

## **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA PAREDE DE ALVENARIA DE PEDRA SOB ACÇÃO CICLICA**

**BRUNO SILVA**

Estudante de MSc  
FEUP  
Porto-Portugal

**JOÃO GUEDES**

Prof. Auxiliar  
FEUP  
Porto-Portugal

**ANÍBAL COSTA**

Prof. Catedrático  
UA  
Aveiro-Portugal

**ANTÓNIO ARÊDE**

Prof. Auxiliar  
FEUP  
Porto-Portugal

### **SUMÁRIO**

Apresenta-se neste trabalho o resultado de um ensaio experimental realizado numa parede de alvenaria irregular de pedra, de duas folhas, executada no laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A parede foi ensaiada com um sistema de ensaio semelhante ao apresentado na referência [1] sob carga axial constante e impondo um deslocamento horizontal cíclico no plano da parede.

Este ensaio permitiu avaliar experimentalmente o comportamento da parede sob acções cíclicas e estimar a energia dissipada, a capacidade de deformação e ainda a resistência e rigidez nas condições do teste. Trata-se de o primeiro de um conjunto de testes a realizar em condições idênticas, com e sem sistemas de reforço estrutural, e cujos resultados permitirão, para além de compreender o comportamento global e local de paredes de alvenaria deste tipo, calibrar e verificar a eficácia de modelos de simulação numérica do comportamento destas estruturas, com o objectivo mais vasto de simular construções de geometria mais complexa (ex. edifícios e pontes). Outros trabalhos experimentais tais como este relativos a estruturas de alvenaria para estudo de reforços e calibração de modelos numéricos têm sido realizados encontrando-se alguns exemplos na bibliografia.

### **1. INTRODUÇÃO**

Compreender como se comportam as estruturas de alvenaria de pedra sob acções cíclicas horizontais é fundamental para melhor perceber os mecanismos de colapso e da progressão de dano resultante da actuação de acções sísmicas neste tipo de estrutura. Este trabalho apresenta os resultados de um teste efectuado a uma parede de alvenaria irregular de pedra de granito, de duas folhas, construída e ensaiada ao corte com compressão (sob acção horizontal com carga vertical) no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). A parede foi solicitada por uma acção vertical constante e uma história de deslocamentos cíclicos de amplitude crescente aplicada no plano da parede. É objectivo deste trabalho analisar o comportamento desta parede de alvenaria de pedra através da avaliação experimental da capacidade de dissipação de energia, da ductilidade e ainda da resistência e rigidez. Estes resultados permitirão compreender melhor o comportamento deste tipo de paredes e no futuro servir de referência para a calibração e verificação de modelos de simulação numérica do comportamento de estruturas de alvenaria de pedra deste tipo, representativas de uma tipologia construtiva largamente difundida no País, com forte incidência na região Norte.

### **2. DESCRIÇÃO DA PAREDE**

A parede que serviu como modelo físico para este ensaio experimental faz parte de um conjunto de modelos construídos no laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da

Universidade do Porto. Trata-se de paredes de alvenaria irregular com 1,6m de comprimento, 1,6m de largura e 0,6m de espessura, de granito de boa qualidade, de paramento duplo, com travadores e juntas seladas com uma argamassa de saibro e cal (Figura 1). As paredes de alvenaria foram construídas sobre blocos de fundação realizados em betão armado com 2,6m de comprimento, 1,6m largura e 0,6m de altura. A parede encontra-se encastrada dentro deste bloco numa profundidade de cerca de 0,35m. Para o ensaio descrito no presente artigo, foi usada a parede designada por PA1 e ilustrada na Figura 1.



Figura 1: Modelo físico da parede de alvenaria (PA1) antes do ensaio.

### 3. SETUP DO ENSAIO EXPERIMENTAL

A parede foi submetida a uma carga vertical constante de 50kN correspondente a uma tensão de compressão de 52,08KPa e a um deslocamento horizontal cíclico crescente, aplicado no plano da parede e na sua face superior. A carga horizontal foi aplicada através de um actuador hidráulico com capacidade máxima de carga de 10ton, rotulado nas extremidades e usando uma parede de reacção metálica. Junto ao topo superior da parede, duas placas metálicas rígidas encontravam-se ligadas entre si através de varões de aço e comprimindo as duas faces laterais opostas da parede como se ilustra na Figura 2, por forma a aplicar forças horizontais nos dois sentidos. A carga vertical foi aplicada através de dois actuadores hidráulicos com uma capacidade de carga máxima individual de 50ton a qual é limitada neste ensaio pela capacidade das células de carga (10ton cada). Cada actuador foi colocado por forma a reagir contra um perfil metálico ligado à base de betão através de varões de aço rotulados nas extremidades (Figura 2), de modo a não restringir o movimento horizontal da parede. O bloco de fundação foi “amarrado” à laje de reacção do laboratório através de seis varões de aço, pré-esforçados, por forma a minimizar os deslocamentos do bloco durante o ensaio.

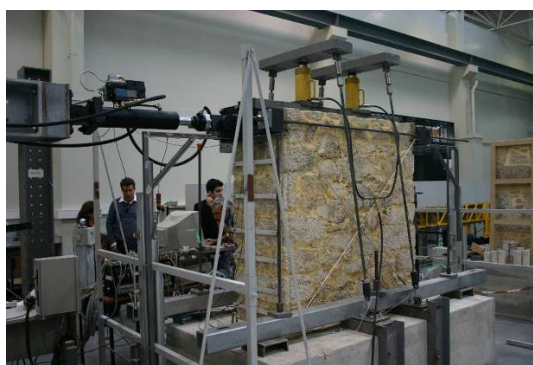


Figura 2: Setup de ensaio da parede PA1.

