

Resistência à compressão de paredes de alvenaria de pedra. Comparação de resultados obtidos com macacos planos e em compressão axial

Comparison between compression strength results obtained through double flat jack test and axial compression test

André F. L. Saraiva
Fernando F. S. Pinho
Válter J. G. Lúcio

Resumo

Os ensaios de macacos planos duplos não foram originalmente desenvolvidos para a caracterização mecânica de paredes de alvenaria de edifícios antigos, mas na ausência de outras alternativas e apesar de algumas incertezas no rigor dos resultados obtidos, são frequentemente utilizados para a estimativa das características mecânicas das paredes de alvenaria resistentes de edifícios antigos.

Neste artigo apresentam-se os resultados de ensaios de macacos planos, realizados num modelo experimental de alvenaria de pedra tradicional com dimensões de $1,20 \times 1,20 \times 0,40 \text{ m}^3$ e o resultado do ensaio de compressão axial do mesmo modelo experimental num sistema preparado para o efeito. É efetuada a comparação dos resultados da resistência mecânica do modelo, obtidos através do ensaio de macacos planos duplos e do ensaio de compressão axial e a discussão dos resultados obtidos. Por fim, são apresentadas as principais conclusões obtidas.

Abstract

Flat jack tests were not originally developed for mechanical characterization of masonry walls of ancient buildings, but in the absence of other alternatives and besides other uncertainties in the accuracy of the obtained results, they are frequently used to estimate the mechanical characteristics of ancient building's masonry walls.

This paper presents the results of flat jack tests, performed in an experimental model of traditional stone masonry with dimensions of $1.20 \times 1.20 \times 0.40 \text{ m}^3$ and the axial compression test result of the same experimental model in a test system prepared for the purpose. A comparison is made between the results of the model's compression strength, obtained through the double flat jack test and the axial compression test. At last are presented the main conclusions reached.

Palavras-chave: Ensaios de macacos planos duplos / Alvenaria de pedra tradicional / Caracterização mecânica

Keywords: Flat-jack testing / Natural stone masonry / Mechanical properties

André F. L. Saraiva

NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA
Portugal
af.saraiva@campus.fct.unl.pt

Fernando F. S. Pinho

CERIS
NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA
Portugal
ffp@fct.unl.pt

Válder J. G. Lúcio

CERIS
NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA
Portugal
vjgl@fct.unl.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

SARAIVA, A. [et al.] – Resistência à compressão de paredes de alvenaria de pedra. Comparação de resultados obtidos com macacos planos e em compressão axial. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 17. ISSN 2183-8488. (novembro 2021) 15-22.

1 Introdução

A reabilitação de edifícios é uma atividade em rápido desenvolvimento, com o objetivo de preservar e proteger o património edificado. De maneira a escolher as soluções mais adequadas à reabilitação de um edifício, é necessário fazer uma caracterização dos materiais e elementos construtivos existentes, não só para evitar a adoção de soluções demasiado intrusivas ou até incompatíveis com as pré-existentes, mas também para obter o melhor desempenho possível [1].

Existem diversas técnicas de caracterização mecânica de alvenarias. A maior parte são técnicas de laboratório, que exigem uma recolha de amostras de grandes dimensões de modo a ter uma correta representatividade da heterogeneidade do material; este processo é moroso, de difícil execução e intrusivo. Esta situação levou ao surgimento dos ensaios de macacos planos, que não só são uma solução bastante menos intrusiva, como permite, *in situ*, determinar/estimar a tensão instalada e a resistência mecânica à compressão da alvenaria, bem como as suas características de deformabilidade [2].

1.1 Constituição dos macacos planos

Os macacos planos, são tipicamente constituídos por aço inoxidável ou alumínio e são soldados ao longo dos bordos, tendo normalmente dois orifícios, que permitem a saída de ar do macaco plano, injetando óleo por um orifício enquanto o outro está aberto. A espessura varia entre 1 e 6 mm. A forma geométrica do macaco plano a utilizar depende do equipamento utilizado para criar o rasgo. Na Figura 1 é possível observar formas geométricas comuns dos macacos planos. As dimensões podem variar desde alguns centímetros até mais de um metro de comprimento, sendo este último caso de aplicação, mais usual na mecânica das rochas [3].

