



André Filipe Legrant Saraiva

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

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

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho,
Professor Auxiliar, FCT NOVA

Co-orientador: Professor Doutor Válder José da Guia Lúcio,
Professor Associado, FCT NOVA

Júri:

Presidente: Doutora Maria Teresa G. Santana,
Professora Auxiliar, FCT NOVA

Arguente: Doutor Carlos M. Chastre Rodrigues,
Professor Associado, FCT NOVA

Vogal: Doutor Válder José da Guia Lúcio,
Professor Associado, FCT NOVA



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho de 2019

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

Copyright © André Filipe Legrant Saraiva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, um muito obrigado ao meu orientador professor Fernando Pinho por toda a ajuda, disponibilidade e prontidão para a resolução de problemas em conjunto. Agradeço também toda a paciência durante o meu percurso. Ao professor Válder Lúcio, obrigado pela disponibilidade para ajudar, pelo empréstimo de material e prontidão de resposta sempre que o contactava. A ambos um grande agradecimento pela orientação e partilha de conhecimentos.

O meu agradecimento ao Jorge Silvério e ao Senhor José Gaspar, técnicos do laboratório de estruturas do DEC, por toda a ajuda durante a realização dos ensaios.

Igualmente agradeço ao Engenheiro Vítor Silva, por toda a experiência e conhecimentos partilhados, assim como o tempo disponibilizado.

Um obrigado em particular para o meu colega Rafael Serra que foi o meu parceiro de laboratório durante todo o semestre e me ajudou na preparação e realização de todos os ensaios laboratoriais.

Um especial agradecimento à Helisa Muhaj e ao Brisid Isufi por toda a disponibilidade e prontidão para auxiliar com a programação dos equipamentos laboratoriais.

Um enorme agradecimento à empresa Oz, em particular ao Engenheiro Carlos Mesquita e Engenheiro João Pires, por toda a ajuda e material disponibilizado, sem a vossa ajuda, a realização dos ensaios de macacos planos não teria sido possível.

Obrigado a todos os meus colegas e amigos pelos bons momentos passados e todo o suporte, durante este percurso.

Um obrigado especial à minha namorada Alina que esteve ao meu lado durante todo este percurso e testemunhou todos os altos e baixos do meu percurso universitário, mantendo-se a meu lado e fazer-me sorrir quando preciso. Obrigado!

Por último, mas não menos importante, um grande obrigado aos meus pais pelo apoio incondicional e me proporcionarem esta oportunidade de estudar numa universidade.

Resumo

Em projetos de reabilitação e reforço de edifícios antigos de alvenaria surge muitas vezes a necessidade de caracterizar mecanicamente os elementos estruturais - resistência mecânica e rigidez - dos elementos (paredes) resistentes, em fase de inspeção e diagnóstico das anomalias existentes. Em geral, esta avaliação é limitada pelo reduzido número de ensaios/equipamentos e técnicas que podem ser realizados, para além da utilização de valores tabelados obtidos em documentação técnica, os quais consistem essencialmente na utilização de macacos planos duplos in-situ ou ensaios de amostras de dimensões adequadas em laboratório.

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 trabalho apresentam-se: (1) os resultados de ensaios de macacos planos, realizados num modelo experimental de alvenaria de pedra tradicional com dimensões de 1,20x1,20x0,40 m³; (2) o resultado do ensaio de compressão axial do modelo experimental num sistema de ensaios preparado para o efeito e a profundidade de carbonatação da alvenaria; (3) a comparação dos resultados da resistência mecânica do modelo, obtidos através do ensaio de macacos planos duplo e o ensaio de compressão axial. É também realizada uma discussão de resultados, onde estes são comparados com os de outros autores e são apresentadas as principais conclusões.

Palavras-chave: ensaios de macacos planos, alvenaria de pedra, propriedades mecânicas.

Abstract

In rehabilitation and strengthening projects of ancient masonry buildings there is often a need to mechanically characterize the structural elements – strength and stiffness – of the resistant elements (walls), in a diagnosis and inspection phase of the existing anomalies. In general, this evaluation is limited to a small number of tests/equipment and techniques that can be performed, beyond the use of tabulated values obtained in technical documentation, which consist essentially on the use of in-situ flat jack testing or sample testes with adequate dimensions in a laboratory.

Flat jack tests weren't 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.

In this dissertation is presented: (1) the results of flat jack tests, performed in an experimental model of traditional stone masonry with dimensions of 1,20x1,20x0,40 m³; (2) the axial compression test result of the experimental model in a teste system prepared for the purpose and the carbonation depth; (3) the result comparison of the model's compression strength, obtained through the double flat jack test and the axial compression test. The results are discussed and compared with the ones of other authors and the main conclusions are presented.

Keywords: flat-jack testing, natural stone masonry, mechanical properties.

Índice

Capítulo 1 - Introdução

1.1	Enquadramento geral.....	1
1.2	Motivação e objetivos.....	2
1.3	Estrutura e organização da dissertação.....	2

Capítulo 2 - Enquadramento do tema

2.1	Considerações iniciais.....	5
2.2	Evolução da técnica de macacos planos.....	5
2.3	Ensaio de macacos planos.....	7
2.3.1	Princípios e condicionantes de ensaio.....	7
2.3.2	Constituição dos macacos planos.....	8
2.3.3	Equipamento utilizado.....	8
2.3.4	Descrição geral do ensaio de macacos planos simples.....	10
2.3.5	Descrição geral do ensaio de macacos planos duplo.....	11
2.3.6	Estimativa do módulo de elasticidade.....	12
2.4	Normalização.....	13
2.5	Carbonatação.....	15

2.6	Trabalhos de investigação de outros autores	15
2.6.1	Ensaio in situ: Caracterização mecânica e identificação dinâmica	16
2.6.2	In Situ Flat-Jack Testing of Traditional Masonry Walls: Case Study of the Old City Center of Coimbra, Portugal	18
2.6.3	Mechanical Characterization of Masonry Walls with Chaotic Texture: Procedures and Results of In Situ Tests	21
2.6.4	The estimation of compressive stress level in brick masonry using the flat-jack method.	23
2.6.5	A Review on Flat-Jack Testing	24
2.6.6	Caracterização Mecânica de Paredes Antigas de Alvenaria. Um Caso de Estudo no Centro Histórico de Bragança	25
2.6.7	Rubble Stone Masonry Walls in Portugal Material Properties, Carbonation Depth and Mechanical Characterization	27
2.6.8	Ligação parede/pavimento com pregagens para reabilitação de edifícios antigos.	29

Capítulo 3 - Trabalho experimental

3.1	Considerações iniciais	31
3.2	Procedimento experimental	31
3.2.1	Sistema de ensaio de compressão axial	32
3.3	Ensaio de macacos planos	35
3.3.1	Ensaio de macacos planos simples	35
3.3.2	Ensaio de macacos planos duplo	39
3.4	Ensaio de compressão axial do murete M212	43
3.5	Caracterização da calda de cimento	44
3.6	Determinação da profundidade de carbonatação	46

Capítulo 4 - Análise e discussão de resultados

4.1	Considerações iniciais.....	47
4.2	Ensaio de macacos planos simples	47
4.3	Ensaio de macacos planos duplo.....	49
4.4	Ensaio de compressão axial do murete M212	50
4.5	Profundidade de carbonatação	54
4.6	Comparação do ensaio de compressão axial com o ensaio de macacos planos duplo do murete M212.....	55

Capítulo 5 - Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1	Considerações iniciais.....	57
5.2	Conclusões.....	57
5.3	Desenvolvimentos futuros	58

Referências bibliográficas.....	61
--	-----------

Anexos.....	65
--------------------	-----------

Anexo I.....	67
---------------------	-----------

Anexo II.....	68
----------------------	-----------

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Ensaio de macacos planos realizados pela empresa Oz	2
Figura 2.1 - Aspeto geral dos ensaios de macacos plano realizados por P. Rossi	6
Figura 2.2 - Diferentes formas geométricas de macacos planos, adaptado de	8
Figura 2.3 - Equipamentos utilizados nos ensaios de macacos planos	9
Figura 2.4 - Fases do ensaio simples	10
Figura 2.5 - Fases do ensaio duplo	12
Figura 2.6 - Configuração geral dos ensaios de macacos planos	17
Figura 2.7 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de macacos planos duplos	17
Figura 2.8 - Configuração geral do ensaio de macacos planos duplo	19
Figura 2.9 – Curvas tensão-deformação dos ensaios duplos (ensaio 1 a 9)	20
Figura 2.10 – Ensaio de macacos planos duplos	22
Figura 2.11 – Configuração do ensaio	23
Figura 2.12 - Comparação dos dois tipos de corte	24
Figura 2.13 - Configuração dos ensaios de macacos planos	26
Figura 2.14 - Ensaio de muretes de referência	28

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

Figura 2.15 - Ensaio de compressão axial dos muretes	30
Figura 3.1 - Colocação do lintel de betão armado	32
Figura 3.2 – Localização de alguns equipamentos de ensaio	33
Figura 3.3 – Bomba hidráulica e suporte informático.....	33
Figura 3.4 – Sistema de ensaio de compressão axial	34
Figura 3.5 - Ensaio de macacos planos simples.....	35
Figura 3.6 - Injeção do rasgo com calda de cimento	36
Figura 3.7 - Ensaio de macacos planos simples.....	37
Figura 3.8 - Áreas para o cálculo do coeficiente k_a no ensaio de macacos planos simples	38
Figura 3.9 - Diagrama de Deslocamento-Tensão do ensaio de macacos planos simples.....	39
Figura 3.10 - Ensaio de macacos planos duplo	41
Figura 3.11 – Áreas para o cálculo do k_a para o rasgo superior do ensaio de macacos planos duplo	41
Figura 3.12 - Diagrama de tensão-deformação do ensaio de macacos planos duplo	42
Figura 3.13 – Evolução do ensaio de compressão axial do murete M212	43
Figura 3.14 - História de carga e deslocamentos verticais do ensaio de compressão axial do murete M212	43
Figura 3.15 - Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão axial do murete M212	44
Figura 3.16 - Ensaio mecânicos realizados nos provetes de calda de cimento	45
Figura 3.17 - Determinação da profundidade de carbonatação	46
Figura 4.1 - Diagrama tensão-deformação dos valores médios do ensaio de macacos planos duplo do murete M212	49
Figura 4.2 – Diagrama conjunto força-deslocamento e tensão-deformação do ensaio de compressão axial do murete M212	50