O ensaio experimental foi efectuado através de um sistema de aquisição e controlo utilizando o software LabView [5]. As acções sobre o conjunto parede mais fundação foram monitorizadas através de onze células de carga: quatro nos varões de aço de externos que fixam a base de betão à laje do laboratório, 4 nos varões de aço que servem de reacção à aplicação da carga vertical e uma célula de carga acoplada ao actuador horizontal.

Foram utilizados 29 LVDT's para medir os movimentos da parede em pontos estratégicos, tendo sido posicionados conforme se ilustra na Figura 3. Os LVDT's número 01, 02, 03, 09, 10, 11, 18, 17, 19, 21, 25, 26, 27 e 14 encontram-se colocados nas faces laterais da parede entre blocos de pedra contíguos, permitindo medir as deformações verticais ou seja, o fecho e abertura das juntas laterais. Os LVDT's 08, 06, 32, 33, 41, 23, 22, 31, 30 e 40 medem os deslocamentos horizontais da parede através do movimento detectado ao longo das faces laterais; os LVDT's 28 e 29 medem as deformações ao longo de duas diagonais colocadas na fachada frontal; os LVDT's 35 e 36 medem os deslocamentos na direcção transversal da parede e por fim o LVDT 40 mede o deslocamento da zona de ligação do actuador à face superior da parede, sendo utilizado no controlo dos deslocamentos horizontais impostos.

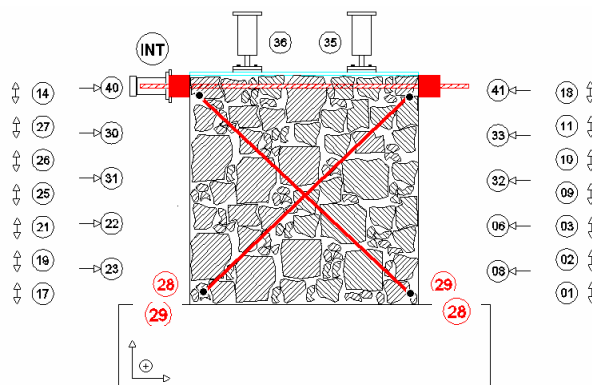


Figura 3: Setup dos LVDT's.

#### 4. CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

Para além do peso próprio, a parede foi submetida a uma carga vertical constante de 50kN e a deslocamentos horizontais cíclicos crescentes impostos no plano da parede e aplicados no topo. A carga vertical pretendeu simular a existência de estruturas/cargas suportadas superiormente pela parede, correspondentes a uma cobertura típica de madeira e à restante parede de alvenaria acima da existente por forma a completar um pé direito de 2,3m. A história de deslocamento horizontal imposta no topo da parede consistiu em ciclos de carga e descarga, com picos alternados positivos e negativos de amplitude crescente até aos 12 mm (Figura 4). Para uma mesma amplitude os ciclos foram repetidos 3 vezes.

Durante o ensaio, e como resultado da deformação da parede, os varões de aço que faziam a ligação entre as duas faces laterais da parede sofreram uma perda de tensão que provocou o escorregamento da estrutura metálica no topo da parede, interferindo com as leituras dos LVDT's 14 e 27 posicionados do lado esquerdo da parede, sendo que no entanto o LVDT 14 já tinha atingido a sua capacidade máxima por deformação excessiva de compressão nessa junta. Detectado o problema, os LVDT's foram reposicionados e prosseguiu-se com o ensaio.

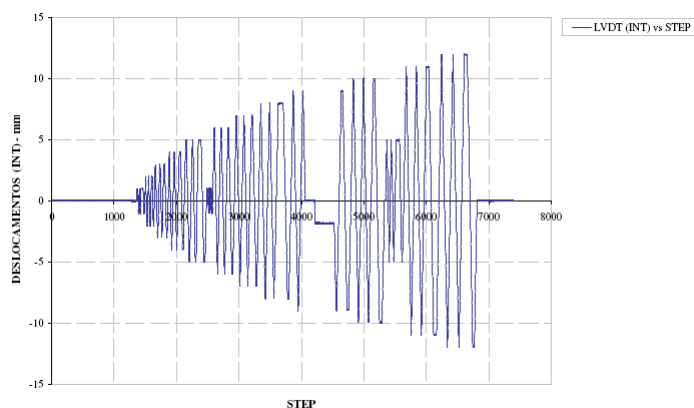


Figura 4: Deslocamento total horizontal no topo da parede ao longo do ensaio.

## 5. RESULTADOS DO ENSAIO EXPERIMENTAL

Em seguida, são apresentados e comentados os resultados registados nas células de carga e nos transdutores de deslocamento relativos à monitorização do ensaio.

### 5.1. Análise da curva de resposta global Força\Deslocamento

O primeiro resultado apresentado corresponde à curva de comportamento global traduzida pela força aplicada no topo da parede versus o deslocamento imposto e medido através do LVDT interno (INT) como se pode observar na Figura 5. Esta curva permite retirar as seguintes conclusões:

- A parede apresenta uma razoável capacidade de dissipação de energia;
- A resposta é semelhante em ambas as direcções de carga, apesar de os ciclos finais, em particular os ciclos dos 10, 11 e 12mm, terem sofrido um “offset” na direcção positiva do deslocamento ou seja, uma tendência para a ocorrência de deformação plástica positiva no final do ensaio;
- A inclinação das trajectórias de carga e descarga são semelhantes;
- A rigidez de carga da estrutura manteve-se quase constante durante todo o ensaio.

Pretende-se que a parede seja posteriormente reabilitada/reforçada e novamente testada após intervenção. Essa condição condicionou o avanço do teste para além da fase inicial de comportamento plástico acentuado da parede o que limitou o deslocamento máximo aos 12mm assinalados na curva de resposta. Note-se que esse deslocamento corresponde a um drift de 0.75% e a um valor de ductilidade máxima imposta em deslocamento no topo da parede de cerca de 2.

