

## Aplicação de uma nova metodologia de ensaio à compressão *in-situ* de paredes de alvenaria de pedra para determinação das suas propriedades mecânicas

Rui Silva<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Instituto da Construção, Porto, Portugal, ruis@ife.up.pt

<sup>b</sup> CONSTRUCT-LESE - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

António Arêde

CONSTRUCT-LESE - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, aarede@ife.up.pt

Patrício Rocha<sup>c,b</sup>

<sup>c</sup> proMetheus - Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viana do Castelo, Portugal, procha@estg.ipvc.pt

Celeste Almeida<sup>d,b</sup>

<sup>d</sup> Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Fernando Pessoa, Portugal, celestea@ufp.edu.pt

### RESUMO

No presente artigo abordam-se as principais fases que conduziram ao desenvolvimento de um novo *set-up* para ensaio *in-situ* de paredes à compressão. A elaboração do referido *set-up* teve em consideração a necessidade de torná-lo o mais modular possível, facilmente adaptável a diferentes tipos de paredes, com diferentes tipos de blocos e texturas. Adicionalmente, por ser autoequilibrado, o sistema desenvolvido caracteriza-se por não introduzir qualquer carregamento adicional no edifício produzindo, simultaneamente, um carregamento uniforme de compressão na zona de ensaio. São ainda apresentados alguns dos resultados obtidos numa campanha experimental realizada em edifícios da região do Porto, que permitiram a obtenção de curvas de comportamento material para as paredes de alvenaria de pedra.

### PALAVRAS-CHAVE:

Paredes de Alvenaria de Pedra; *Set-up* de ensaio de paredes; Património; Sísmica; Projeto; Reabilitação, Monitorização

## 1 INTRODUÇÃO

A reabilitação urbana é uma necessidade amplamente reconhecida. Neste contexto, assume particular relevância o conhecimento que as propriedades mecânicas das alvenarias desempenham no processo de reabilitação. É neste pressuposto que assenta a pertinência deste artigo, em que se aborda o desenvolvimento de um *set-up* para a realização de ensaios de compressão *in situ*, idealizado no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da FEUP.

No caso concreto das paredes de alvenaria, as incertezas relacionadas com o comportamento mecânico dos materiais que as constituem, assim como, a falta de conhecimento acerca do seu estado de conservação, impõem que cada intervenção esteja sujeita a um cuidadoso processo de preparação e, nalguns casos, à realização de ensaios *in situ* capazes de as caracterizar adequadamente.

O *set-up* de ensaio desenvolvido foi idealizado para se poder constituir como um sistema modular, adaptável a diferentes configurações de ensaio, com recurso a diferentes necessidades de carregamento e diferentes tipos de parede. Tratando-se de um sistema auto-equilibrado que não introduz quaisquer tipo de ações adicionais à estrutura, o seu sistema de atuação é capaz de solicitar a parede com uma carga vertical uniforme.

No presente artigo, e para além da descrição geral do *set-up*, serão apresentados alguns dos resultados obtidos em diferentes campanhas de ensaio, vincando a versatilidade do *set-up* e capacidade para fornecer resultados satisfatórios.

## 2 DESCRIÇÃO GERAL DO SET-UP

O *set-up* de ensaio desenvolvido foi idealizado com o intuito de caracterizar o comportamento monotónico e cíclico de paredes de alvenaria à compressão *in situ*, permitindo estimar parâmetros de deformabilidade da parede de alvenaria. Na concepção do sistema de atuação e reação, foram levados em linha de conta os constrangimentos relacionados com a alocação de equipamentos pesados para ensaios *in situ*, optando-se por alternativas modulares e leves, facilmente adaptáveis a diferentes condições de ensaio. Por forma a facilitar a sua instalação, a solução envolveu a definição de um sistema de reação constituído por perfis metálicos da classe UPN (ver Fig.1), dispostos em módulos independentes com o comprimento de 0.50 m (a partir daqui designados por módulos).