Os macacos planos utilizados nos ensaios apresentados na secção 2.2 do presente trabalho, cumprem as normas ASTM [5, 6] aplicáveis e as recomendações das normas RILEM [7, 8]. Estes são em alumínio, apresentam uma configuração semi-circular e dimensões de $350 \times 260 \times 3 \text{ mm}^3$.

1.2 Descrição geral do ensaio de macacos planos duplos

O procedimento do ensaio de macacos planos duplos consiste em executar dois rasgos paralelos, onde se inserem os macacos planos. De seguida colocam-se os aparelhos de medição de deslocamentos (miras metálicas, LVDT'S, potenciómetros, etc.) no troço da alvenaria entre os macacos planos, tipicamente 4 alinhamentos verticais e 1 horizontal. Após ligação a um sistema de pressurização, inicia-se a aplicação de pressão, em incrementos constantes. Deve-se registar os deslocamentos ocorridos, em cada patamar de pressão. O ensaio pode ser realizado com ciclos carga/descarga ou continuamente, e termina quando ocorre a rotura da alvenaria, determinado pela ausência de reação quando se realizam incrementos de pressão, existindo aumentos de deslocamentos para o mesmo incremento de pressão [1].

A pressão registada no manómetro da bomba hidráulica não corresponde à pressão realmente aplicada sobre a alvenaria, durante

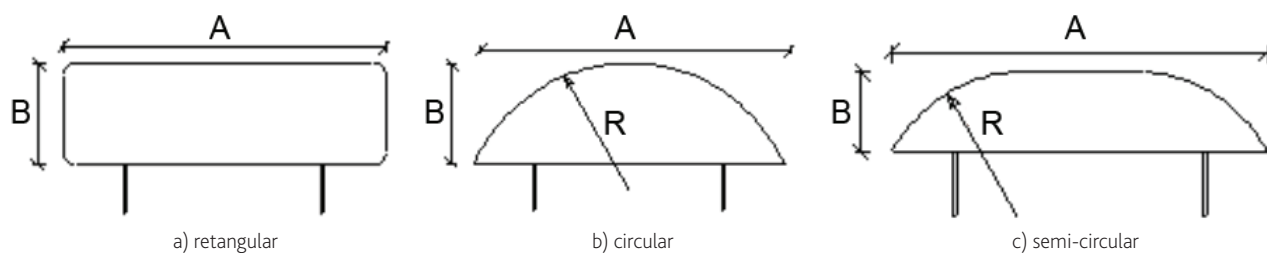


Figura 1 Diferentes formas geométricas de macacos planos, adaptado de Miranda [2]

o ensaio. Este valor necessita de ser corrigido de forma a ter em consideração a rigidez do material constituinte do macaco plano e a diferença entre a área efetivamente em contacto com a alvenaria e a área do corte efetuado [2].

Para o cálculo do valor da tensão (σ_m) realmente exercida sobre a alvenaria, utiliza-se a Eq. (1) [5].

$$\sigma_m = k_m \times k_a \times p \quad (1)$$

Em que:

k_m coeficiente (adimensional) que reflete a rigidez do macaco plano e o atrito do sistema hidráulico;

k_a coeficiente (adimensional) que traduz a relação entre a área de contacto efetiva do macaco plano e a área do corte;

p pressão (MPa), medida no manómetro;

σ_m tensão (corrigida com os coeficientes, k_m e k_a) (MPa).

O fator k_m corresponde ao fator de correção que tem em consideração a rigidez do material constituinte do macaco plano e o atrito do sistema hidráulico, que provoca um aumento da pressão registada no manómetro durante o ensaio de macacos planos, mas que não se reflete na pressão realmente aplicada sobre a alvenaria pelo macaco plano. Este fator é normalmente disponibilizado pelo fabricante dos macacos planos, mas, após algumas utilizações, é recomendado efetuar uma nova calibração, determinando um novo fator k_m , sendo o procedimento descrito em detalhe na norma [5].