Figura 4.3 - Resultados da resistência à compressão dos muretes na presente linha de investigação.....	51
Figura 4.4 - Comparação de resultados entre o murete M212 e os muretes simples da primeira série construtiva de muretes	52
Figura 4.5 - Diagrama da evolução da resistência à compressão com o rácio de carbonatação (Ca/A) da argamassa de cal aérea	53
Figura 4.6 - Diagrama de evolução da profundidade de carbonatação do murete ao longo do tempo.....	54
Figura 4.7 – Diagrama conjunto tensão-deformação do ensaio de compressão axial e de macacos planos duplo.....	55

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Comparação de alguns aspetos das normas ASTM e RILEM	14
Tabela 2.2 - Trabalhos científicos de outros autores	16
Tabela 2.3 - Principais resultados dos ensaios.....	18
Tabela 2.4 - Comparação entre tensões estimadas e medidas dos 9 ensaios	19
Tabela 2.5 - Resultados dos ensaios de macacos planos.....	21
Tabela 2.6 - Comparação de resultado dos ensaios	24
Tabela 2.7 - Resultados dos ensaios de macacos planos simples	25
Tabela 2.8 - Resumo dos resultados dos ensaios de macacos planos.....	27
Tabela 2.9 - Resultados dos ensaios de compressão axial dos muretes simples	28
Tabela 3.1 - Cálculo do coeficiente k_a para o ensaio de macacos planos simples	38
Tabela 3.2 - Cálculo do coeficiente k_a para o ensaio de macacos planos duplo.....	42
Tabela 3.3 - Profundidade de carbonatação do murete M212	46
Tabela 4.1 - Comparação das tensões obtidas nos ensaios de macacos planos simples com as tensões instaladas.....	48
Tabela 4.2 - Comparação de módulos de elasticidade.....	55

Simbologia

$\delta_{V^{Fm\acute{a}x}}$	deslocamento para a força máxima atingida;
$\sigma^{m\acute{a}x}$ e σ_{comp}	resistência à compressão;
σ_m	tensão (corrigida com os coeficientes, k_m e k_a);
σ_t	resistência à tração;
$\varepsilon_{V^{Fm\acute{a}x}}$	extensão para a força máxima atingida;
A	comprimento do macaco plano / área da secção de alvenaria / área da secção do provete sujeita a compressão;
B	largura do macaco plano;
b	largura da secção transversal do provete;
Ca	área da secção de alvenaria carbonatada;
Cd	profundidade de carbonatação, medida do exterior para o interior do murete;
d_{ref}	distância na vertical entre os pontos de referência no ensaio simples;
e_{folhas}	espessura das folhas de aço constituintes do macaco plano;
E_0	módulo de elasticidade secante;
$E_{30-60\%}$	módulo de elasticidade entre 30 e 60% da carga máxima;
E_{mac}	espaçamento (medido na vertical) entre os macacos no ensaio duplo;

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

f_k	valor característico da resistência à compressão;
$F_{máx}$	força máxima atingida;
F_{comp}	carga última de compressão aplicada no provete;
H_{alv}	altura de uma unidade de alvenaria;
H	altura da secção transversal do provete;
I	momento de inércia;
k_a	coeficiente (adimensional) que traduz a relação entre a área de contacto efetiva do macaco plano e a área do corte;
k_m	coeficiente (adimensional) que reflete a rigidez do macaco plano e o atrito do sistema hidráulico;
L	distância entre os dois apoios do provete (100 mm);
L_{alv}	comprimento de uma unidade de alvenaria;
M	momento fletor;
N	carga máxima de flexão aplicada no provete;
P_{alv}	espessura de uma unidade de alvenaria;
p	pressão, medida no manómetro;
$S_{alongâmetro}$	sensibilidade do alongâmetro;
t	tempo;
ν	coeficiente de Poisson;
v	distância da linha neutra à fibra mais tracionada do provete.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento geral

Atualmente, a construção que predomina em Portugal são as estruturas de betão armado, técnica predominante desde o início do séc. XX. De acordo com o INE (2013), uma grande porção dos edifícios em Portugal são considerados estruturas antigas, contemplando as paredes de pedra ordinária, estrutura analisada nesta dissertação, estas são predominantes nos centros históricos e urbanos das cidades. As estruturas de muitas dessas construções vão-se degradando ao longo dos anos, decorrente do envelhecimento próprio, da sobrecarga de usos ou ainda da incapacidade das construções para acompanhar a evolução das condições de vida humana (Rosa, 2013).

A reabilitação de edifícios é um setor em rápido desenvolvimento com o objetivo de preservar e proteger o edificado histórico. De maneira a escolher as soluções de reabilitação mais adequadas na altura da reabilitação de um edifício, é necessário fazer uma caracterização dos materiais e elementos construtivos nele existentes, não só para evitar a adoção de soluções demasiado intrusivas ou até incompatíveis com as pré-existentes, mas para obter o melhor desempenho possível (Vicente, 2008).

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 aparecimento dos ensaios de macacos planos, que não só são uma solução bastante menos intrusiva, como permite, in-situ, determinar a tensão instalada no local e a resistência mecânica à compressão da alvenaria, bem como as suas características de deformabilidade (Miranda, 2011).

Desta maneira, no trabalho experimental da presente dissertação irá explorar-se o uso da técnica de macacos planos em alvenarias de pedra ordinária.

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

Para uma melhor compreensão do uso da técnica de macacos planos, no âmbito desta dissertação, foram assistidos ensaios de macacos planos realizados pela empresa Oz - Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda. Apresentam-se na Figura 1.1 fotografias tiradas durante estes ensaios.



Figura 1.1 - Ensaios de macacos planos realizados pela empresa Oz

1.2 Motivação e objetivos

Na presente dissertação recorre-se à utilização da técnica macacos planos duplos para determinar a resistência mecânica e a rigidez num modelo experimental de alvenaria de pedra tradicional, construído no DEC FCT UNL e comparar os valores assim obtidos com os obtidos no ensaio de compressão axial do mesmo modelo. É também realizado um ensaio de macacos planos simples para determinação da tensão instalada sobre o murete e é determinada a profundidade de carbonatação após o ensaio de compressão axial. Alguns resultados são comparados com os de outros autores.

1.3 Estrutura e organização da dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos, incluindo o presente, organizados da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução, onde se introduz o tema do trabalho e se apresentam as motivações e objetivos da sua realização bem como a organização da presente dissertação.

Capítulo 2 – Enquadramento do tema, em que se explica a evolução da técnica de macacos planos, como funciona, os princípios e condicionantes a ela associados, o equipamento necessário, o procedimento de ensaio e cálculos associados. Aborda-se a normalização existente relativa aos ensaios de macacos planos. Explica-se resumidamente o conceito de carbonatação e são apresentados trabalhos de investigação de outros autores.

Capítulo 3 – Trabalho experimental, onde se descreve todo o trabalho experimental realizado no âmbito da presente dissertação, nomeadamente a preparação do murete e a descrição dos ensaios de macacos planos e de compressão axial.

Capítulo 4 – Análise e discussão de resultados, em que se analisam todos os resultados obtidos nos ensaios realizados. Posteriormente, os resultados são comparados com outros resultados da presente linha de investigação e a de outros autores.

Capítulo 5 – Conclusões e desenvolvimentos futuros, onde se realiza uma síntese global do trabalho realizado, apresentam-se as principais conclusões e mencionam-se algumas sugestões para a continuidade desta investigação.

Capítulo 2

Enquadramento do tema

2.1 Considerações iniciais

O presente capítulo enquadra o tema da dissertação e introduz noções necessárias para a compreensão deste documento. Primeiramente, na secção 2.2 é apresentada a evolução da técnica de macacos planos ao longo dos anos. Na secção 2.3 é explicado como funciona a técnica de macacos planos, os princípios e condicionantes a ela associados, o equipamento necessário, o procedimento de ensaio e cálculos associados. A secção 2.4 aborda a normalização existente relativa aos ensaios de macacos planos. Na secção 2.5 explica-se resumidamente o conceito de carbonatação e na secção 2.6 são apresentados trabalhos de investigação de outros autores.

2.2 Evolução da técnica de macacos planos

A técnica de macacos planos utilizada atualmente, advém da evolução de um ensaio proveniente da mecânica das rochas. Este ensaio caracterizava-se negativamente pela morosidade do seu procedimento e pela elevada perturbação do terreno envolvente ao local de ensaio, de tal maneira que se começou a duvidar da fiabilidade do ensaio (Miranda, 2011).

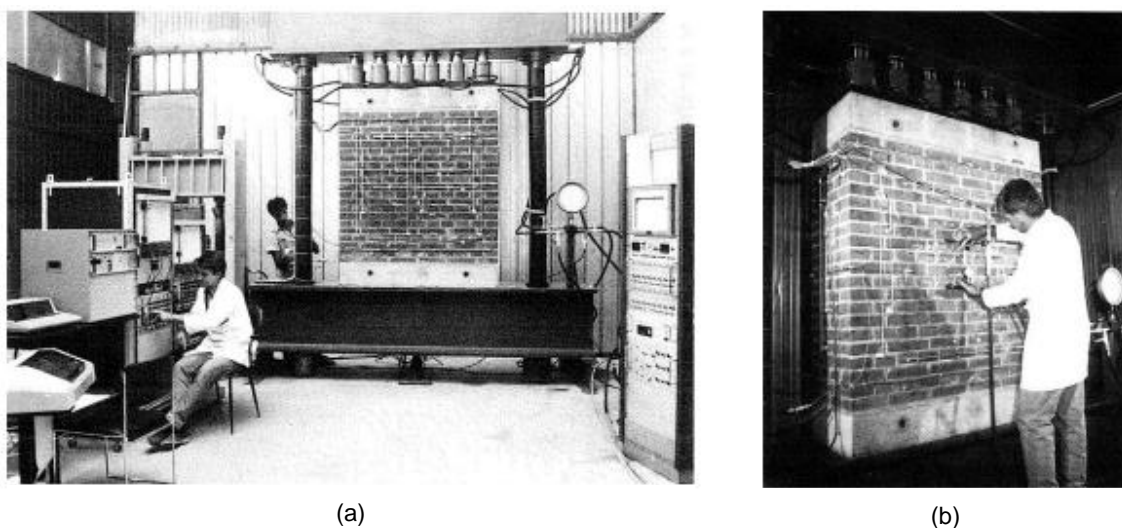
No final da década de 1960 o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) alterou a forma geométrica do macaco plano, até então retangular, passou a ser semi-circular de forma a ajustar-se ao corte efetuado por uma serra circular (LNEC, 1970). Esta alteração provocou bastantes melhorias na execução do ensaio e no tempo despendido para o realizar.