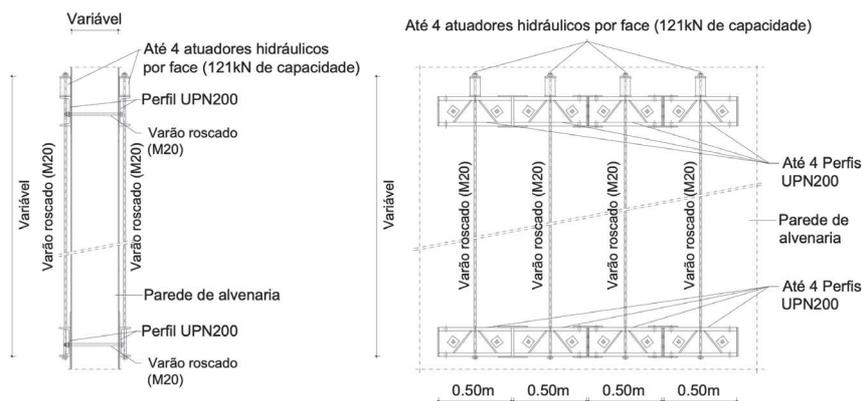


Figura 1. Corte transversal e alçado frontal do set-up de ensaio [1]

No dimensionamento de todo o sistema foi assumido que a carga vertical a aplicar seria suportada pela resistência ao corte dos varões roscados e pela mobilização do atrito entre os perfis metálicos e a face da parede de alvenaria (mobilizado pelo tensionamento dos varões horizontais). Para conferir a todo o sistema a necessária continuidade entre módulos de 0.50 m, foram introduzidas chapas de reforço nos perfis que permitem a ligação topo a topo. Para melhorar a transmissão dos esforços, também foram adotados reforços diagonais próximos dos pontos de aplicação das cargas.

A colocação dos perfis metálicos é realizada em dois níveis e em ambos os lados da parede. Os perfis colocados nas faces opostas da parede são solidarizados através do atravessamento de dois varões roscados por módulo, previamente tensionados por macacos hidráulicos (Fig.2). Em cada face da parede, os perfis colocados a um nível superior e inferior encontram-se ligados por um par de varões roscados por módulo colocados na vertical (um varão por cada face da parede), responsáveis pela transmissão de carga vertical entre níveis. Em grande parte dos casos de ensaios de campo, não é possível utilizar atuadores hidráulicos de grande capacidade. Assim, considerou-se adequada a utilização de pequenos macacos hidráulicos que podem ser atravessados por cada um dos varões roscados verticais, tensionando-os. Os varões, assim tensionados, mobilizam reação no módulo metálico, com uma intensidade igual, mas sentido oposto, à tração nos varões, criando uma zona comprimida entre os dois níveis (Fig.3).

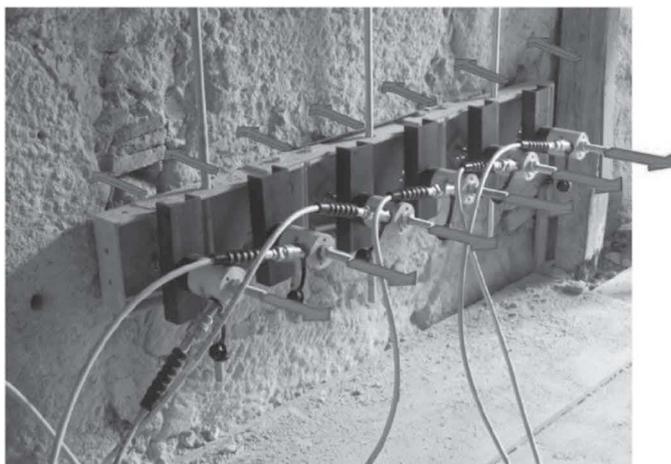


Figura 2. Tensionamento de varões horizontais de ancoragem [1]



Figura 3. Zona comprimida pelo tensionamento dos varões verticais [1]