O ensaio de macacos planos duplos consiste num ensaio de compressão simples de um troço confinado de uma parede de alvenaria e, tal como um ensaio de compressão axial convencional, permite estimar a resistência à compressão e módulo de elasticidade de uma alvenaria [1].

1.3 Trabalhos de investigação de outros autores

Em 1982, Paolo Rossi [8] publicou um trabalho onde utilizou, pela primeira vez, o ensaio de macacos planos simples e o ensaio de macacos planos duplo. Desde então, vários autores adotaram a técnica. Binda *et al.* [9] estudaram a influência das diferentes dimensões de macacos planos nos resultados dos ensaios. Noland *et al.* [10] realizaram ensaios de macacos planos em paredes antigas de alvenaria de tijolo, nos Estados Unidos da América. Gregorczyk e Lourenço [3] realizaram uma campanha de ensaios de macacos planos simples, com o objetivo de comparar os resultados obtidos adotando diferentes técnicas de corte e seguindo as recomendações dadas por diferentes normas. Ronca *et al.* [11] realizaram ensaios de macacos

planos em edifícios de grande altura, de forma a determinar o estado de tensão instalada em diferentes alturas do edifício. Abdunur [12] realizou ensaios com macacos planos semi-circulares de pequenas dimensões. Qinglin e Xiuyi [13] desenvolveram um macaco plano de grande espessura, com grandes capacidades de deformação para uso em alvenarias de materiais moles, tipicamente encontradas na China. Vicente *et al.* [1] realizaram uma série de ensaios de caracterização do comportamento mecânico de alvenarias mais representativas do edificado do Seixal, com recurso a macacos planos, de modo a avaliar o estado de tensão instalado nas paredes, estimar a sua resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Vicente *et al.* [14] efetuaram uma campanha de ensaios de caracterização do comportamento mecânico de alvenarias tradicional de pedra calcária e cal aérea, no centro da Cidade Velha de Coimbra. Andreini *et al.* [15] apresentam uma série de ensaios *in situ* em paredes de alvenaria de pedra, em Volterra (Pisa, Itália). Łatka e Matysek [16] realizaram um conjunto de ensaios de macacos planos simples em alvenaria de tijolo, realizados na “Cracow University of Technology” localizada na Polónia, com o objetivo de comparar a diferença nos resultados utilizando três tipos de macacos planos diferentes. Roque e Lourenço [17] apresentam um conjunto de ensaios de macacos planos simples em alvenaria de pedra irregular (xisto), no centro histórico de Bragança.

2 Procedimento experimental

Para o presente trabalho experimental foi utilizado um murete (M212) proveniente de uma nova série de muretes construídos no DEC FCT NOVA, em 2010, na sequência da tese de doutoramento de Pinho [18]. O murete tem dimensões de $1,20 \times 1,20 \times 0,40$ m³ (largura x altura x espessura) e é constituído por alvenaria ordinária, com 75% de pedra calcária e 25% de argamassa ao traço volumétrico 1:3 (cal aérea e areias, repartidas igualmente por areia de rio e de areeiro). O murete foi construído sobre uma base de betão armado com a mesma secção geométrica que a do murete em planta e com 0,20 m de altura. As resistências à compressão da argamassa (após 90 dias de cura) e da pedra correspondem a 0,65 MPa e 48 MPa, respetivamente.

