- Silva B., Benneta M., da Porto F., Modena C. 2013. *Experimental assessment of in-plane behaviour of three-leaf stone masonry walls*, Construction and Building Materials, 53, 149-161.
- Vasconcelos G., Lourenço P.B. 2009. *Experimental characterization of stone masonry in shear and compression*, Construction and Building Materials 23, 3337-3345.
- Vasconcelos G., Lourenço P.B. 2009. *In plane experimental behavior of stone masonry walls under cyclic loading*, Journal of Structural Engineering.
- Valluzzi M. R., Porto F. and Modena, C. 2001. *Behaviour of multi-leaf stone masonry walls strengthened by different intervention techniques*, Historical Constructions, Guimarães, Portugal, 1023-1032.
- Vintzileou E., Miltiadou-Fezans A. 2007. *Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts*, Engineering Structures 30, 2265-2276.