Na concepção inicial do sistema foi prevista a utilização de quatro módulos de reação que totaliza um comprimento total de 2.00 m. Na configuração referida, quatro macacos hidráulicos em cada face da parede, cada um com capacidade de atuação individual máxima de 121 kN, permitem aplicar uma força total máxima de 968 kN (484kN/m); sendo os registos contínuos da força aplicada ao longo do ensaio adquiridos através da colocação de células de carga nos varões roscados verticais. A par do registo contínuo de força, a aquisição e registo de deformações verticais e horizontais é feita através da utilização de transdutores de deslocamento em ambas as faces da parede.

Como se compreende, a expansão do sistema é possível através da introdução de módulos de reação adicionais. Também é possível a obtenção de patamares de tensão vertical mais elevados, recorrendo ao redimensionamento do sistema de reação e ao uso de atuadores hidráulicos de capacidade superior. Na configuração atual não foi procurado atingir os níveis de rotura na parede, mas sim estimar de forma satisfatória, o seu módulo de deformabilidade.

Procurando minimizar a intrusividade do sistema, no *set-up* de ensaio desenvolvido não foi considerada a separação do painel a ensaiar relativamente à restante parede. Ainda que este procedimento facilite o processo de ensaio, levanta questões relativamente à avaliação da tensão vertical que efetivamente

é aplicada no painel uma vez que as zonas laterais do painel representam regiões com rigidez, para as quais as tensões verticais aplicadas tendem a dispersar.

Por este motivo, ao longo do processo de desenvolvimento do *set-up*, foi conduzida uma campanha numérica que procurou estimar essa dispersão da carga vertical aplicada, relacionando-a com a geometria e textura da parede e avaliando a influência que o ponto de aplicação do carregamento teria nessa mesma dispersão.

### 3 CAMPANHA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Locais de ensaio

O método sistemático para o ensaio *in-situ* à compressão de painéis de alvenaria, apresentado na secção 2, foi utilizado em quatro locais selecionados na região do Porto, com painéis de alvenaria constituídos por blocos de granito de razoáveis dimensões e juntas verticais e horizontais argamassadas. Em cada local de ensaio, o número de testes realizados variou: 1 ensaio no Solar de Lamas (SL), próximo das instalações da FEUP; 4 ensaios num edifício na rua Miguel Bombarda (MB<sub>1</sub>, MB<sub>2</sub>, MB<sub>3</sub> e MB<sub>4</sub>); 1 ensaio na Igreja de Mancelos, com a avaliação de resultados subdividida em dois (MAN<sub>1</sub> e MAN<sub>2</sub>); e, finalmente, 3 ensaios num edifício na rua da Firmeza (FIR<sub>1</sub>, FIR<sub>2</sub> e FIR<sub>3</sub>).

Adicionalmente, na análise de resultados optou-se por agrupar os resultados de acordo com o índice de irregularidade geométrica definido em [2]. Resultou deste agrupamento que: os painéis FIR<sub>2</sub>, MAN<sub>1</sub> e MAN<sub>2</sub> pertencem à Classe Regular; os painéis SL, MB<sub>1</sub>, MB<sub>2</sub>, MB<sub>3</sub>, FIR<sub>1</sub>, FIR<sub>3</sub> e FIR<sub>4</sub> pertencem à Classe Parcialmente Regular; e que o painel FIR<sub>4</sub> pertence à Classe Irregular.

A Fig.4 mostra dois dos painéis de ensaio (MB<sub>2</sub> e FIR<sub>2</sub>), onde é visível o posicionamento do sistema de reação e dos macacos hidráulicos responsáveis pela aplicação do carregamento.