2.1 Sistema de ensaios de compressão axial

O sistema de ensaios de compressão axial, representado na Figura 2, é constituído por um pórtico metálico formado por dois pilares HEB300 e uma viga HEB450, fixa aos pilares por 8 parafusos

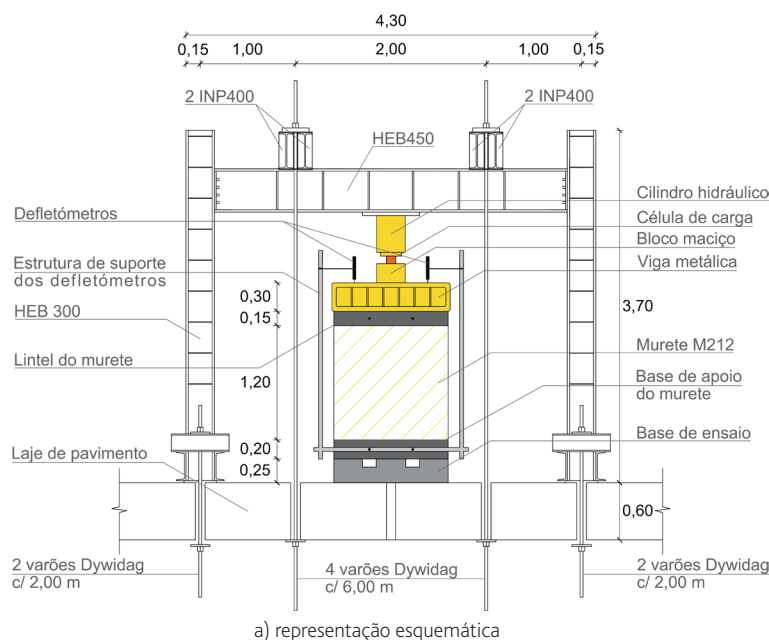


Figura 2 Sistema de ensaio de compressão axial, adaptado de Pinho [18]

M24 em cada extremidade. O pórtico está reforçado por quatro varões roscados de pré-esforço Dywidag, com diâmetro de 36 mm, apertados à laje de pavimento. Este reforço possibilita a atuação do cilindro hidráulico, com uma capacidade de 3000 kN, em condições de segurança [18].

2.2 Ensaio de macacos planos duplo

Iniciou-se o ensaio com a aplicação de uma pré-carga vertical de 0,20 MPa sobre o murete, que na altura se admitiu corresponder aproximadamente a 40% da resistência à compressão do murete. Escolheu-se este valor porque, para este ensaio, não era necessário o murete estar excessivamente carregado, pois a compressão ocorre maioritariamente no troço localizado entre os macacos planos. Após aplicar a pré-carga, fecharam-se as mangueiras hidráulicas para impedir que, durante o ensaio, existisse uma recolha do cilindro hidráulico, resultante dos esforços realizados sobre este durante o aumento da pressão nos macacos planos, simulando desta forma o peso próprio de uma parede de grande altura existente numa situação de ensaio de uma parede *in situ*.

Em seguida foram colados 4 pares de miras metálicas, espaçados 400 mm na vertical e um par também espaçado de 400 mm na horizontal. Realizaram-se dois rasgos distanciados de 50 cm. Porém, ao concluir os rasgos, reparou-se que uma grande parte da alvenaria acima dos rasgos se tinha desagregado, existindo um “grande” espaço vazio, não sendo possível continuar o ensaio. Em consequência, foi necessário realizar uma injeção dos rasgos com calda de cimento.

Um mês após a injeção, voltaram a abrir-se os rasgos (Figura 3a) e foram novamente colocadas miras metálicas no mesmo local

(Figura 3b). Foram medidas as distâncias entre miras utilizando o alongâmetro analógico com base de 400 mm (Figura 3c). Introduziram-se os macacos planos nos rasgos, juntamente com uma chapa metálica sobre o macaco, no caso do rasgo inferior, e por baixo do macaco, no caso do rasgo superior, para garantir a colmatação dos rasgos. Procedeu-se à aplicação de pressão, em incrementos de 1 bar, até se dar a rutura da alvenaria, detetada pela deformação excessiva com reduzido aumento de pressão. Registou-se as respetivas distâncias entre miras metálicas em cada patamar de pressão. De seguida, retirou-se a pré carga inicialmente aplicada e voltou-se a injetar ambos os rasgos com calda de cimento para, 3 dias mais tarde, se realizar sobre o mesmo murete, um ensaio de compressão axial, abordado em detalhe na secção 2.3 [19].