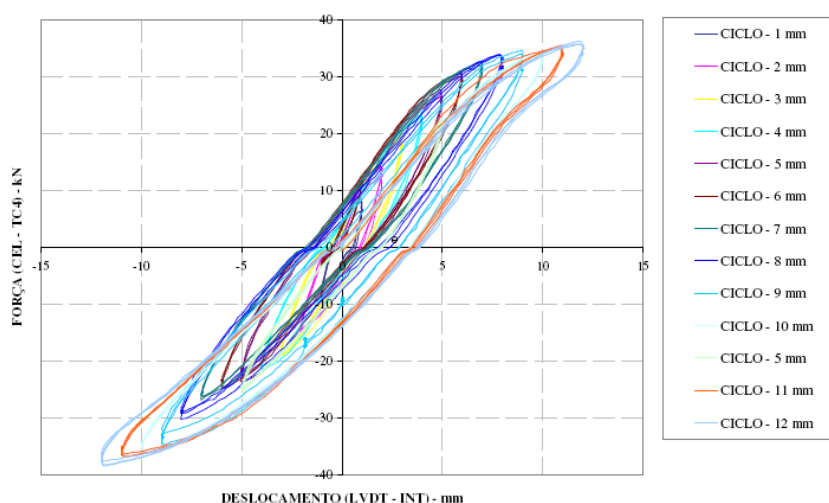


Figura 5: Força horizontal vs Deslocamento horizontal no topo da parede.

### 5.2. Comportamento local das juntas laterais

O comportamento das juntas laterais não pode ser estudado de forma independente, uma vez que o comportamento de uma junta afecta o comportamento das outras. A Figura 6 apresenta a resposta das juntas laterais em termos de deformação vertical (abertura e fecho) durante o ensaio experimental. A deformação positiva corresponde à abertura das juntas, enquanto a deformação negativa corresponde ao fecho/compressão das juntas.

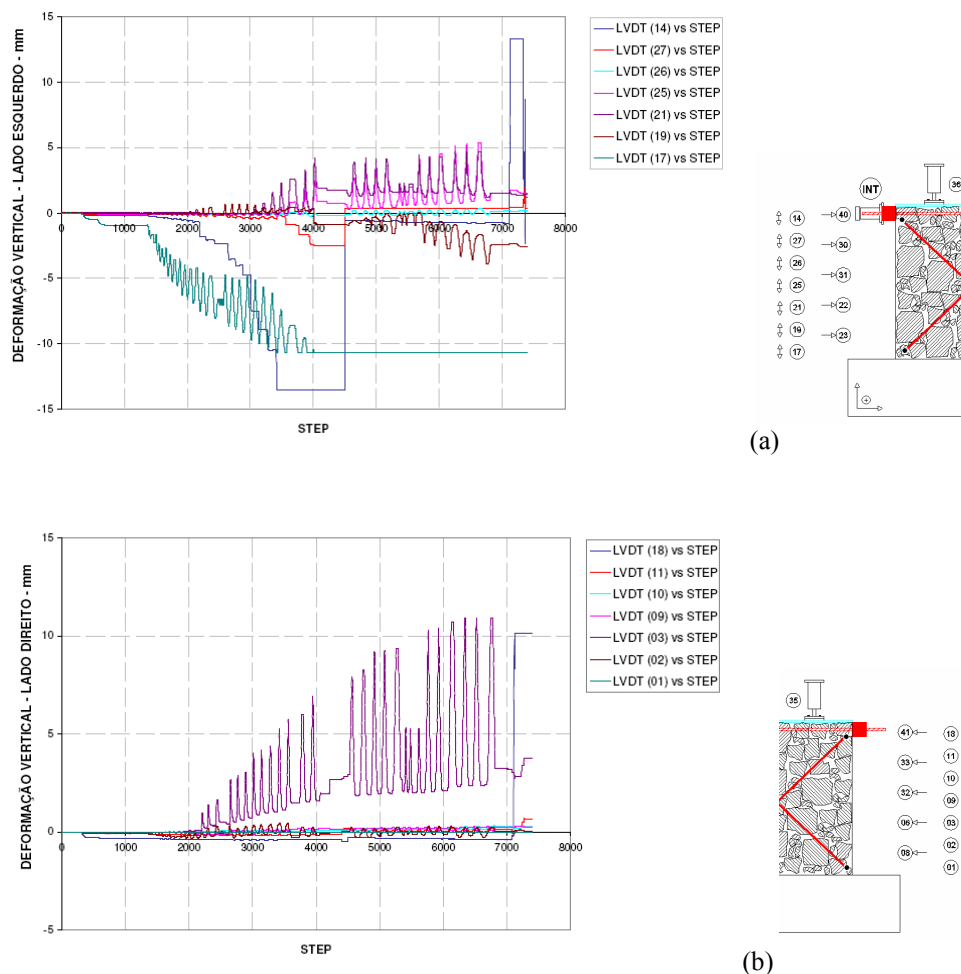


Figura 6: Movimento das juntas (deformação) ao longo do ensaio. (a) Face esquerda. (b) Face direita.

### 5.2.1. Resposta das juntas da face esquerda

As duas juntas monitorizadas junto à base, 17 e 19 (Figura 6 (a)), demonstraram uma tendência geral de fecho, em particular a junta 17 cuja deformação excedeu a capacidade do LVDT usado na sua monitorização. Esta deformação ocorreu principalmente pelo rearranjo das pedras no bloco de fundação por acção das forças de compressão cíclicas e pela dimensão e quantidade dos blocos de granito face à quantidade de argamassa nesta zona (Figura 7), que a tornaram mais vulnerável ao efeito de compressão.



Figura 7: Zona onde foi posicionado o LVDT 17.