Em 1980, Paolo Rossi apresentou uma publicação de um trabalho onde, pela primeira vez, utilizava a técnica de macacos em alvenarias (Rossi, 1982). Rossi apresenta um trabalho numa conferência internacional, em 1985, onde realiza ensaios laboratoriais em paredes de alvenaria

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

de tijolo, revelando uma preferência da aplicação da técnica neste tipo de alvenaria (Rossi, 1985).

Foi Rossi que apresentou as duas variantes do ensaio com macacos planos, utilizadas atualmente, o ensaio simples e o ensaio duplo (Rossi, 1982). O ensaio simples permite determinar a tensão instalada na alvenaria e utiliza um macaco plano. O ensaio duplo permite determinar o módulo de elasticidade, a resistência mecânica à compressão e o coeficiente de Poisson, através da medição de deslocamentos horizontais. Este ensaio utiliza dois macacos planos que confinam um troço de alvenaria que é sujeito a compressão simples. Estas variantes são descritas em detalhe nas secções 2.3.4 e 2.3.5. Na Figura 2.1 é possível observar o aspeto geral dos ensaios de laboratório realizados por Rossi.



(a)

(b)

(a) ensaio simples; (b) ensaio duplo

Figura 2.1 - Aspeto geral dos ensaios de macacos plano realizados por P. Rossi (Rossi, 1985)

Após as descobertas de Rossi, a técnica tem sido investigada por diversos autores, um pouco por todo o mundo. Ronca et al. (1997) realizaram ensaios de macacos planos em edifícios de grande altura, de forma a determinar o estado de tensão instalada em diferentes alturas do edifício. Binda et al. (1983) estudaram a influência das diferentes dimensões de macacos planos nos resultados dos ensaios. Noland et al. (1990) realizaram ensaios de macacos planos em paredes antigas de alvenaria de tijolo, nos Estados Unidos da América. Abdunur (1983) realizou ensaios com macacos planos semi-circulares de pequenas dimensões. Qinglin e Xiuyi (1988) desenvolveram um macaco plano de grande espessura, com grandes capacidades de deformação para uso em alvenarias de materiais moles, tipicamente encontradas na China.

2.3 Ensaios de macacos planos

Na presente secção explica-se como funciona a técnica de macacos planos, os princípios e condicionantes a ela associados, o equipamento necessário, o procedimento de ensaio e cálculos associados.

2.3.1 Princípios e condicionantes de ensaio

Associados aos ensaios de macacos planos, encontram-se alguns princípios e condicionantes. Na realização dos ensaios abordados na secção 3.3 considerou-se as seguintes premissas, apresentadas por Rufo (2010):

- O estado de tensão inicial instalado nas paredes de alvenaria é de compressão e é uniforme ao longo da sua espessura;
- A alvenaria na envolvente dos cortes é homogénea;
- A alvenaria deforma-se simetricamente em relação ao rasgo;
- A tensão aplicada pelos macacos planos sobre a alvenaria é considerada uniforme;

Como condicionantes que poderão provocar algumas incertezas nos resultados tem-se:

- Reduzida confiança nos resultados dos ensaios simples para valores de carga muito reduzidos, dados pequenos níveis de deformações impostas;
- Cargas insuficientes sobre a zona da parede em ensaio, provocando condições de reação insuficientes à pressão mínima introduzida pelo macaco plano;
- Dificuldade na interpretação dos resultados em situações de alvenarias muito heterogéneas, com materiais muito fracos e soltos;
- As tensões registadas podem não ser as realmente instaladas devido à heterogeneidade das alvenarias;
- Registo da área de carregamento efetivo dos macacos planos, durante o ensaio;
- Planeza, espessura e paralelismo dos cortes.

Chama-se à atenção da importância de conseguir estimar a área de contacto efetiva entre o macaco plano e a alvenaria (Vicente et al., 2010). Deste modo, utilizou-se um método para estimar a área efetiva de contacto nos ensaios de macacos planos, apresentados na secção 3.3, que consiste na interposição de uma folha de papel químico, envolvida por duas folhas de papel branco, entre o macaco plano e a área de corte na parede, estimando-se assim a área efetiva de contacto entre o macaco plano e a alvenaria. Este método já foi utilizado anteriormente por diversos autores, incluindo os seguintes trabalhos, Vicente et al. (2010),

Vicente et al. (2015), Lourenço e Gregorczyk (2000), Roque e Lourenço (2003), abordados na secção 2.6.

2.3.2 Constituição dos macacos planos

Os macacos planos são tipicamente constituídos por aço inoxidável ou alumínio e são soldados ao longo das bordas. Estes têm normalmente, dois orifícios que permitem a saída de ar do macaco plano, injetando óleo por um orifício enquanto o outro está aberto. A espessura, tipicamente varia entre 1 e 6 mm. A forma geométrica do macaco plano depende do equipamento utilizado para criar o rasgo, na Figura 2.2 é possível observar as formas geométricas mais comuns dos macacos planos. As dimensões podem variar desde alguns centímetros até mais de um metro de comprimento, mais típico na mecânica das rochas (Lourenço e Gregorczyk, 2000).

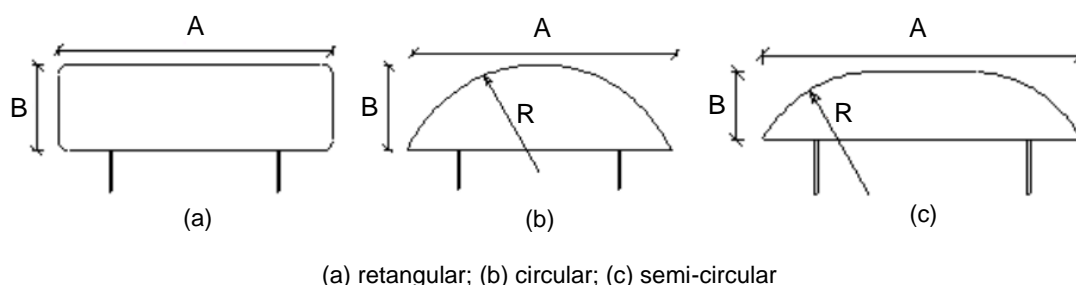


Figura 2.2 - Diferentes formas geométricas de macacos planos, adaptado de (Miranda, 2011)

Os macacos planos utilizados nos ensaios realizados na secção 3.3 do presente trabalho, cumprem as normas ASTM (2004) e ASTM (2009) aplicável e as recomendações das normas RILEM (2004a) e RILEM (2004b), abordadas em detalhe na secção 2.4. Estes são em alumínio e apresentam uma configuração semi-circular, com dimensões de 350x260x3 mm³ (ver Figura 2.3a).

2.3.3 Equipamento utilizado

Para a realização dos ensaios de macacos planos simples e duplos, descritos em detalhe nas secções 3.3.1 e 3.3.2 respetivamente, utilizaram-se os seguintes equipamentos, ilustrados na Figura 2.3:

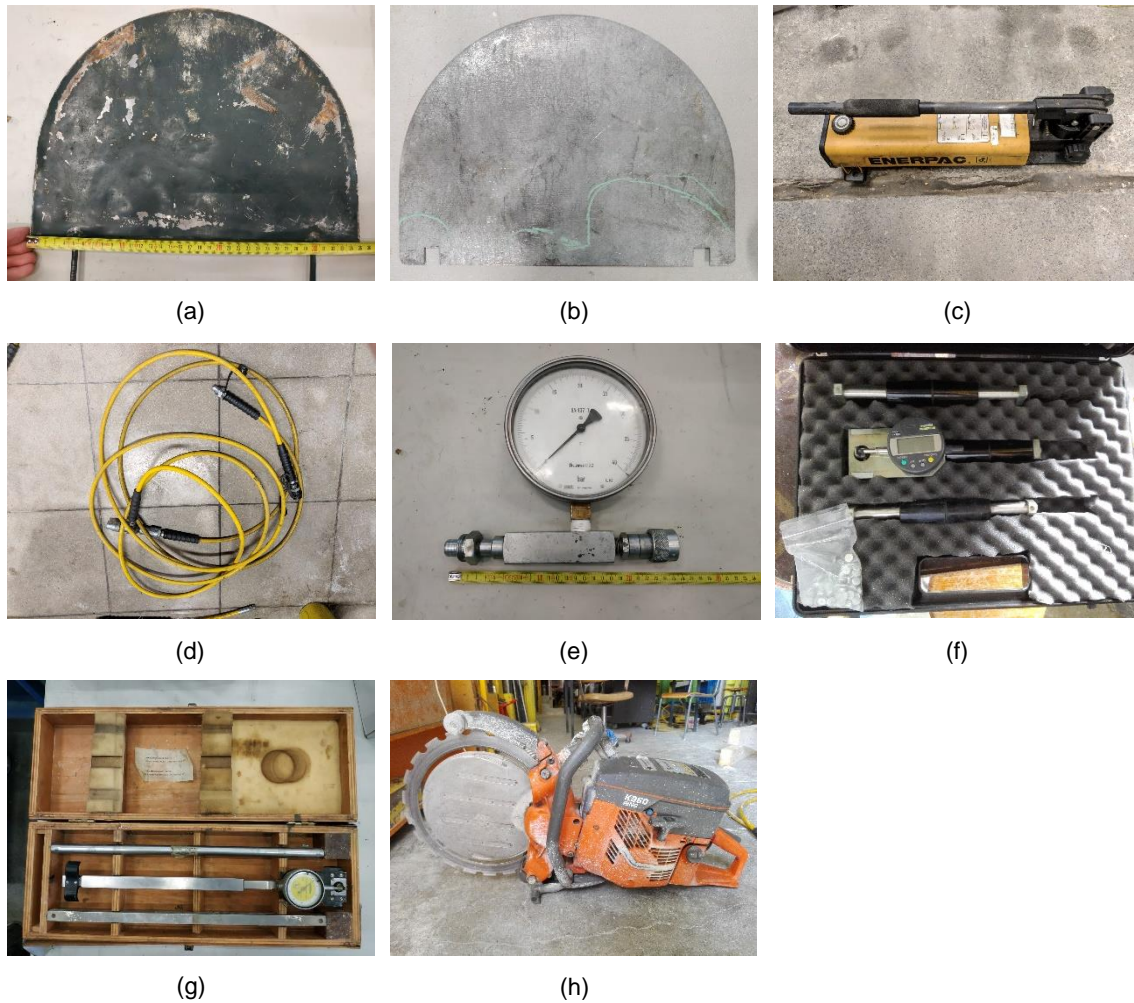


Figura 2.3 - Equipamentos utilizados nos ensaios de macacos planos

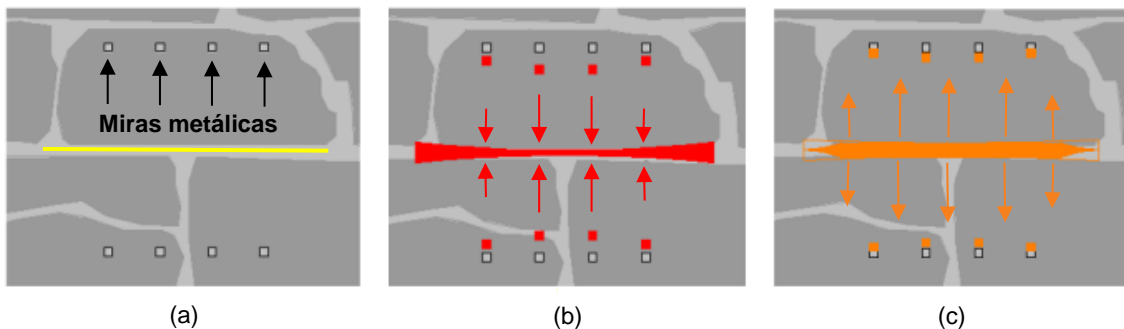
- Macacos planos semicirculares idênticos (a);
- Chapas metálicas com dimensões idênticas aos macacos planos (b);
- Bomba hidráulica ENERPAC (c);
- Mangueiras hidráulicas (d);
- Manómetro analógico de 40 Bar (e);
- Alongâmetro digital com base de 200 mm e precisão de 0,001 mm (f);
- Alongâmetro analógico com base de 400 mm e precisão de 0,002 mm (g);
- Miras metálicas, usadas em conjunto com os alongâmetros;
- Serra de disco HUSQVARNA K960 Ring (h).

Utilizou-se também equipamento adicional pertencente ao sistema de ensaio de compressão axial, detalhado na secção 3.2.1.

2.3.4 Descrição geral do ensaio de macacos planos simples

O ensaio de macacos planos simples pode ser resumido em três fases que se ilustram na Figura 2.4 e se descrevem de seguida (Miranda, 2011):

- 1) Colocação de 4 alinhamentos verticais de miras metálicas a intercetar a zona de corte e registo das distâncias iniciais entre as duas miras de cada alinhamento vertical (a);
- 2) Realização do corte na alvenaria, que provoca a libertação do estado de tensão, levando o rasgo a fechar-se ligeiramente, voltando a medir-se as distâncias entre alinhamentos verticais (b);
- 3) Inserção do macaco plano no rasgo e ligação do sistema de pressurização, inicia-se o aumento de pressão em incrementos previamente definidos, medindo-se as distâncias entre alinhamentos em cada patamar, até se restabelecer a distância inicialmente medida entre alinhamentos (c).



(a) antes do corte; (b) depois do corte; (c) durante a aplicação de pressão no macaco plano

Figura 2.4 - Fases do ensaio simples, adaptado de (Miranda, 2011)

A pressão registada no manómetro da bomba hidráulica, não corresponde à realmente aplicada sobre a alvenaria, durante o ensaio. Este valor necessita de ser corrigido de forma a ter 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 (Miranda, 2011).

Para o cálculo do valor da tensão (σ_m) realmente exercida sobre a alvenaria, utiliza-se a expressão 2.1 (ASTM, 2004).

$$\sigma_m = k_m \times k_a \times p \quad 2.1$$

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, 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 calibração destes, determinando um novo fator k_m , sendo o procedimento descrito em detalhe na norma ASTM (2004).

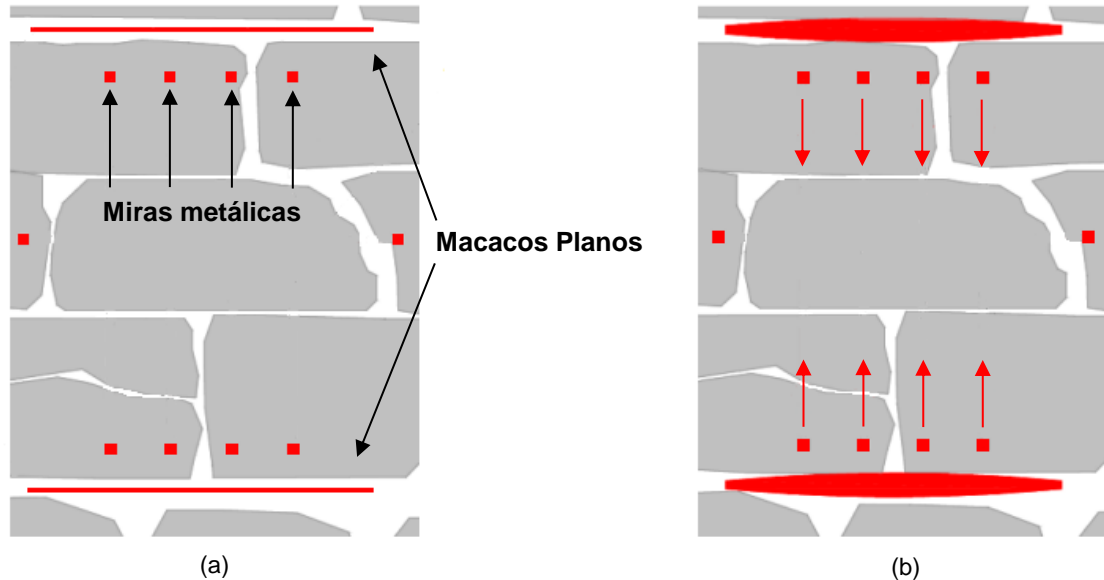
2.3.5 Descrição geral do ensaio de macacos planos duplo

O ensaio de macacos planos duplo é normalmente antecedido pelo ensaio simples, reaproveitando o corte previamente executado, sendo que se esse corte não estiver já realizado é necessário fazê-lo. O procedimento a seguir para o ensaio duplo está ilustrado na Figura 2.5 e é descrito em seguida (Vicente et al., 2010):

- 1) Executa-se um segundo rasgo, paralelo ao primeiro e respeitando as distâncias normativas (secção 2.4);
- 2) Insere-se os macacos planos em ambos os rasgos e colocam-se os aparelhos de medição de deslocamentos (miras metálicas, LVDT'S, potenciómetros, etc.) no troço entre os macacos planos, tipicamente 4 alinhamentos verticais e 1 horizontal (a);
- 3) Ligam-se os macacos planos ao sistema de pressurização e 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 (b);

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

- 4) O ensaio 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.



(a) situação inicial; (b) situação durante a aplicação de pressão no macaco plano

Figura 2.5 - Fases do ensaio duplo, adaptado de (Miranda, 2011)

O ensaio de macacos planos duplo, consiste num ensaio de compressão simples de um troço confinado da alvenaria. Tal como um ensaio de compressão axial convencional de um murete, permite estimar a resistência à compressão e módulo de elasticidade de uma alvenaria (Vicente et al., 2010).

2.3.6 Estimativa do módulo de elasticidade

É possível calcular o módulo de elasticidade médio da alvenaria, através da análise do declive das curvas tensão-deformação médias dos alinhamentos dos ensaios de macacos planos duplos.

A tensão é estimada da mesma maneira que no ensaio simples, através da expressão 2.1. O cálculo da extensão é estimado através da expressão 2.2:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad 2.2$$

Em que:

ε extensão média estimada;

L_f distância final medida entre alinhamentos de miras metálicas (mm);

L_i distância inicial medida entre pontos de controlo (mm).

2.4 Normalização

O organismo norte americano American Society for Testing Materials (ASTM) desenvolveu duas normas relativas à realização de ensaios de macacos planos, uma para ensaios de macacos planos simples e outra para macacos planos duplos, aprovadas em 1991 e posteriormente atualizadas, que são as seguintes:

- Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements (ASTM, 2009)
- Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the Flatjack Method (ASTM, 2004)

A nível europeu, a Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages (RILEM), desenvolveu também duas normas semelhantes às anteriores, aprovadas em 1990 e posteriormente atualizadas, que são as seguintes:

- RILEM Recommendation MDT. D. 4: In-situ stress tests based on the flat jack (RILEM, 2004a)
- RILEM Recommendation MDT. D.5 – In-situ stress - strain behaviour tests based on the flat jack (RILEM, 2004b)

As normas impõem várias restrições para os ensaios de macacos planos, principalmente em referência a distâncias mínimas e máximas, provocando dificuldades para certos tipos de alvenaria, seguir as recomendações, como será exemplificado com trabalhos de outros autores, na secção 2.6. No entanto, as normas admitem que os resultados dos ensaios de macacos planos possam admitir erros de até 20% no caso do ensaio simples (ASTM, 2009) e uma sobrestimativa do módulo de elasticidade até 10%, no caso dos ensaios de macacos planos duplos, segundo a norma RILEM (2004b) e segundo a norma ASTM (2004), 15% (Miranda, 2011).

Na Tabela 2.1 são comparadas as exigências normativas das normas ASTM e RILEM e a coluna “Verificação”, representa que essas exigências foram cumpridas no âmbito desta

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

dissertação, nomeadamente nos ensaios realizados na secção 3.3. Considerou-se que, quando um parâmetro tem mais que uma exigência, a norma era respeitada quando pelo menos uma das recomendações era cumprida.

Tabela 2.1 - Comparação de alguns aspetos das normas ASTM e RILEM, adaptado de (Miranda, 2011)

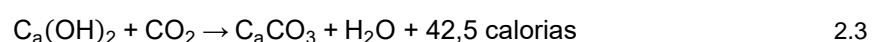
Parâmetro	ASTM	RILEM	Verificação	
			ASTM	RILEM
A	$A \geq L_{alv}$ $A \geq 200$ mm	$A \geq 1.5 L_{alv}$ (se $L_{alv} > 200$ mm) $A \geq 2 L_{alv}$ (se $L_{alv} < 200$ mm)	✓	✓
B	$B \geq P_{alv}$ $B \geq 75$ mm	$B \geq P_{alv}$	✓	✓
e_{folhas}	$0.6 \leq e_{folhas} \leq 1.2$ mm	$0.5 \leq e_{folhas} \leq 1$ mm	✓	✓
$P_{m\acute{a}x}$	6.9 MPa	6.0 MPa	✓	✓
d_{ref}	$0.3 A \leq d_{ref} \leq 0.6 A$	$0.3 A \leq d_{ref} \leq A$	✓	✓
E_{mac}	$E_{mac} \geq 5$ fiadas de alv $E_{mac} \leq 1.5 A$	$E_{mac} \geq 5$ fiadas ($H_{alv} \leq 100$ mm) $E_{mac} \geq 3$ fiadas ($H_{alv} \geq 100$ mm) $A \leq E_{mac} \leq 1.5 A$ $E_{mac} \geq 2.5 B$	✓	✓
$S_{along\acute{a}metro}$	0.005% da distância medida	0.0025 mm	✓	✓

Em que:

- A comprimento do macaco plano;
- B largura do macaco plano;
- e_{folhas} espessura das folhas de aço constituintes do macaco plano;
- d_{ref} distância na vertical entre os pontos de referência no ensaio simples;
- E_{mac} espaçamento (medido na vertical) entre os macacos no ensaio duplo;
- L_{alv} comprimento de uma unidade de alvenaria;
- P_{alv} espessura de uma unidade de alvenaria;
- H_{alv} altura de uma unidade de alvenaria;
- $S_{along\acute{a}metro}$ sensibilidade do alongâmetro.