Admitiu-se que todas as áreas dos macacos planos estavam em contacto com a alvenaria durante o ensaio, com a exceção de pequenas áreas visíveis a partir do exterior que nunca entraram em contacto com a alvenaria, estas exceções podem ser observadas na Figura 4a para o rasgo inferior e na Figura 4c para o caso do rasgo superior. Em seguida mediram-se as profundidades, em intervalos de 2 cm, de ambos os rasgos efetuados no murete, permitindo assim calcular as áreas em planta dos rasgos (Figuras 4b e 4d).

Após o cálculo de ambas as áreas, foi possível calcular o coeficiente $k_a = 0,76$, tanto para o macaco plano superior como para o inferior. O coeficiente k_m é de 0,85 e, aplicando a Eq. (1), é possível corrigir os valores de pressão (bar) registados no manómetro.

Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de macacos planos duplos, em forma de um diagrama de tensão deformação. Decidiu-se não considerar as medições do alinhamento número 4 devido às irregularidades de medição em relação aos outros 3 alinhamentos. Não se considerou também o alinhamento

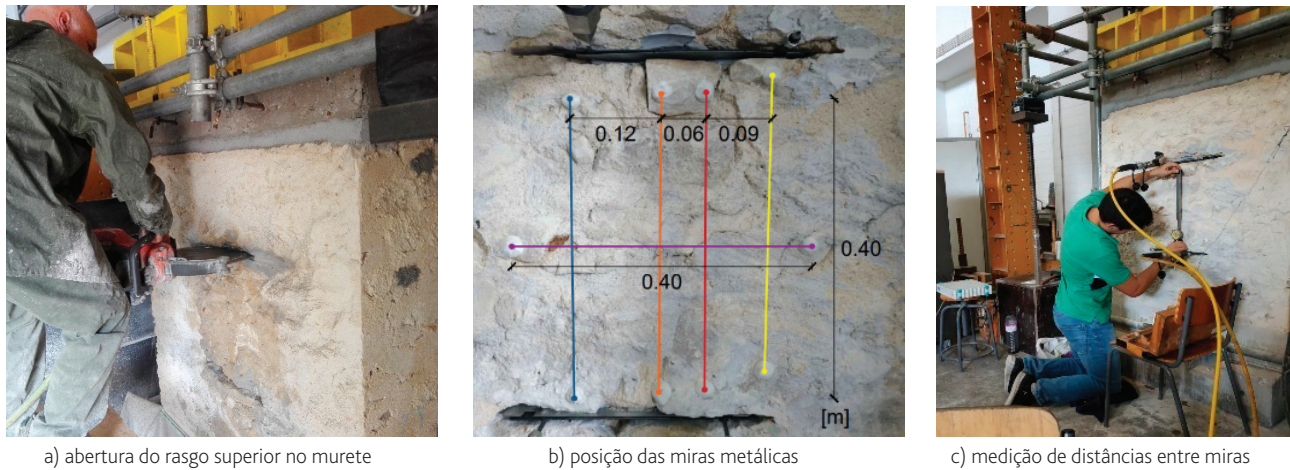


Figura 3 Ensaio de macacos planos duplo

horizontal, porque se considerou que os deslocamentos registados eram bastante elevados. Uma possível razão para este deslocamento, é um desprendimento de uma das pedras em que uma mira metálica estava fixada.