Por outro lado, a elevada rigidez da fundação fez com que o dano se concentrasse nas juntas mais frágeis directamente acima (21 e 25), tal como se indica na Figura 8 (a). Estas duas juntas apresentaram uma abertura progressiva durante o ensaio experimental. A junta intermédia 26 apresentou níveis de deformação praticamente imperceptíveis.

As juntas próximas do topo da parede do lado direito (14 e 27), demonstraram uma inesperada progressão durante o ensaio no sentido de fecho que estiveram principalmente relacionadas com a perda de tensão nos varões de aço no topo da parede e que interferiu com as leituras; esta perda de tensão permitiu ao cabeçote metálico deslizar do lado esquerdo da parede afectando o LVDT 14 ao qual se encontrava ligado e o LVDT 27 directamente a baixo.

### 5.2.2. Resposta das juntas da face direita

As juntas monitorizadas perto da base na face direita quase não sofreram deformação importante durante o ensaio. Isto ocorreu principalmente devido à elevada rigidez da fundação, a qual, tal como o que se passou na homóloga do lado esquerdo, forçou o dano a concentrar-se numa junta mais frágil directamente acima das anteriores (03). O gráfico demonstra uma importante abertura progressiva de junta durante o ensaio (Figura 8 (a)), o que significa uma considerável concentração de dano nessa interface.

As três juntas 09, 10 e 11, directamente acima da junta 03, quase não sofreram qualquer deformação durante o ensaio. Quanto à junta 18, e que corresponde ao LVDT de topo nesta face, demonstrou uma ligeira tendência de fecho no início, mas perto do passo 7000 (fase final do ensaio) inverteu o sentido do deformação e apresentou uma grande abertura devido ao dano induzido na estrutura, tal como se ilustra na Figura 8 (c), excedendo a capacidade do LVDT utilizado.

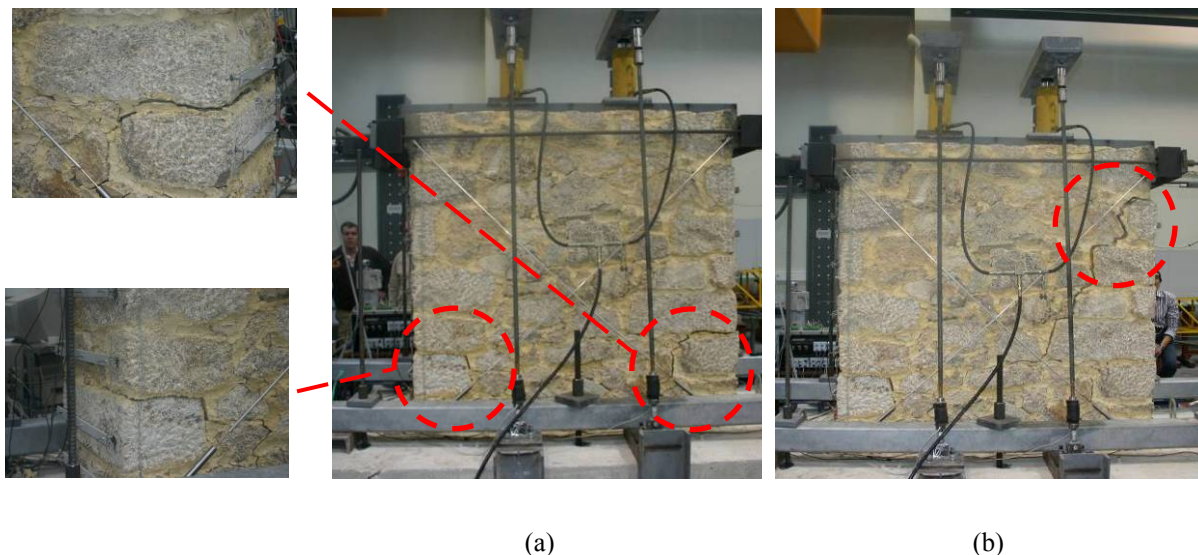


Figura 8: Concentração do dano na parede: (a) Junto à base da parede; (b) Na parte superior direita da parede.

### 5.3. Análise da rotação da parede em torno de um eixo vertical

De forma a analisar a torção ocorrida na parede ao longo do ensaio, representa-se no gráfico da Figura 9 a diferença de deslocamentos dos LVDT's 35 e 36 colocados transversalmente à parede.

No que diz respeito aos objectivos propostos para este ensaio, era desejável que não ocorresse qualquer tipo de rotação da parede em relação ao seu eixo vertical ou seja, que o deslocamento horizontal imposto fosse aplicado

durante o ensaio no centro de rigidez da parede. No entanto, podemos observar através da análise da Figura 9 que não só acontece uma rotação da parede, como ocorre um deslocamento do seu centro de rigidez.

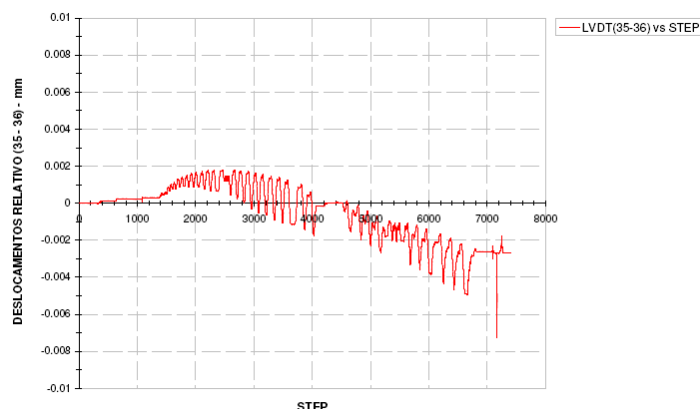


Figura 9: Diferença dos deslocamentos transversais (35-36) vs Step.