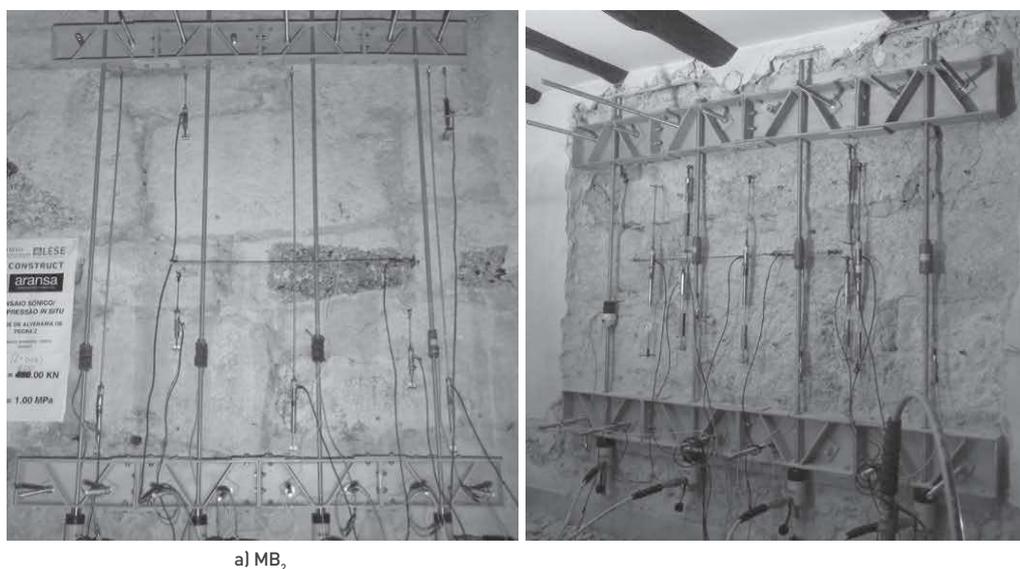


Figura 4. Aspeto geral de dois dos painéis de ensaio [1]

Em cada um dos painéis ensaiados, foram dispostos diversos transdutores de deslocamento (TD) em ambas as faces da parede, registando, de forma contínua, os deslocamentos verticais e horizontais. Consoante o número de módulos de reação presentes, o número de atuadores e células de carga colocadas variou entre dois (SL and MB<sub>4</sub>), em que apenas um módulo de reação foi empregue e oito (MB<sub>2</sub>, FIR<sub>1</sub>, and FIR<sub>3</sub>), nos casos em que quatro módulos de reação foram empregues. A variação referida resulta do comprimento disponível em cada painel de ensaio.

### 3.2 Ajuste analítico de resultados

O comportamento experimental obtido foi ajustado por tramos lineares capazes de descrever analiticamente a curva obtida. No caso da Fase de Carga (FC), onde a força é incrementada de forma monotónica até ao valor máximo previsto para o ciclo, foi ajustado um tramo linear a cada ciclo (ver Fig.5). Os diferentes declives representam o módulo de deformabilidade de 1ª carga em cada ciclo,  $E_{FC}$ , dando uma aproximação da curva envolvente para o conjunto completo de ciclos. Após a obtenção do valor máximo de tensão previsto para um dado ciclo, a tensão é diminuída até zero na denominada Fase de Descarga (FD), ao que se segue uma Fase de Recarga (FR), com novo incremento de tensão vertical. Os dados registados por cada transdutor de deslocamento posicionado no painel, apontam para um declive similar para as fases de descarga e recarga (FDR). Como tal, a ambas as fases poderão ser ajustados tramos lineares com declives similares, representativos da rigidez da Fase de Descarga-Recarga,  $E_{FDR}$ , como ilustrado na Fig.5.