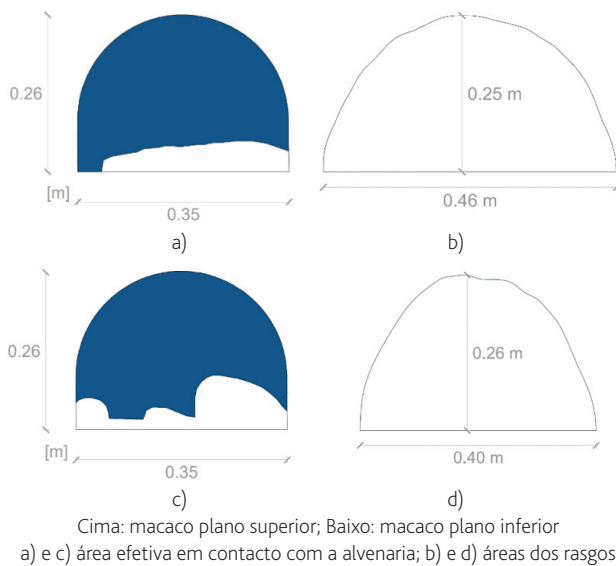


Figura 4 Áreas para o cálculo dos coeficientes k_a do ensaio de macacos planos duplo

Pela análise da Figura 5 é possível observar que o murete atingiu a rutura para uma tensão de $\sigma_{comp} = 0,52$ MPa, segundo os resultados obtidos pelo ensaio de macacos planos duplo, e um módulo de elasticidade, entre 30 e 60% da carga máxima, igual a $E_{30-60\%} = 948,8$ MPa.

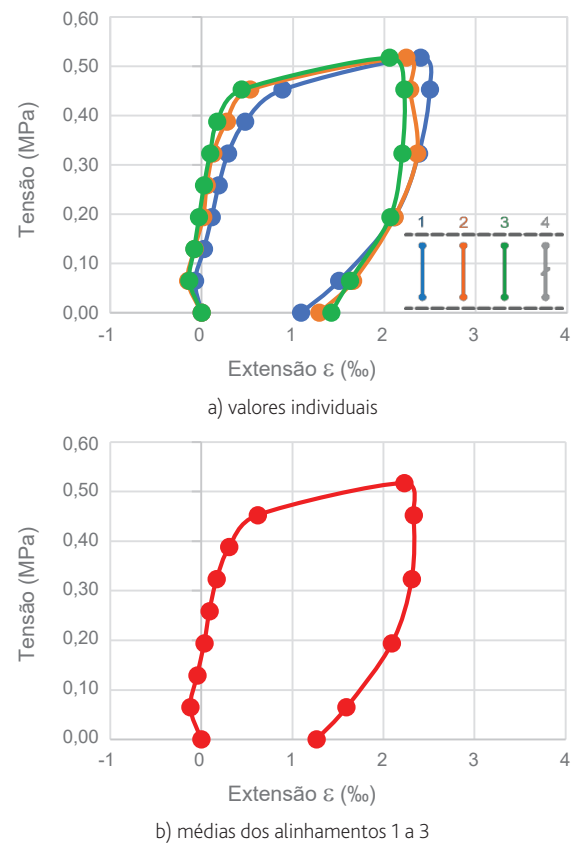


Figura 5 Diagrama de tensão-deformação do ensaio de macacos planos duplo



Figura 6 Evolução do ensaio de compressão axial do murete M212 até à rotura

2.3 Ensaio de compressão axial do murete M212

Terminado o ensaio descrito na secção 2.2 e após a respetiva preparação, iniciou-se o ensaio de compressão axial sobre o murete, aumentando a carga aplicada a uma velocidade de 1 kN/s, até ao colapso do murete, como se pode observar na Figura 6, terminando assim o ensaio.

A análise da carga aplicada sobre o murete, teve em conta o peso da viga metálica (V) e do lintel de betão armado (L) que o sobrepunham. A soma destes pesos totaliza 7,0 kN, que foi adicionado à carga aplicada e registada pela célula de carga (CC).

Na Figura 7 apresenta-se o diagrama conjunto força-deslocamento e tensão-deformação. A rotura ocorreu para uma força aplicada de 261,2 kN, correspondente a $\sigma_{comp} = 0,54$ MPa e um módulo de elasticidade igual a $E_{30-60\%} = 510,9$ MPa.