Inicialmente, e à medida que se impõe o deslocamento horizontal, a parede roda em torno de um eixo vertical no sentido indicado a tracejado na Figura 10 (a), indiciando que o centro de rigidez se encontra à direita do centro geométrico da parede tal como representado pela linha a traço e ponto nessa figura. Por outro lado, são introduzidos desde o início deslocamentos plásticos de torção na estrutura, resultantes de re-arranjos na estrutura da parede, fazendo com que a torção aconteça toda do lado positivo ou seja, com que a rotação da parede não ocorra de forma cíclica em torno do zero.

Verifica-se que a partir do passo 2200 o centro de rigidez da parede começa a deslocar-se no sentido contrário, chegando a fazer, perto do passo 4000, com que o sentido de rotação da parede se inverta (Figura 10 (b)), estando agora o centro de rigidez à esquerda da linha de actuação do actuador hidráulico, tal como representado pela linha a traço e ponto na mesma figura. A partir deste passo a torção passou a acontecer toda do lado negativo, resultado da introdução de deslocamentos plásticos de torção agora negativos, afastando-se o centro de rigidez cada vez mais para a esquerda.

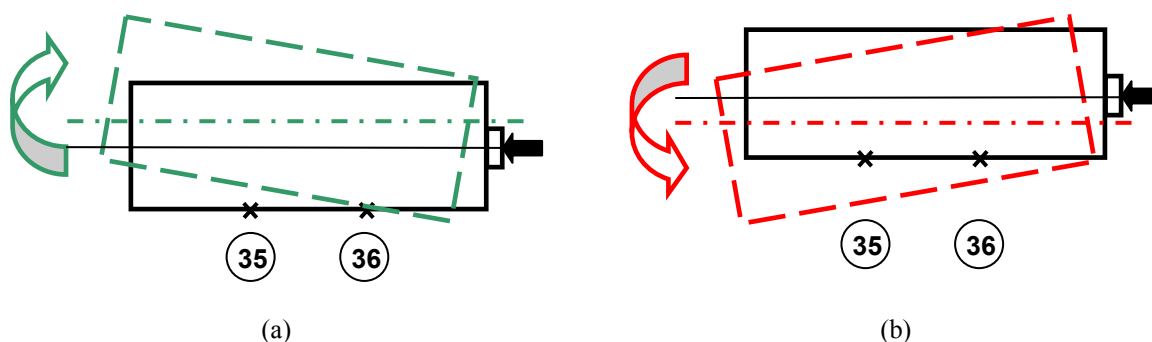


Figura 10: Torção da parede. (a) Torção do lado positivo. (b) Torção do lado negativo.

Os valores de deslocamento obtidos no gráfico da Figura 9 podem ser considerados quase irrelevantes quando comparados com os deslocamentos horizontais impostos nas paredes, sendo que no entanto são indicativos da tendência de deslocamento da parede fora do plano.

#### 5.4. Análise do comportamento das faces laterais das paredes quanto ao seu deslocamento horizontal

As Figuras 11 (a) e (b) apresentam o deslocamento horizontal das faces laterais da parede ao longo da sua altura nos vários pontos monitorizados. Com esta informação é possível analisar passo a passo o tipo de comportamento da parede.

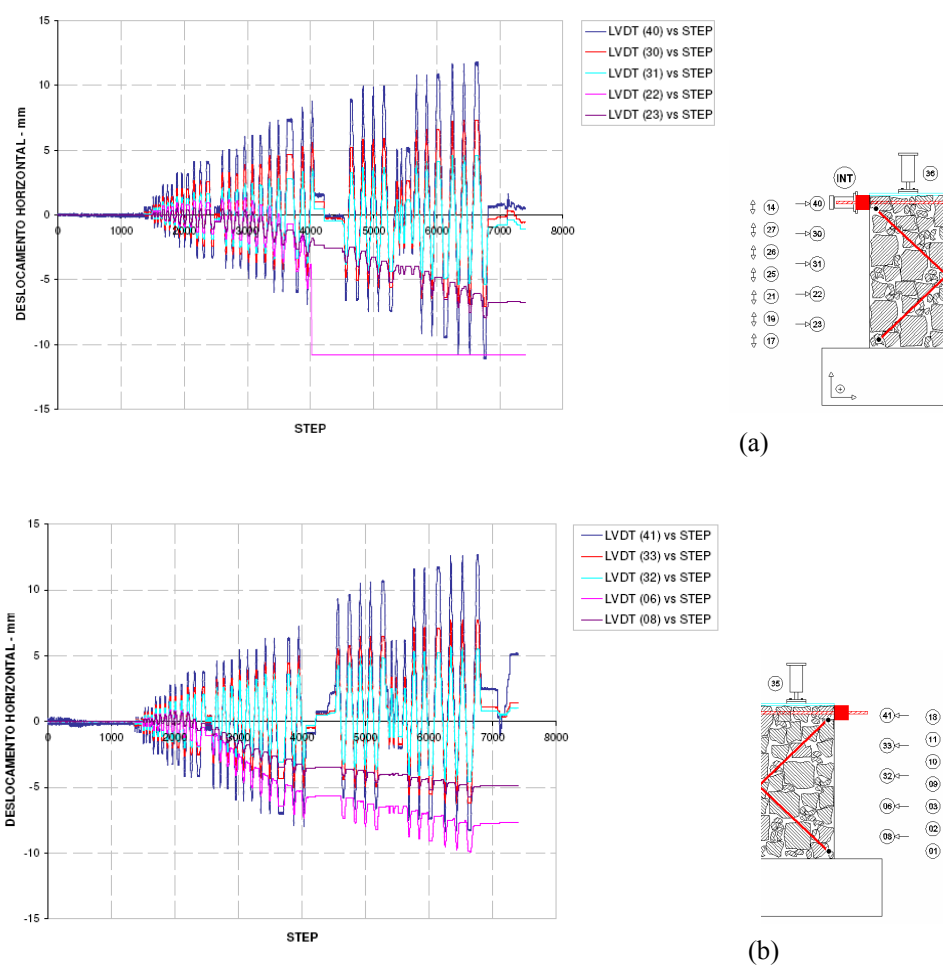


Figura 11: Deslocamento horizontal ao longo das faces laterais vs Step. (a) Face esquerda. (b) Face direita.