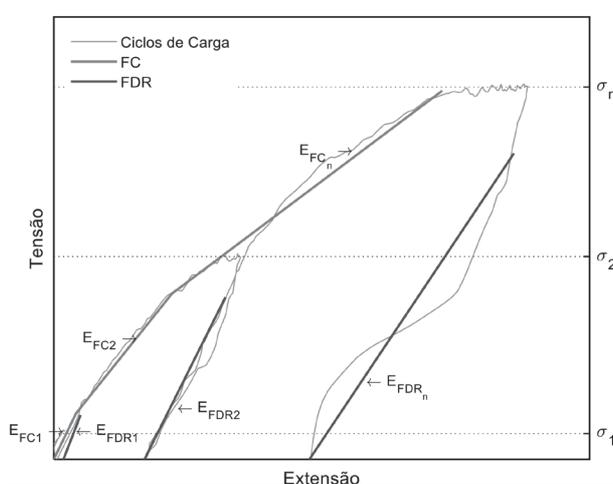


Figura 5. Ajuste analítico das fases de carga (FC) e de descarga-recarga (FDR) dos ensaios [1]

No caso do comportamento global dos painéis em análise no presente artigo, os declives medidos e extrapolados do gráfico que relaciona a tensão vertical de compressão com as extensões, correspondem ao módulo de deformabilidade (inicialmente elástico) da alvenaria.

### 3.3 Resultados

Da Fig.6 à Fig.8 são apresentadas as curvas tensão-extensão obtidas para cada um dos ensaios realizado. Nessas curvas foram usados os valores médios dos transdutores de deslocamento localizados na mesma posição da parede, mas em faces opostas (as únicas exceções foram as paredes  $MAN_1$  e  $MAN_2$ , em que só foram consideradas as leituras individuais de cada transdutor de deslocamento). Na legenda de cada figura, aponta-se o valor da tensão vertical máxima ( $\sigma_v$ ) atingido em cada ensaio. Refira-se que as tensões apresentadas se encontram afetadas pela dispersão da carga vertical aplicada, dado o não isolamento do painel.

Como facilmente se pode verificar, os gráficos tensão-extensão obtidos são fortemente marcados por uma fase inicial onde as curvas apresentam um declive acentuado nos primeiros ciclos, decaindo claramente nos últimos. Dadas as distintas características geométricas e materiais de cada painel, os resultados obtidos variam, mesmo entre paredes da mesma classe de irregularidade.

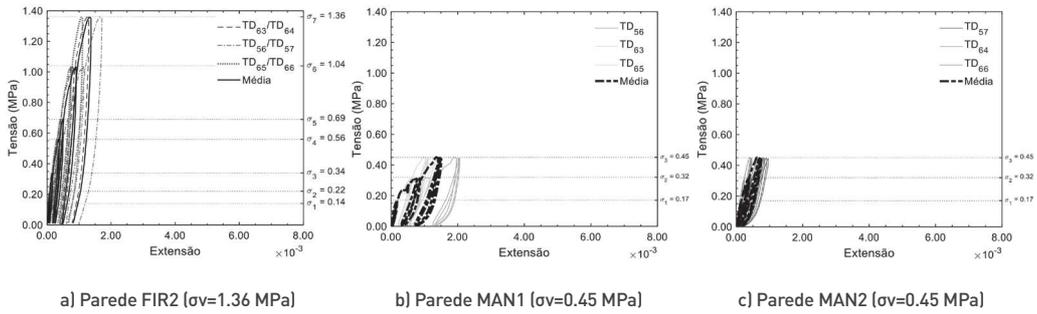


Figura 6. Curvas tensão-extensão obtidas para a Classe Regular [1]