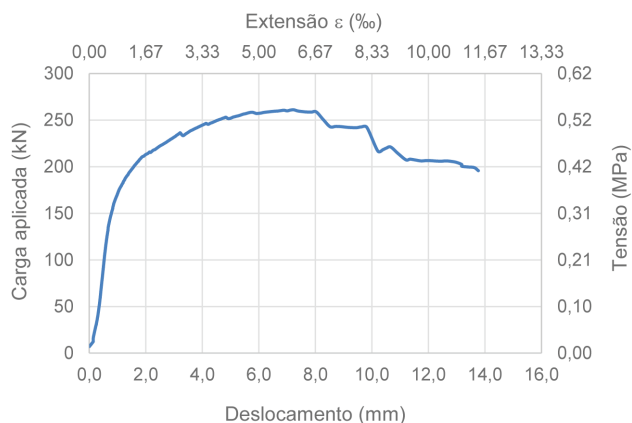


Figura 7 Diagrama conjunto força-deslocamento e tensão-deformação do ensaio de compressão axial do murete M212

3 Análise e discussão de resultados

3.1 Comparação do ensaio de compressão axial com o ensaio de macacos planos duplo do murete M212

Apresenta-se na Figura 8 o diagrama conjunto tensão-deformação do ensaio de compressão axial e de macacos planos duplo do murete M212. Verifica-se que, no ensaio de macacos planos duplo, o murete apresentou uma resistência à compressão de $\sigma_{comp} = 0,52$ MPa e no ensaio de compressão axial de $\sigma_{comp} = 0,54$ MPa.

Estes valores são bastante aproximados, sendo que o valor obtido no ensaio de macacos planos é apenas 3,7% inferior ao valor obtido no ensaio de compressão axial. Verifica-se também que segundo o ensaio de macacos planos duplo, o módulo de elasticidade é igual a $E_{30-60\%} = 948,8$ MPa e, segundo o ensaio de compressão axial, é igual a $E_{30-60\%} = 510,9$ MPa, sendo que o primeiro ensaio apresenta uma diferença de 85,7% em relação ao segundo.

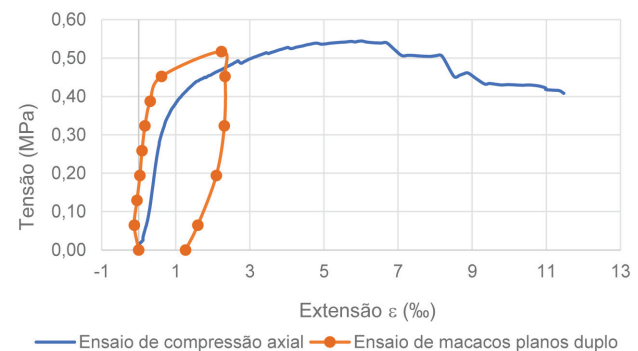


Figura 8 Diagrama conjunto tensão-deformação do ensaio de compressão axial e de macacos planos duplo

Esta diferença é considerável. Estes valores podem dever-se ao facto de a alvenaria ser bastante heterogénea, de se tratar apenas de um ensaio em vez de uma média de ensaios ou também por se ter optado por não realizar o ensaio de macacos planos duplo com ciclos de carga. Vicente *et al.* [14] realizaram 9 ensaios de macacos planos duplos em alvenaria de pedra e também se obtiveram valores para os módulos de elasticidade bastante dispersos. É recomendável acompanhar o ensaio de macacos planos duplo com outros ensaios de caracterização mecânica que permitam obter o módulo de elasticidade da alvenaria, porque este método apresenta algumas limitações nesse aspeto.

4 Conclusões

A comparação do resultado da resistência à compressão do murete M212, dado pelo ensaio de macacos planos duplos e pelo ensaio de compressão axial, revela uma diferença de apenas 3,7%. Este resultado, apesar de “único” (corresponde apenas a um ensaio), permite reforçar a eficácia da técnica de macacos planos duplos na determinação da resistência à compressão. O módulo de elasticidade do ensaio de macacos planos apresenta uma diferença de 85,7% em relação ao módulo de elasticidade do ensaio de compressão axial. Esta diferença é um pouco considerável, podendo dever-se, como referido, ao facto de a alvenaria ser bastante heterogénea, de se tratar apenas de um ensaio em vez de uma média de ensaios ou também por se ter optado por não realizar o ensaio de macacos planos duplo com ciclos de carga.