Na Figura 12 estão representadas as deformadas das faces laterais (deslocamentos horizontais dos LVDT's 40, 30, 31, 22, 23, 41, 33, 32, 06 e 08) para 4 níveis de deslocamento aplicados durante o ensaio, nomeadamente: 2, 4, 8 e 12mm.

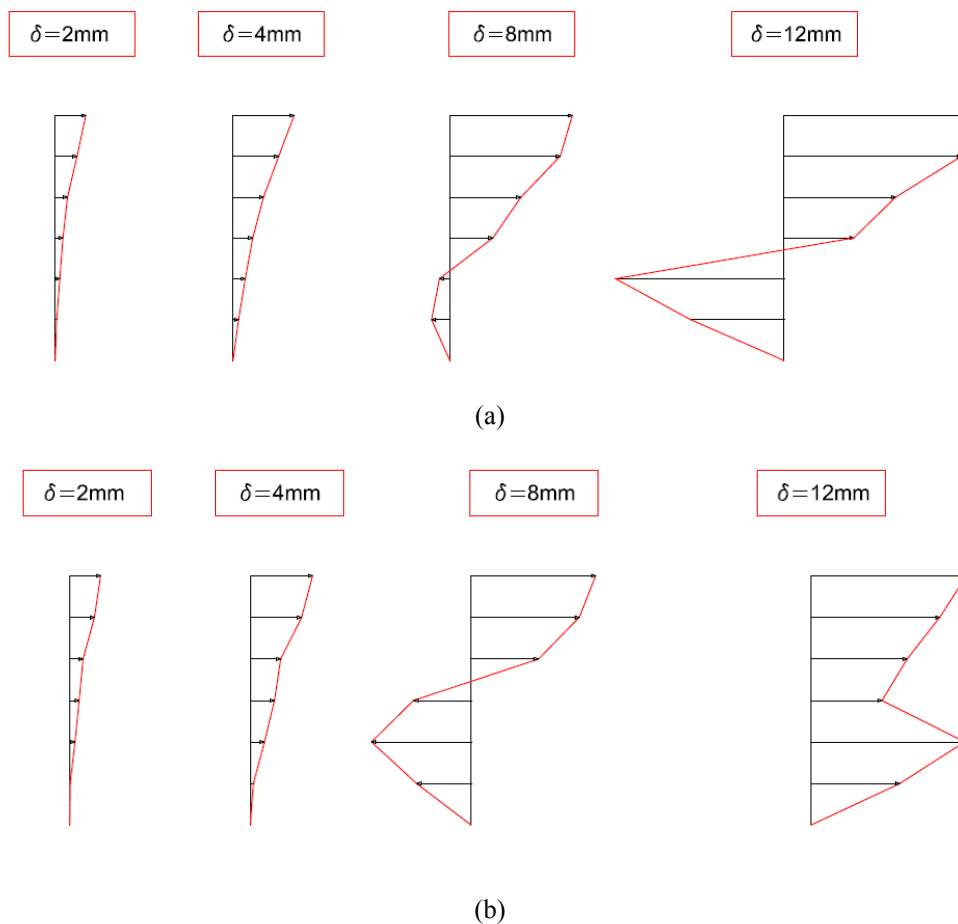


Figura 12: Deformada das faces laterais durante o ensaio. (a) Face esquerda. (b) Face direita.

Verifica-se que até aos 4mm a parede comporta-se como uma estrutura homogénea, sem que haja pontos de principal concentração de dano. O perfil de deslocamentos apresenta uma evolução em altura bastante regular. Para ciclos de deslocamento de maior amplitude, o perfil de resposta afasta-se do andamento dito regular e denota zonas de concentração de dano ao nível das juntas com deformações permanentes importantes. Este dano, que se reflecte no deslizamento das superfícies das juntas, é particularmente visível no aparecimento de pontos de quebra e inversões de deslocamento nos perfis. A representação dos perfis de deslocamento horizontal permite perceber as zonas em altura que correspondem à maior concentração de dano ao nível das juntas.

### 5.5. Análise do movimento diagonal na face frontal da parede

A Figura 13 apresenta os resultados obtidos com os LVDT's 28 e 29 colocados na face principal da parede por forma a medir a deformação segundo as diagonais.

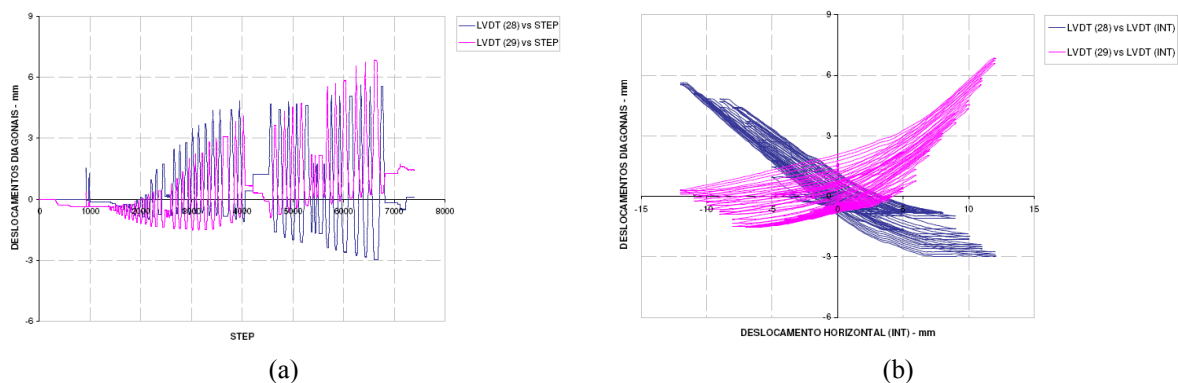


Figura 13: Deformação das diagonais na face frontal (a) vs Step. (b) vs Deformação horizontal no topo da parede.