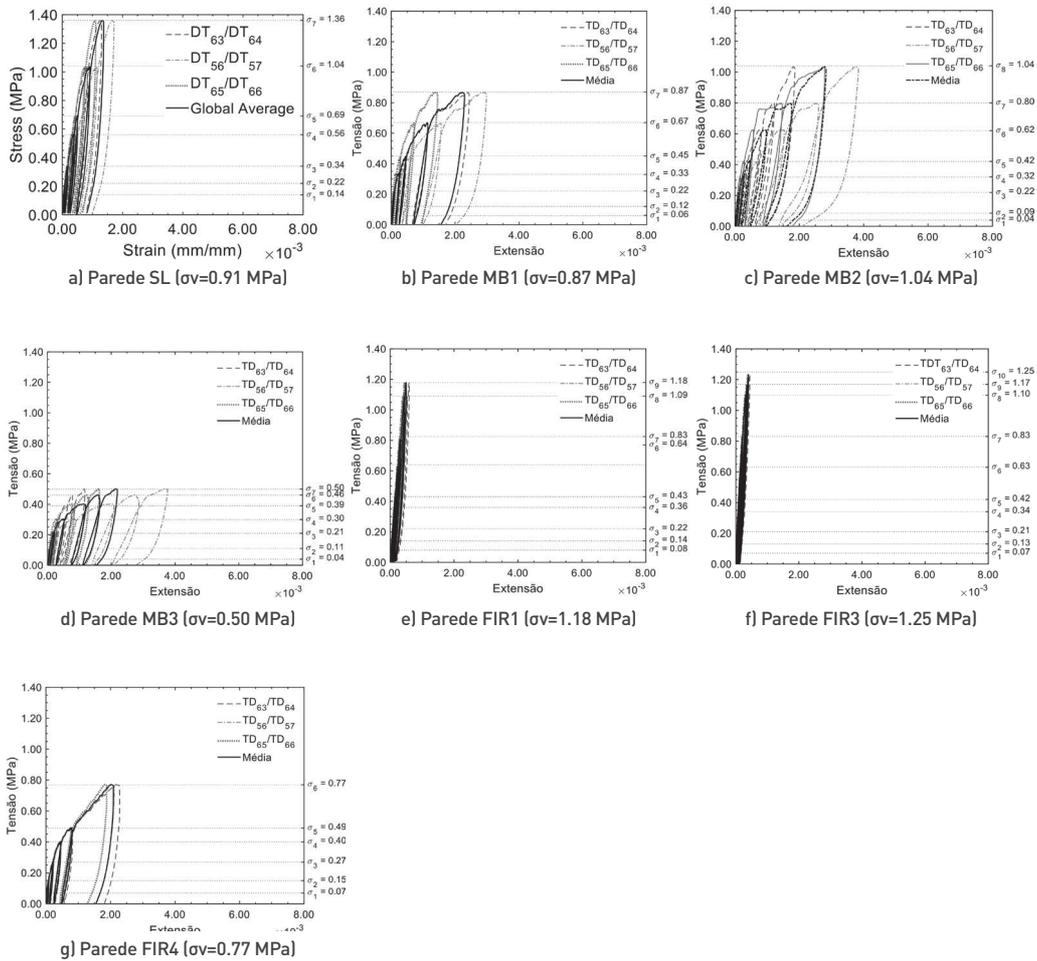


Figura 7. Curvas tensão-extensão obtidas para a Classe Parcialmente Regular [1]

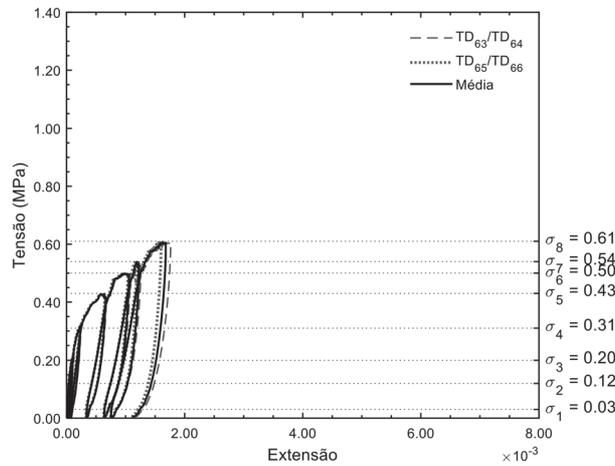


Figura 8. Curvas tensão-extensão obtidas para a Classe Irregular – MB4 ( $\sigma_v=0.61$  MPa) [1]