2.5 Carbonatação

O murete utilizado nos ensaios laboratoriais abordados na secção 3.3, é constituído por pedra de calcário e argamassa de cal aérea. Quando se trata deste tipo de argamassa, é despoletada uma reação química bastante lenta, designada por carbonatação que consiste na reação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) com o dióxido de carbono (CO_2), presente na atmosfera, provocando a hidratação da argamassa de cal aérea, diminuindo o seu pH, dada pela expressão 2.3 (Coutinho, 1997). A carbonatação depende de fatores como a temperatura, a humidade relativa, a permeabilidade da argamassa e a concentração de dióxido de carbono na atmosfera (Rosa, 2013).



A carbonatação da argamassa de cal aérea pode durar anos e evoluir de forma expedita após a construção do murete e abranda à medida que envelhece porque se torna cada vez mais difícil para o dióxido de carbono se infiltrar no seu interior. Existem diversas maneiras de avaliar o estado de carbonatação de um elemento, sendo que a utilizada nesta dissertação foi, a fenolftaleína, que é um indicador químico de pH, adquirido em solução alcoólica para aspersão. Esta solução, ao entrar em contacto com uma superfície com um $\text{pH} > 9$, assume uma cor carmim. A argamassa carbonatada apresenta um $\text{pH} < 9$, logo, as zonas que permanecerem incolor após a aspersão encontram-se carbonatadas, enquanto que as zonas não carbonatadas, apresentam uma cor carmim. Esta técnica permite avaliar a profundidade da carbonatação do murete M212 e comparação de resultados com outros muretes de diferentes idades, na secção 4.5 (Simas, 2007).

2.6 Trabalhos de investigação de outros autores

Na presente secção apresentam-se os trabalhos de investigação de outros autores no âmbito desta dissertação, apresentados na Tabela 2.2. Alguns dos resultados obtidos por estes autores são comparados com os obtidos no trabalho experimental da presente dissertação, no capítulo 4.

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

Tabela 2.2 - Trabalhos científicos de outros autores

Autores	Título
R. Vicente, J. Silva, H. Varum, A. Costa, T. Ferreira, A. Figueiredo e H. Rodrigues	Ensaio in situ: Caracterização mecânica e identificação dinâmica (Vicente et al., 2010)
R. Vicente, T. Ferreira, J. Silva e H. Varum	In Situ Flat-Jack Testing of Traditional Masonry Walls: Case Study of the Old City Center of Coimbra, Portugal (Vicente et al., 2015)
M. Andreini, A. Falco, L. Giresini e M. Sassu	Mechanical Characterization of Masonry Walls with Chaotic Texture: Procedures and Results of InSitu Tests (Andreini et al., 2014)
D. Łątka e P. Matysek	The estimation of compressive stress level in brick masonry using the flat-jack method (Łątka and Matysek, 2017)
P. Gregorczyk e P. Lourenço	A Review on Flat-Jack Testing (Lourenço e Gregorczyk, 2000)
J. Roque e P. Lourenço	Caracterização Mecânica de Paredes Antigas de Alvenaria. Um Caso de Estudo no Centro Histórico de Bragança. (Roque e Lourenço, 2003)
F. Pinho e V. Lúcio	Rubble Stone Masonry Walls in Portugal Material Properties, Carbonation Depth and Mechanical Characterization (Pinho e Lúcio, 2017)
S. Martins	Ligação parede/pavimento com pregagens para reabilitação de edifícios antigos (Martins, 2014)

2.6.1 Ensaio in situ: Caracterização mecânica e identificação dinâmica

Neste trabalho (Vicente et al., 2010) realizou-se uma série de ensaios de caracterização do comportamento mecânico de alvenarias mais representativas do edificado do Seixal, Portugal, 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.

Os ensaios realizaram-se de forma etápica, começando pela realização de ensaios simples, seguidos de ensaios duplos, aproveitando-se o mesmo pano de parede para a execução de ambos. Refere-se ainda que as zonas de paredes ensaiadas ofereciam as condições e requisitos impostos pelas normas técnicas abordadas na secção 2.4.

Para a realização dos ensaios de macacos planos utilizaram-se uma máquina de corte de disco, macacos planos semi-ovais e um sistema de pressurização constituído por uma bomba hidráulica manual e uma célula de pressão.

Nos ensaios simples foram utilizados três alinhamentos de miras e os deslocamentos registaram-se utilizando um alongâmetro digital. Nos ensaios duplos utilizaram-se potenciômetros para medir os deslocamentos, em quatro alinhamentos verticais e um

horizontal. Os macacos planos foram espaçados por 40 cm. Os potenciômetros e a célula de pressão, foram ligados a uma placa de aquisição com correspondente gravação dos dados, através de uma aplicação em LabView®. O número dos ciclos de carga/descarga variou de acordo com a resistência oferecida pela alvenaria. Os ensaios terminaram quando ocorreu a rotura da alvenaria, que se verifica pelo relaxamento da pressão. Apresenta-se na Figura 2.6 a configuração geral dos ensaios de macacos planos.



(a) ensaio simples; (b) ensaio duplo

Figura 2.6 - Configuração geral dos ensaios de macacos planos (Vicente et al., 2010)

Os valores do coeficiente de correção (k_m), foram obtidos através de várias calibrações efetuadas aos macacos planos usados nestes ensaios, atribuindo-se um valor médio de $k_m = 0,800$. Em relação aos valores de correção ao coeficiente de área efetiva (k_a), a estratégia utilizada para estimar a área de contacto consistiu na interposição de uma folha de papel químico envolvida em duas folhas de papel branco, entre o macaco plano e a área do corte na parede. As curvas tensão-deformação dos ensaios de macacos planos duplos, podem ser observados na Figura 2.7.

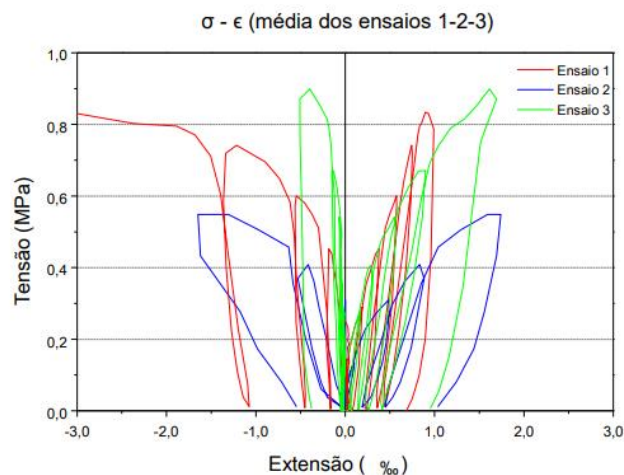


Figura 2.7 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de macacos planos duplos (Vicente et al., 2009)

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

A partir das curvas tensão-deformação dos ensaios duplos é estimado o módulo de elasticidade médio da alvenaria (E_0). O módulo de elasticidade é comparado com o valor de $1000 \times f_k$, calculado segundo o Eurocódigo 6 (CEN, 2005), concluindo-se que apesar da amostra de resultados ser baixa para retirar uma correlação fiável, observa-se que a fórmula apresentada pelo EC6 encontra-se mais afinada para alvenarias tradicionais correntes.

Na Tabela 2.3, é possível observar um resumo de todos os resultados mais importantes dos ensaios realizados, nomeadamente: tensão instalada in-situ, tensão máxima atingida, módulo de elasticidade inicial e o coeficiente de Poisson.

Tabela 2.3 - Principais resultados dos ensaios (Vicente et al., 2010)

Propriedades mecânicas estimadas	Ensaio		
	1	2	3
Tensão "in-situ", σ_i (MPa)	0,08	0,082	0,10
Máximo valor da tensão atingida, $\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	0,840	0,560	0,900
Módulo de elasticidade, E_0 (MPa)	1100	1097	1372
Coef. Poisson, ν , (regime elástico)	0,304	0,427	0,186

2.6.2 In Situ Flat-Jack Testing of Traditional Masonry Walls: Case Study of the Old City Center of Coimbra, Portugal

Este trabalho (Vicente et al., 2015) aborda uma campanha de ensaios de caracterização do comportamento mecânico de alvenarias antigas, realizada no centro da Cidade Velha de Coimbra, Portugal, 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. As paredes estudadas são de alvenaria tradicional de pedra calcária e cal aérea.

Para a realização dos ensaios de macacos planos simples utilizaram-se macacos semi-retangulares com dimensões de $400 \times 100 \times 3 \text{ mm}^3$, pela maior adaptabilidade ao rasgo. Utilizaram-se quatro alinhamentos de miras e os deslocamentos foram registados utilizando dois alongâmetros digitais de 100 e 200 mm, com precisão de 0,001 mm. Na Tabela 2.4, apresenta-se uma comparação entre as tensões estimadas por cálculo e as medidas nos ensaios de macacos planos, para todos os ensaios realizados.

Tabela 2.4 - Comparação entre tensões estimadas e medidas dos 9 ensaios (Vicente et al., 2015)

Ensaio	Tensão estimada (Mpa)	Tensão medida (MPa)	Varição relativa à tensão medida
1	0,193	0,360	-46%
2	0,242	0,258	-6%
3	0,246	0,145	+70%
4	0,178	0,081	+119%
5	0,178	0,240	-26%
6	0,110	0,062	+77%
7	0,110	0,139	-21%
8	0,178	0,111	+60%
9	0,227	0,162	+40%
		Média	+30%

A variação observada entre os valores estimados e os valores medidos de tensão em alguns ensaios, é muito elevada. No artigo, o autor apresenta várias possíveis justificações para estes resultados.