Conclui-se assim que é recomendável acompanhar o ensaio de macacos planos duplo com outros ensaios de caracterização mecânica que permitam obter o módulo de elasticidade da alvenaria, porque este apresenta algumas limitações nesse aspeto.

Referências

- [1] Vicente, R.; Silva, J.; Varum, H.; Costa, A.; Ferreira, T.; Figueiredo, A.; Rodrigues, H. (2010) – Cadernos de apoio à avaliação do Risco sísmico e de incêndio nos Núcleos Urbanos Antigos do Seixal - Caderno 5: Ensaios in situ: Caracterização Mecânica e Identificação Dinâmica.
- [2] Miranda, L. (2011) – Ensaios acústicos e de macacos planos em alvenarias resistentes. Tese de doutoramento. Universidade do Porto.
- [3] Gregorczyk, P.; Lourenço, P.B. (2000) – A Review on Flat-Jack Testing. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.
- [4] ASTM (2004) – C 1197 - Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the Flatjack Method.
- [5] ASTM (2009) – C 1196 - Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements.
- [6] RILEM (2004) – RILEM Recommendation MDT. D.4: *In-situ* stress tests based on the flat jack.
- [7] RILEM (2004) – RILEM Recommendation MDT. D.5 – *In-situ* stress - strain behaviour tests based on the flat jack.
- [8] Rossi, P. (1982) – Analysis of Mechanical Characteristics of Brick Masonry by Means of non-destructive “in Situ” Tests.
- [9] Binda, L.; Rossi, P.; Landriani, G.; Sacchi, G. (1983) – Diagnostic Analysis of Masonry Buildings. IABSE Symp. Strengthening Build. Struct. Veneza, Itália.
- [10] Noland, J.L.; Atkinson, R.H.; Schuller, M.P. (1990) – A review of the flat-jack method for nondestructive evaluation. Nondestruct. Eval. Civ. Struct. Mater. Boulder, EUA.
- [11] Ronca, P.; Tiraboschi, C.; Binda, L. (1997) – *In-situ* flatjack tests matching new mechanical interpretations. China.
- [12] Abdunur, C. (1983) – Stress and deformability in concrete and masonry. IABSE Symp. Strength. Build. Struct. – Diagn. Ther. Veneza, Itália.
- [13] Qinglin, W.; Xiuyi, W. (1988) – The evaluation of compressive strength of brick masonry in situ. 8th Int. Brick/Block Mas. Conf., Dublin, Irlanda.
- [14] Vicente, R.; Ferreira, T.; Silva, J.; Varum, H. (2015) – *In Situ* Flat-Jack Testing of Traditional Masonry Walls: Case Study of the Old City Center of Coimbra, Portugal. Int. J.A. Herit. 9, 794-810.
- [15] Andreini, M.; Falco, A.; Giresini, L., and Sassu, M. (2014). Mechanical Characterization of Masonry Walls with Chaotic Texture: Procedures and Results of In-Situ Tests. Int. J.A. Herit. 8, 376-407.
- [16] Łątka, D.; Matysek, P. (2017) – The Estimation of Compressive Stress Level in Brick Masonry Using the Flat-jack Method. Procedia Eng. 193, 266-272.
- [17] Roque, J.; Lourenço, P. (2003) – Caracterização Mecânica de Paredes Antigas de Alvenaria. Um Caso de Estudo no Centro Histórico de Bragança.
- [18] Pinho, F. (2007) – Paredes de alvenaria ordinária: estudo experimental com modelos simples e reforçados. Tese de doutoramento. FCT NOVA.
- [19] Fernando, F.; Pinho, S.; Rafael, J.; Serra, G.; André, F.; Saraiva, L.; Válder, J.; Lúcio, G. (2021) – Performance of single and double flat jacks in stone masonry lab tests. JOBE. DOI: 10.1016/j.job.2021.102465