### 3.4 Análise de resultados

A análise do decaimento de rigidez possibilitou a avaliação do comportamento cíclico da parede. O tratamento dos resultados envolveu o ajuste das curvas analíticas às curvas experimentais obtidas, procurando que as mesmas conseguissem reproduzir de forma satisfatória o comportamento experimental observado. Com este objetivo, a metodologia utilizada no tratamento dos resultados obtidos na Fase de Carga (FC) considerou a representação num único gráfico dos resultados obtidos por ciclo, para cada uma das paredes. Na análise dos resultados, considerou-se que dois ramos lineares eram suficientes para ajustar satisfatoriamente a regressão obtida, sendo o ponto comum aos dois ajustes lineares, o valor de tensão vertical responsável por um decaimento de 50% no módulo de deformabilidade, se comparado com a rigidez inicial.

O número de casos disponível para cada uma das classes de irregularidade geométrica é bastante baixo e diferente entre cada classe (3 casos na Classe Regular, 7 casos na Classe Parcialmente Regular e apenas 1 caso na Classe Irregular), o que afeta o valor do coeficiente de determinação,  $R^2$ . Como se observa na Fig.9, a tensão vertical para a qual ocorre a transição entre ramos lineares, não é muito afetada pela irregularidade geométrica das paredes, visto o valor de tensão ser aproximadamente o mesmo (0.34 MPa para a Classe Regular, 0.43 MPa para a Classe Parcialmente Regular e 0.30 MPa para a Classe Irregular). Assim, em todas as classes, o valor de tensão para o qual os primeiros sinais de não linearidade ocorrem, encontram-se no intervalo [0.30 MPa-0.43 MPa] o que, na maioria das paredes ocorre entre o 2º e o 4 ciclo. A partir deste ponto observa-se um súbito incremento de extensões.

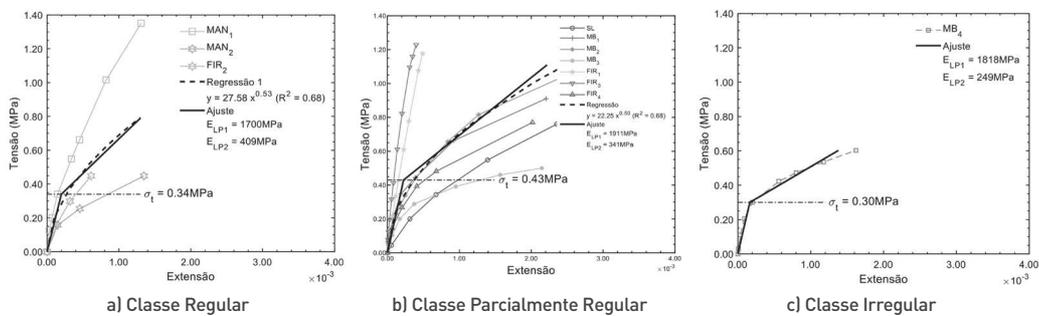


Figura 9. Interpolação realizada para os resultados obtidos para cada classe de irregularidade [1]

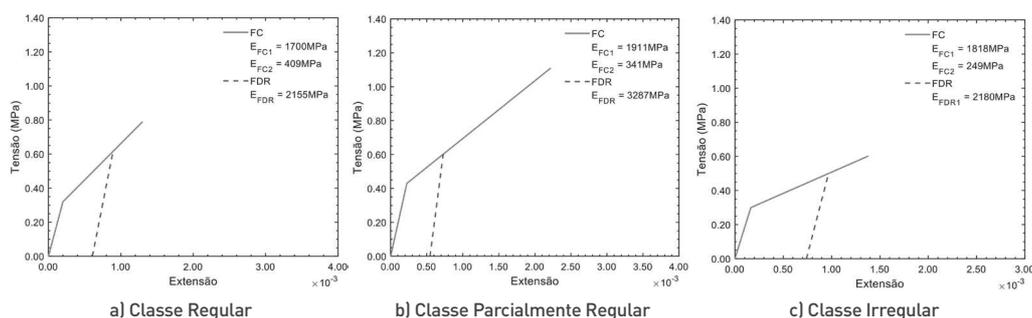


Figura 10. Curvas de tensão-extensão analíticas obtidas para cada classe de irregularidade [1]