Analisando os resultados apresentados na Figura 13 é possível avaliar que existe uma boa simetria entre os resultados do deslocamento dos dois LVDT's diagonais. Da análise do gráfico da Figura 13 (b) é possível verificar que quando se aplica um deslocamento horizontal positivo na parede esta exibe um deslocamento diagonal de abertura do LVDT 29 e de fecho do LVDT 28 e quando se inverte o sentido do deslocamento horizontal o comportamento dos LVDT's diagonais também se inverte. Este comportamento indicia uma componente de corte que influencia a resposta global da parede, sendo esta acompanhada também por uma componente de flexão cujo peso relativo não foi ainda quantificado através da separação das componentes de corte e de flexão do deslocamento. Denota-se na parte final do ensaio que para um deslocamento horizontal negativo ambos os transdutores diagonais apresentam um deslocamento no sentido positivo, ou seja ambos abrem. Esta abertura é indicativa de que nesta fase do ensaio ocorre um levantamento da zona assinalada na Figura 8 (b) por abertura excessiva da junta referenciada pelo LVDT 18.

## 5.6. Análise do deslocamento vertical das faces laterais

### 5.6.1. Respostas das juntas da base face ao deslocamento horizontal no topo da parede

Na Figura 14 encontram-se ilustrados os resultados da resposta das juntas da base em ambos os lados da parede, resultados estes que permitem concluir acerca do comportamento predominante da parede.

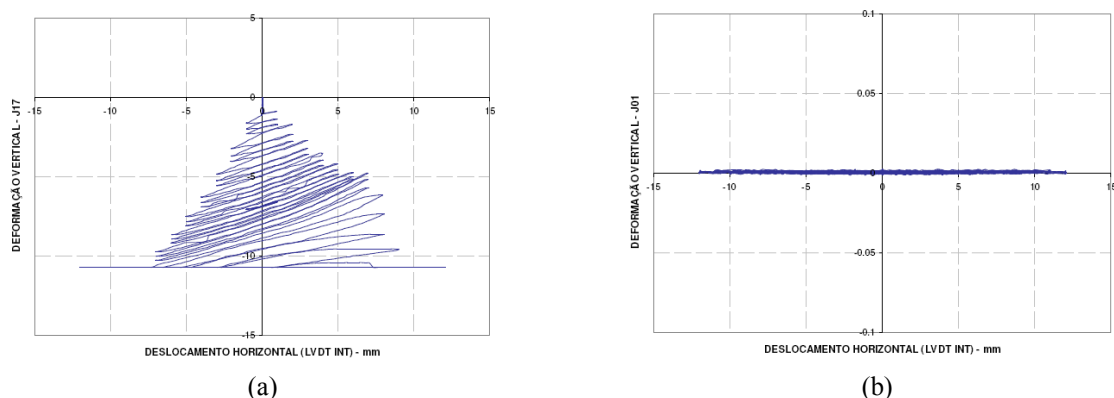


Figura 14: Deslocamento vertical vs Deslocamento horizontal no topo da parede. (a) Junta da base do lado esquerdo (17). (b) Junta da base do lado direito (01).

Como é possível observar na Figura 14 (a) e (b) relativas ao comportamento das juntas da base em ambos os lados, a junta da base da face direita (Figura 14 (b)) quase não apresenta movimento, mantendo-se fechada durante o ensaio, enquanto que a junta da base da face esquerda (Figura 14 (a)) apresenta um movimento

significativo no sentido de fecho das juntas. Este fenómeno pode ser explicado pela reduzida dimensão dos blocos de granito nesta zona, proporcionando um volume de argamassa percentualmente maior e que pela acção de compressão imposta pela carga cíclica, provocou o seu esmagamento. Estes resultados mostram que não terá ocorrido o fenómeno de rocking durante o ensaio da parede.

Da análise destes gráficos facilmente se conclui que o LVDT 17 tem uma forte influência no comportamento da face esquerda em termos de deslocamento vertical, introduzindo mais 10mm de fecho no final do ensaio, e que o seu homólogo da face direita (LVDT 01) não tem quase nenhuma influência no movimento vertical da face direita.

#### 5.6.2. Resposta total das juntas laterais face ao deslocamento horizontal no topo da parede

Nas Figuras 15 (a) e (b) encontram-se representados pelas linhas a traço contínuo as respostas totais verticais de todas as juntas das faces laterais (soma de todos os deslocamentos das juntas da mesma face) esquerda e direita respectivamente, com a evolução do deslocamento horizontal imposto. Nessas mesmas figuras mas agora a traço interrompido, apresentam-se as mesmas respostas sem a contribuição das juntas adjacentes à base (junta 17 do lado esquerdo e junta 01 do lado direito) e com a correcção do efeito introduzido na resposta das juntas pelo escorregamento do cabeçote metálico posicionado no topo da parede, sendo relevante referir que a face direita não sofreu o efeito do escorregamento (curva a tracejado e a traço contínuo sobrepostas).