Para os ensaios de macacos planos duplo, aproveitaram-se os macacos planos já instalados para o ensaio simples e alguns alinhamentos de miras. Utilizaram-se macacos planos idênticos aos do ensaio simples. Os dois macacos planos foram distanciados por 60 cm e a distância entre as miras de extremidade de cada alinhamento foi de 40 cm. Os deslocamentos registaram-se com um alongâmetro de 200 mm, sendo necessário, colocar 3 miras associadas em linha por alinhamento, controlando duas distâncias. Na Figura 2.8 é possível observar a configuração geral dos ensaios de macacos planos duplos.



Figura 2.8 - Configuração geral do ensaio de macacos planos duplo (Vicente et al., 2015)

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

Através da vectorização de fotografias das zonas ensaiadas entre os macacos planos, foi possível obter algumas características em termos de constituição e morfologia aparente das paredes ensaiadas, constituindo uma estimativa muito fiável da percentagem de pedra, argamassa e vazios existentes. O valor médio da percentagem de argamassa e vazios é cerca de 43% e da percentagem de pedra, 57%.

Os ensaios foram realizados aplicando incrementos de pressão de 0.05 MPa num primeiro ciclo e, posteriormente, 0,10 e 0,20 MPa para os ciclos seguintes. O carregamento, quando possível, foi levado até à rotura da alvenaria, que se deteta pelo relaxamento ou ausência de reação à aplicação de pressão nos macacos. Na Figura 2.9 apresentam-se as curvas tensão-deformação de todos os ensaios realizados (1 a 9). No artigo os autores apresentam uma detalhada análise dos resultados observados na Figura 2.9, baseada na informação obtida pela vectorização fotográfica.

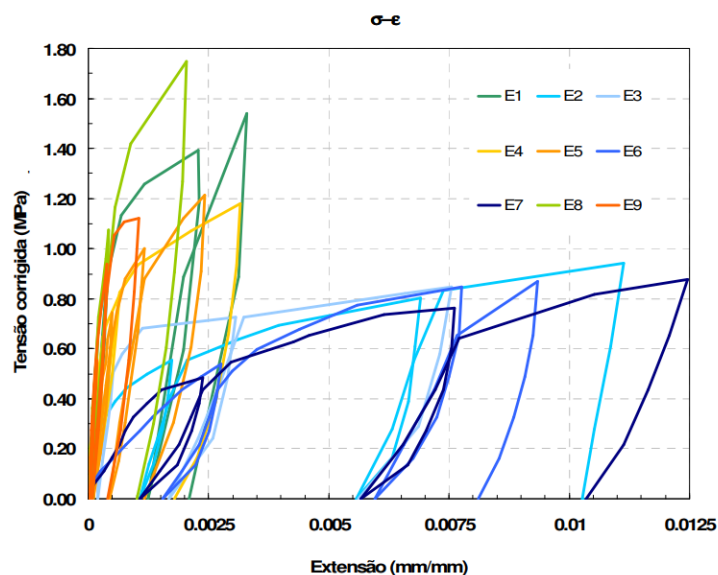


Figura 2.9 – Curvas tensão-deformação dos ensaios duplos (ensaios 1 a 9) (Vicente et al., 2015)
A estratégia utilizada para estimar a área efetiva de contacto do macaco plano com a alvenaria, consistiu na interposição de uma folha de papel químico envolvida em duas folhas de papel branco, entre o macaco plano e a área do corte na alvenaria.

Na Tabela 2.5 é possível observar um resumo dos resultados mais importantes dos ensaios realizados, nomeadamente: tensão instalada in-situ, tensão máxima atingida, módulo de elasticidade inicial e o coeficiente de Poisson.

Tabela 2.5 - Resultados dos ensaios de macacos planos (Vicente et al., 2015)

Propriedades mecânicas	Ensaio								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tensão "in-situ", σ_i (kPa)	360	250	140	90	255	60	143	110	185
Máxima tensão $\sigma_{m\acute{a}x}$ (kPa)	1547	942	894	1186	1219	870	878	1755	1124
Módulo de elasticidade, E_0 (MPa)	3371	1205	1783	2941	1493	214	341	3126	3659
Coef. Poisson, ν , (regime elástico)	0.158	0.040	0.080	0.210	0.120	0.060	0.200	0.180	0.120

A partir desses resultados, pode-se averiguar que existe uma dispersão significativa para o valor do módulo de elasticidade, E_0 . Esta dispersão é naturalmente esperada, pois o que seria desejável seria ter muitos mais resultados e o seu agrupamento em função das suas características morfológicas das alvenarias ensaiadas. À semelhança do artigo de Vicente et al. (2010), abordado na secção 2.6.1, estes valores são também comparados com o valor do módulo de elasticidade obtido, segundo o Eurocódigo 6 (CEN, 2005), por $1000 \times f_k$. Em que f_k representa o valor característico da resistência à compressão. Este valor pode ser tomado, de forma simplificada, como igual à tensão máxima atingida. Concluindo-se que pela análise dos valores máximos atingidos de todos os ensaios, a relação $1500 \times f_k$ apresenta-se como uma relação melhorada para este tipo de alvenaria antiga.

2.6.3 Mechanical Characterization of Masonry Walls with Chaotic Texture: Procedures and Results of In Situ Tests

Neste trabalho (Andreini et al., 2014) apresenta-se uma série de ensaios in-situ em paredes de alvenaria de pedra, em Volterra (Pisa, Itália). O local em estudo é um edifício em desuso de 3 pisos datado do início da década de 1930, é chamado *Pavilion Livi* e foi marcado para demolição. A parte mais antiga, datada de 1911, é o edifício retangular central de 2 andares, as paredes são de alvenaria de pedra irregular com blocos de arenito e de calcário e argamassa de cal.

Devido à caótica textura e má qualidade da argamassa, a execução do ensaio de macacos planos foi de difícil realização. Por isso, as aberturas na parede tiveram de ser feitas ao longo das pedras ao invés de ao longo da argamassa, por esta ser de má qualidade e irregular.

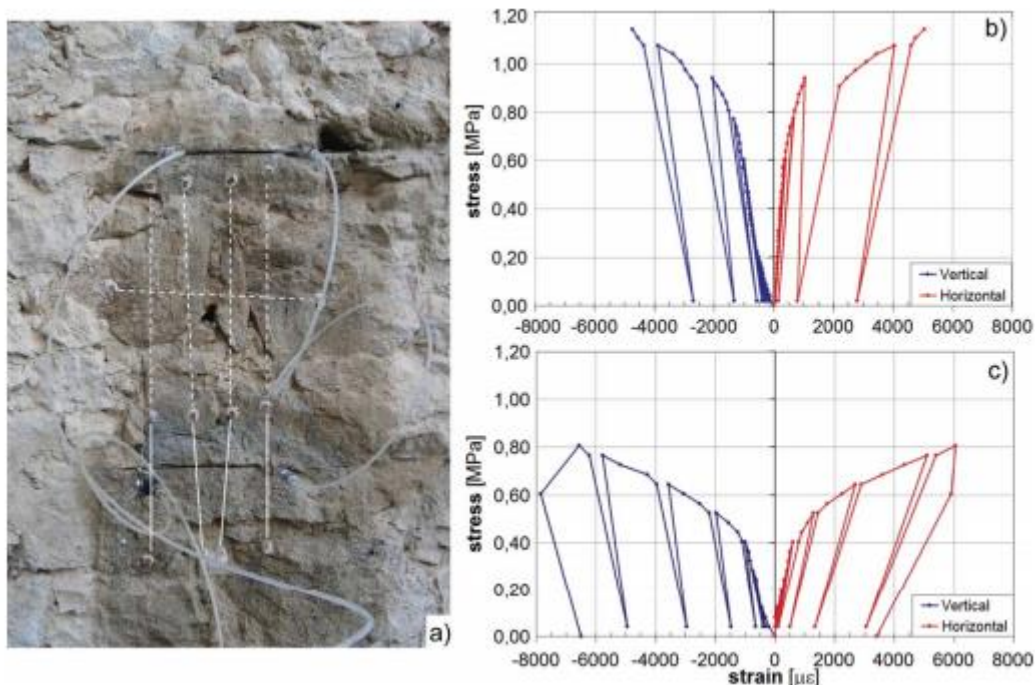
Para a realização dos ensaios de macacos planos, foram utilizados macacos planos semi-ovais com dimensões de $345 \times 255 \times 3.6 \text{ mm}^3$, uma máquina de corte, uma bomba hidráulica manual e respetivo manómetro. Os deslocamentos registaram-se utilizando um alongómetro analógico de 200 mm.

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

Nos ensaios simples, utilizaram-se quatro alinhamentos de miras metálicas e decorreram em incrementos de pressão iguais a 0,5 bar. Fez-se uma média dos resultados da tensão in-situ ao nível do rés do chão obtida nos ensaios e concluiu-se que esta varia entre 0,25 e 0,30 MPa.

Nos ensaios duplos, foram utilizados quatro alinhamentos de miras verticais e um horizontal. Os macacos planos distanciaram 60 cm entre si. A carga foi aplicada em ciclos de carga e descarga com, inicialmente, incrementos de 0.3 bar até chegar a 7 bar de pressão e posteriormente, incrementos de 0.5 bar.

Os valores de k_m e k_a obtidos são iguais a 0.80 e 0.86, respetivamente. A configuração geral dos ensaios de macacos planos e as curvas tensão-deformação obtidas nos dois ensaios duplos mais relevantes da campanha, podem ser observados na Figura 2.10.



(a) configuração geral dos ensaios de macacos planos; (b) e (c) curvas tensão-deformação de dois ensaios de macacos planos duplos em zonas diferentes.