#### 4 CONCLUSÕES

A missão de caracterizar adequadamente as estruturas antigas de alvenaria não é fácil. A intrínseca variabilidade das suas características geométricas e mecânicas, aponta claramente para a necessidade do desenvolvimento de vários estudos com esse intuito, acrescentando aos bons exemplos que já existem [3-5].

No presente artigo foi discutida uma nova abordagem para a caracterização das propriedades mecânicas de paredes de alvenaria, sujeitas à compressão. Neste contexto foram discutidos os passos que conduziram ao desenvolvimento de um *set-up* para ensaio deste tipo de elementos à compressão *in-situ*. Para facilitar a sua adoção generalizada, procurou-se que fosse modular e versátil o suficiente para poder ser utilizado em paredes de alvenaria com diferentes características.

A aplicação do *set-up* de ensaio foi efetuada em quatro diferentes locais, considerando-se um total de onze ensaios que serviram, simultaneamente, para teste do próprio *set-up* e, não menos importante, para avaliação das características de deformabilidade dos diferentes tipos de painel.

A análise efetuada possibilitou a definição de curvas tensão-extensão bilineares, com a transição entre ramos feita quando o valor do módulo de deformabilidade alcançado em cada ciclo consecutivo, decaía em mais do que 50% face ao anterior. No caso da Fase de Carga (FC), o valor da tensão de transição entre tramos lineares situa-se no intervalo [0.30 MPa-0.43 MPa], ao passo que na Fase de Descarga-Re-carga (FDR), esse limite subiu para cerca de 0.68 MPa.

Em termos de deformabilidade os valores alcançados para o tramo inicial da FC foram de 1700 MPa para a Classe Regular, 1911 MPa para a Classe Parcialmente Regular e de 1818 MPa para a Classe Irregular. A elevada rigidez obtida nas paredes FIR<sub>1</sub> e FIR<sub>3</sub>, ambas pertencentes à Classe Parcialmente Regular, influenciou os resultados desta classe, tornando o valor de deformabilidade superior até ao da Classe Regular. Para o segundo tramo da FC, os valores foram de 409 MPa para a Classe Regular, 341 MPa para a Classe Parcialmente Regular e de 249 MPa para a Classe Irregular. Os valores obtidos para a Classe Parcialmente Regular e Irregular encontram-se próximos dos obtidos em [2], onde paredes com geometria similar foram ensaiadas em laboratório.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). Os autores agradecem o trabalho desenvolvido pelos técnicos do Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE), Dr. Nuno Pinto, Sr. Valdemar Luís e ao Sr. Guilherme Nogueira pelo seu apoio na atividade experimental reportada neste artigo e à empresa de construção civil ARANSA por possibilitar o acesso e providenciar apoio logístico ao edifício onde a campanha experimental foi realizada.

## REFERÊNCIAS

- [1] Silva, R (2020). Mechanical characterization of stone masonry walls of Porto region : Experimental and numerical contributions. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, PhD Thesis.
- [2] Almeida, C. (2013). Paredes de alvenaria do Porto: tipificação e caracterização experimental. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Tese de Doutoramento.
- [3] Vasconcelos, G (2005). Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, PhD Thesis.
- [4] Corradi, M, Borri, A (2002). Experimental study on the determination of strength of masonry walls. Construction and Building Materials, vol. 17, pp. 325-337. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(03\)00007-2](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(03)00007-2).
- [5] Andreini, M, de Falco, A, Giresini, L, Sassu, M (2013). Mechanical Characterization of Masonry Walls with Chaotic Texture: Procedures and Results of In-Situ Tests. International Journal of Architectural Heritage, vol. 8, pp. 376-407. <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.826302>.