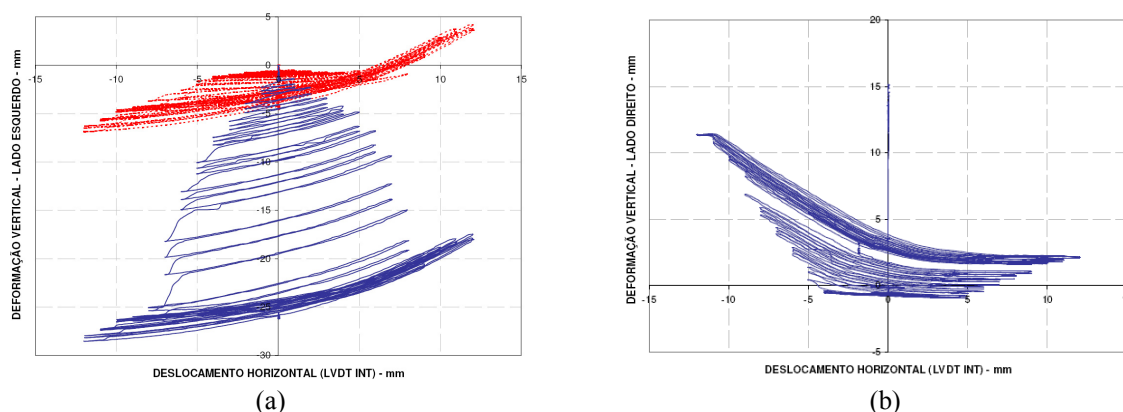


Figura 15: Deformação vertical vs Deslocamento horizontal no topo da parede. (a) Juntas do lado esquerdo. Traço contínuo – sem correcção. Traço interrompido – com correcção. (b) Juntas do lado direito. Traço contínuo – sem correcção. Traço interrompido – com correcção.

Como se pode observar no gráfico da Figura 15 (a) a face do lado esquerdo apresenta um deslocamento vertical total de compressão resultante, principalmente, do dano concentrado junto à base do lado esquerdo (junta 17), sendo esta junta responsável por aproximadamente 2/3 (10mm) do deslocamento efectivo de compressão desta face. Os 5mm residuais observados no final do ensaio são devido à deformação das restantes juntas dessa face. Deste gráfico é possível ainda verificar-se que o escorregamento do cabeçote metálico foi responsável por aproximadamente 10mm do deslocamento vertical nesta face (linha a traço contínuo).

Na Figura 15 (b) é possível concluir que a face direita apresentou inicialmente, até ao deslocamento de pico de 4mm, uma tendência para comprimir. Após este deslocamento, a tendência inverte-se e a parede junto a essa face aumenta de comprimento, notando-se em particular a abertura da junta 18 pela translação da curva na direcção vertical. Esta face não sofreu qualquer influência relativa ao escorregamento do cabeçote metálico da parede.

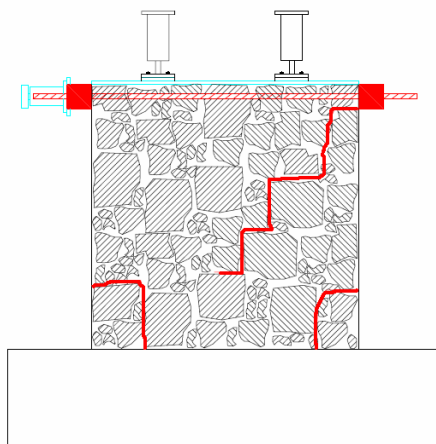


Figura 16: Padrão de dano na face frontal.

## 6. CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho os resultados de um teste efectuado a uma parede de alvenaria irregular de pedra de granito, de duas folhas, construída e ensaiada ao corte com compressão no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). A parede foi largamente monitorizada, utilizando células de carga e LVDT's, de modo a registar o comportamento da parede solicitada por uma acção vertical constante e uma história de deslocamentos cíclicos de amplitude crescente aplicada no plano da parede. A monitorização mostra a grande sensibilidade dos resultados à forma como é constituída a parede, à distribuição das pedras e das juntas, em particular à existência de maiores ou menores percentagens volumétricas de argamassa/juntas em relação ao volume total da parede. A concentração do dano ao nível das juntas foi claramente visível. Tratando-se de uma parede baixa em relação à sua dimensão longitudinal, factor de corte igual a 1, o comportamento é dominado pela abertura de juntas diagonal, que no caso presente provocou uma concentração do dano no prolongamento das diagonais principais e na formação de uma abertura de junta tendencialmente diagonal.

Trata-se de estruturas claramente heterogéneas, situação que se reflecte no seu comportamento ao nível local, embora ao nível global (Força horizontal vs Deslocamento horizontal) exista uma uniformidade e simetria no comportamento que dilui as particularidades detectadas localmente. Mostra-se serem estruturas com uma resposta bi/tri linear, com uma relativa capacidade de dissipação de energia, logo passíveis de ser simuladas com modelos de comportamento próximos dos utilizados na modelação de materiais como o betão.

## 7. AGRADECIMENTOS

No final deste trabalho os autores desejam expressar os mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas e entidades que de algum modo contribuíram para a concretização deste trabalho, nomeadamente a todos os funcionários do Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pelo seu interesse, apoio e disponibilidade contínua durante a realização do trabalho.

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da "FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia", Portugal.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] Costa A. A., Silva B., Costa A., Guedes J., Arêde A. (2006) Structural behaviour of a masonry wall under horizontal cyclic load; experimental and numerical study, Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, India.
- [2] Costa A. A. (2007) Experimental testing of lateral capacity of masonry piers. AN application to seismic assessment of AAC masonry buildings, MSc Thesis, ROSE School, Pavia, Italia.
- [3] Oliveira D. (2003) Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading, PhD Thesis, Universidade do Minho, Portugal.
- [4] Lourenço P. B., Vasconcelos G. (2006) Assessment of the in-plane shear strength of stone masonry walls by simplified models, Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, India.
- [5] LabView 8.0, National Instruments Software.