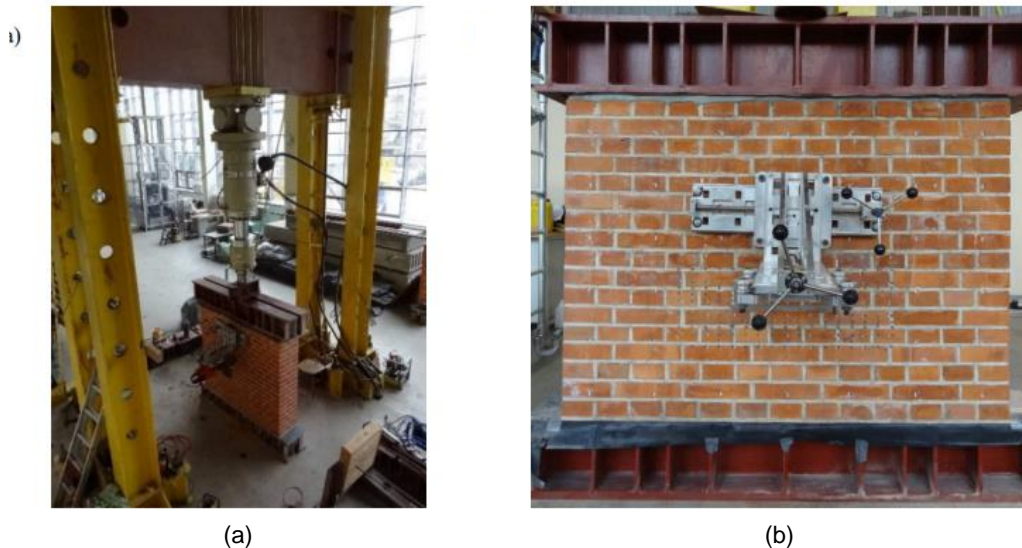
Figura 2.10 – Ensaio de macacos planos duplos (Andreini et al., 2014)

Os valores obtidos da resistência à compressão variam de 0.8 MPa a 1.2 MPa. Os valores obtidos do módulo de elasticidade variam entre 400 MPa e 800 MPa.

2.6.4 The estimation of compressive stress level in brick masonry using the flat-jack method

Este trabalho (Łątka e Matysek, 2017) aborda 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. O macaco plano P1, em aço inoxidável, com uma geometria quadrada e 0,8 mm de espessura, o P2, em aço inoxidável, com uma geometria semi-circular e 0,8 mm de espessura e o P3, em alumínio, com uma geometria semi-circular e 1,0 mm de espessura.

O murete ensaiado é constituído por alvenaria de tijolo com dimensões de 380x1680x1500 mm. A configuração do ensaio é apresentada na Figura 2.11.



(a) configuração geral do ensaio; (b) vista do murete antes de se iniciar a abertura do rasgo

Figura 2.11 – Configuração do ensaio (Łątka e Matysek, 2017)

A abertura dos rasgos foi feita com uma serra de diamante ligada a um tripé especial. Foi utilizado papel químico para obter a área de contacto dos macacos planos com a alvenaria. Realizaram-se vários estudos para a obtenção dos fatores k_a e k_m , para cada ensaio, sendo que os fatores foram comparados entre si e no caso do fator k_m , foram também comparados com o fator fornecido pelo fabricante dos macacos planos.

Os ensaios de macacos planos simples utilizando os macacos planos P1 e P2, foram realizados de acordo com o procedimento regularizado e a tensão necessária durante o ensaio foi induzida por uma bomba hidráulica cilíndrica. Os deslocamentos registaram-se utilizando um alongâmetro e um método de “digital image correlation” (DIC). Os ensaios utilizando o macaco plano P3, estão atualmente ainda em curso.

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

A Tabela 2.6, resume os resultados dos ensaios de macacos planos simples realizados até ao momento.

Tabela 2.6 - Comparação de resultado dos ensaios (Łątko e Matysek, 2017)

Macaco plano	Tensão aplicada (MPa)	Tensão determinada através do ensaio de macacos planos (MPa)
P1	1.54	1.59
P2		1.66

A diferença entre os resultados dos ensaios utilizando os macacos planos P1 e P2 é pequena, aproximadamente 4%, conclui-se então que o formato do macaco plano não tem praticamente nenhum efeito nos resultados dos ensaios.

2.6.5 A Review on Flat-Jack Testing

Neste trabalho (Lourenço e Gregorczyk, 2000) construíram-se duas paredes de alvenaria de blocos “YTONG” na Universidade do Minho em Guimarães, Portugal. Nestas paredes, realizou-se uma campanha de ensaios de macacos planos simples com o objetivo de comparar as recomendações dadas pelas normas ASTM e RILEM, referidas anteriormente. Adicionalmente, comparou-se também duas técnicas de corte, uma utilizando um berbequim e outra utilizando uma serra de disco, ilustrado na Figura 2.12.

As paredes foram sujeitas a um carregamento controlado através de um macaco hidráulico, para simular a tensão in-situ a que as paredes resistentes de edifícios antigos estão sujeitas, a carga foi distribuída ao longo das paredes com uma viga de metal rígida, colocada entre o macaco hidráulico e a parede, como se pode observar na Figura 2.12.



(a) realização do corte utilizando um berbequim; (b) realização do corte utilizando uma serra circular

Figura 2.12 - Comparação dos dois tipos de corte (Lourenço e Gregorczyk, 2000)

Na realização dos ensaios, utilizaram-se macacos planos com uma geometria retangular e dimensões de 406x102x4.2 mm³ e uma bomba hidráulica manual. Os deslocamentos registaram-se em quatro alinhamentos de miras, utilizando um alongâmetro com precisão de 0,001 mm. Três distâncias entre miras foram usadas durante os testes, sendo estas 11, 25 e 31 cm. Para estimar a área de contacto efetiva entre o macaco plano e a alvenaria colocou-se uma folha de papel químico envolvida em duas folhas de papel branco entre o macaco plano e a chapa metálica usada para colmatar o rasgo. Na Tabela 2.7, apresentam-se os resultados dos ensaios de macacos planos simples realizados.

Tabela 2.7 - Resultados dos ensaios de macacos planos simples (Lourenço e Gregorczyk, 2000)

Ensaio	Tensão aplicada (MPa)	Tensão determinada através do ensaio de macacos planos (MPa)	Varição relativa à tensão aplicada
1	0,344	0,420	22%
2	0,339	0,400	18%
		Média	20%

Os valores das tensões determinada através dos ensaios de macacos planos simples têm uma média de variação de 20% em relação à tensão aplicada. De acordo com as normas estes valores são expectáveis apesar de ambos representarem uma sobrestimação da tensão instalada sobre as paredes. Apesar disso, conclui-se que este erro é razoável e constitui informação valiosa no âmbito de uma reabilitação.

2.6.6 Caracterização Mecânica de Paredes Antigas de Alvenaria. Um Caso de Estudo no Centro Histórico de Bragança

Neste caso de estudo (Roque e Lourenço, 2003) realizou-se um conjunto de ensaios de macacos planos simples numa habitação, no centro histórico de Bragança, Portugal. A estrutura é constituída por paredes mestras em alvenaria de pedra irregular (xisto) rebocadas e por pavimentos e cobertura em madeira.

Abriram-se, através da remoção de reboco, quatro janelas com dimensões de 1,20x1,20 m² no paramento interior da parede da empena. Estas janelas destinavam-se à realização de ensaios de macacos planos simples e duplos, mas apenas se realizaram ensaios nas primeiras 3 janelas.

Na realização dos ensaios, utilizaram-se macacos planos com uma geometria retangular e dimensões de 406x102x3,8 mm³, chapas-almofadas metálicas retangulares com 2 mm de espessura e uma bomba hidráulica. Os rasgos foram executados utilizando uma máquina de corte de disco, um berbequim elétrico e ainda com o auxílio de um escopro e maceta.

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

Na realização dos ensaios de macacos planos simples, utilizaram-se quatro pares de miras metálicas verticais e registaram-se os deslocamentos utilizando um comparador de fendas com 0,001 mm de precisão. Realizaram-se dois ensaios por cada rasgo. Os ensaios realizaram-se através de 8 incrementos sucessivos de 0,05 MPa. Registaram-se 3 leituras de distâncias entre miras, em cada patamar de pressão. Na Figura 2.13 apresenta-se a configuração dos ensaios de macacos planos.

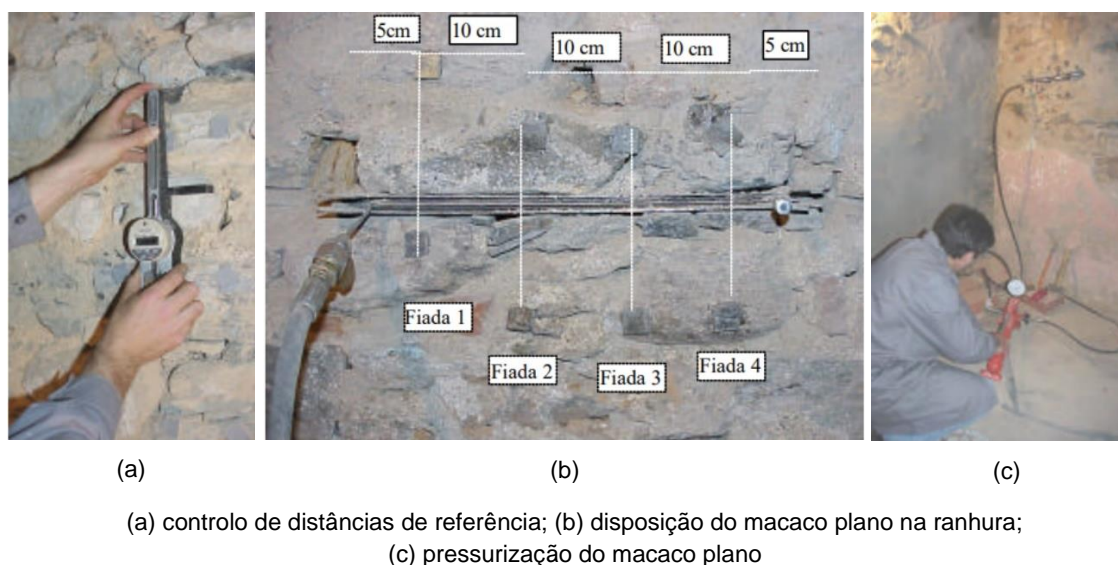


Figura 2.13 - Configuração dos ensaios de macacos planos (Roque e Lourenço, 2003)

Os macacos planos foram previamente calibrados e apresentam valores para os fatores k_m de $k_{m1} = 0,80$ e $k_{m2} = 0,78$, para o macaco plano 1 e 2, respetivamente. Para estimar a área de contacto efetiva entre o macaco plano e a alvenaria colocou-se uma folha de papel químico envolvida em duas folhas de papel branco entre o macaco plano e a chapa metálica. Realizou-se uma estimativa da tensão instalada sobre a parede e foi comparada com a obtida pelos ensaios de macacos planos simples (Tabela 2.8).

Nos ensaios duplos, utilizaram-se também quatro pares de miras verticais e o mesmo aparelho de medição de deslocamentos. Os ensaios realizaram-se com incrementos sucessivos de pressão até ocorrer a rotura da alvenaria (manifestada pela ausência de reação à aplicação de tensão no macaco). Na Tabela 2.8, apresenta-se um resumo de todos os resultados obtidos nos ensaios de macacos planos efetuados.

Tabela 2.8 - Resumo dos resultados dos ensaios de macacos planos (Roque e Lourenço, 2003)

Localização	Tensão prevista (MPa)	Tensão média medida (MPa)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
Janela 1	0,12	0,13	0,70-0,80	0,30-0,60
Janela 2	0,12	0,13	0,80-1,00	1,50-2,20
Janela 3	0,07	0,09	0,40-0,50	0,50-0,75
		Média	0,7	1,0

Através da análise de resultados conclui-se que, as tensões obtidas através dos ensaios de macacos planos simples são da ordem dos valores estimados, representado um bom indício de que a distribuição de tensões na secção é aproximadamente uniforme. Os valores obtidos para a tensão de rotura permitem concluir que a capacidade resistente da alvenaria à compressão, é, sob a ação do peso próprio, cinco a oito vezes superior aos valores da tensão instalada.

2.6.7 Rubble Stone Masonry Walls in Portugal Material Properties, Carbonation Depth and Mechanical Characterization

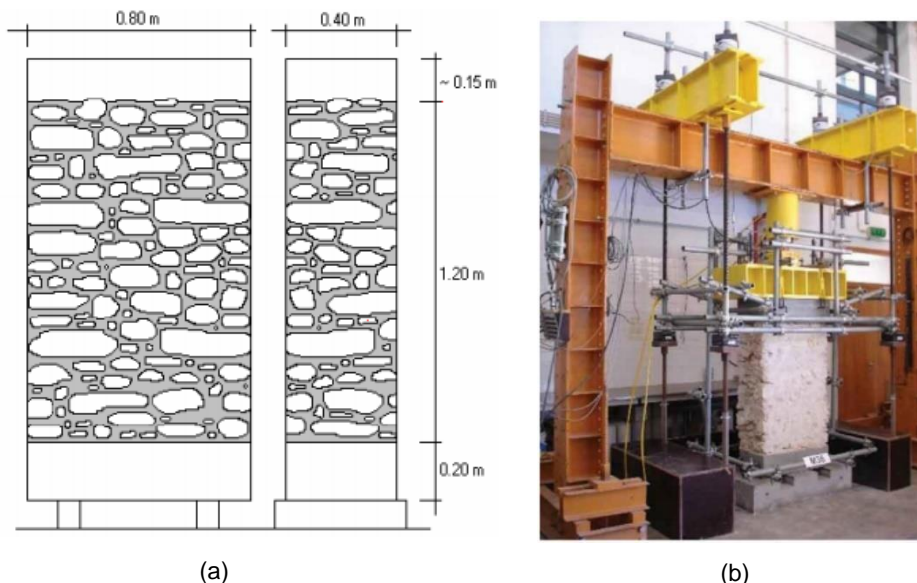
Este trabalho de investigação (Pinho e Lúcio, 2017) apresenta uma análise das propriedades dos materiais de paredes de alvenaria de pedra, realizada na Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade NOVA de Lisboa, incluindo a evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo e a caracterização mecânica através de ensaios de compressão .

Para tal, foram construídos vários muretes de alvenaria ordinária cuja sua constituição consiste em 75% de pedra calcária e 25% de argamassa de cal aérea com areias de rio e de areiro (traço 1:3). Os muretes foram construídos sobre uma base de betão armado rígida e indeformável com a mesma secção geométrica em planta que a dos muretes e com 20 cm de altura. Adicionalmente, realizaram-se lintéis de betão armado sobre os muretes, de modo a distribuir as cargas aplicadas sobre estes, durante os ensaios de compressão axial. Durante a construção, colocaram-se perpianos a 1/3 e 2/3 da altura de cada murete (a 0,40 m e a 0,80 m acima das bases de betão armado).

A pedra calcária, apresenta uma resistência média à compressão de 47,8 MPa. A argamassa de cal aérea apresenta, ao fim de 90 dias, uma resistência média à compressão e flexão igual a 0,65 MPa e 0,30 MPa, respetivamente, e um módulo de elasticidade dinâmica de 2310 MPa.

Entre os muretes ensaiados, destacam-se os simples ou de referência M43, M21 e M32 com dimensões de 1,20x0,80x0,40 m³ (Figura 2.14a). Estes muretes, foram ensaiados num sistema de ensaio, ilustrado na Figura 2.14b.

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



(a) muretes simples ou de referência (M43, M21 e M32); (b) sistema de ensaio de compressão axial

Figura 2.14 - Ensaio de muretes de referência (Pinho e Lúcio, 2017)

Os resultados dos ensaios dos muretes, incluindo o M36, ensaiado por Moraes (2011) e o M9, ensaiado por Correia (2011), encontram-se na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Resultados dos ensaios de compressão axial dos muretes simples (Pinho e Lúcio, 2017)

Murete	Idade (dias)	F ^{máx} (kN)	σ ^{máx} (Mpa)	δ _v ^{Fmáx} (mm)	ε _v ^{Fmáx} (‰)	E (GPa)
M43	618	134,2	0,42	6,8	5,7	0,239
M21	626	127,7	0,40	6,4	5,3	0,409
M32	638	148,5	0,46	4,3	3,6	0,267
M36	2866	238,3	0,74	6,4	5,3	0,212
M9	3087	192,2	0,60	5,4	4,5	0,341

É também medida a profundidade de carbonatação de inúmeros muretes ensaiados à compressão axial na mesma linha de investigação. Analisando estes resultados, foi desenvolvida a expressão 2.4, para estimar a profundidade de carbonatação (C_d) ao longo do tempo.

$$C_d(t) = 43 \times \ln(t + 270) - 240 \quad 2.4$$

Em que:

C_d profundidade de carbonatação, medida do exterior para o interior do murete (mm);

t tempo (dias).

De acordo com a expressão 2.4, os muretes ficarão completamente carbonatados ao fim de 77 anos, sendo que a largura dos muretes construídos é igual a 0,40 m. Relacionando a resistência à compressão dos muretes de referência ($\sigma^{\text{máx}}$) com o rácio de carbonatação da argamassa de cal aérea presente na alvenaria (Ca/A), repara-se que existe uma correlação linear entre as duas e quando o rácio de carbonatação tende para 1 (murete totalmente carbonatado), a resistência à compressão tende para perto de 1,0 MPa, sendo possível desenvolver a expressão 2.5, que estima a resistência à compressão dos muretes da presente linha de investigação baseado no rácio de carbonatação.

$$\sigma^{\text{máx}} = 0,91 \times (\text{Ca}/A) + 0,08 \quad 2.5$$

Em que:

$\sigma^{\text{máx}}$ resistência à compressão da alvenaria (MPa);

Ca área da secção de alvenaria carbonatada (mm²);

A área da secção de alvenaria (mm²).

Utilizando a expressão 2.4 é possível calcular a profundidade de carbonatação estimada de um murete e sabendo a sua área de secção é possível calcular o rácio de carbonatação. Utilizando esse rácio na expressão 2.5 consegue-se calcular a resistência à compressão estimada de um murete, sendo assim possível calcular esta, sabendo apenas a idade do murete em estudo.

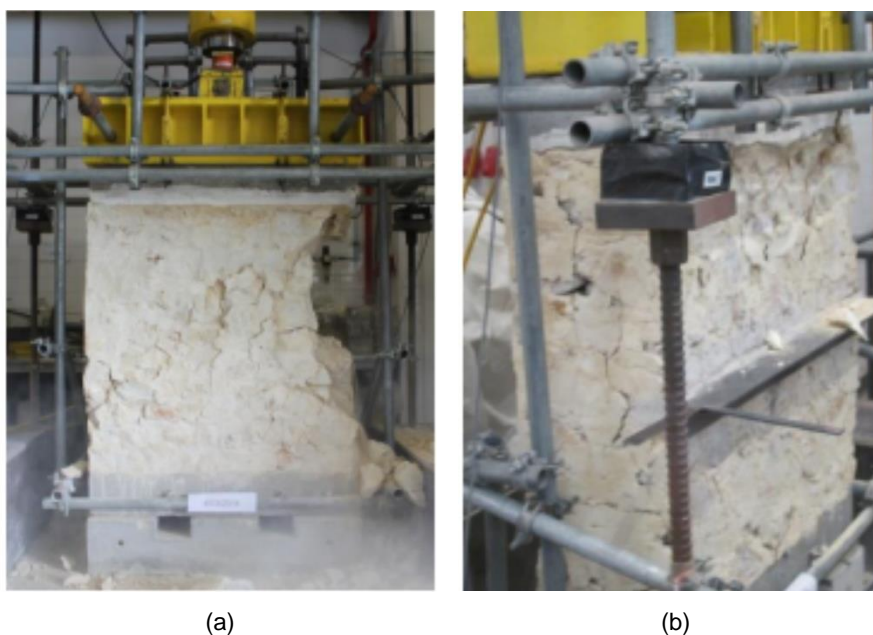
Conclui-se que a resistência à compressão dos muretes de alvenaria simples é principalmente influenciada pela reduzida resistência à compressão e flexão da argamassa de cal aérea, assim como o lento desenvolvimento da profundidade da carbonatação também tem uma grande influência na resistência à compressão dos muretes, visto que quanto mais carbonatado se encontra o murete, maior a sua resistência à compressão axial.

2.6.8 Ligação parede/pavimento com pregagens para reabilitação de edifícios antigos

Neste trabalho de investigação (Martins, 2014) realizou-se um estudo na Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade NOVA de Lisboa, de modo a dar continuidade ao trabalho de Pinho (2007), na análise de muretes de alvenaria de pedra. Utilizaram-se dois muretes de alvenaria de pedra, pertencentes a uma segunda série construtiva que dá continuidade à primeira linha de investigação de Pinho (2007). Designados por M211 e M215, construídos utilizando os mesmos materiais, proporções e processos construtivos que a primeira série construtiva.

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

Os muretes foram submetidos a ensaios de compressão axial, num sistema de ensaio semelhante ao da Figura 3.4. Os ensaios são apresentados na Figura 2.15.



(a) murete M211; (b) murete M215

Figura 2.15 - Ensaio de compressão axial dos muretes (Martins, 2014)

Os resultados da resistência à compressão axial dos muretes M211 e M215 foram iguais a $\sigma_{comp} = 0,44$ MPa e $\sigma_{comp} = 0,46$ MPa, respetivamente. Estes valores foram comparados com os valores obtidos nos muretes simples construídos na primeira série construtiva de Pinho (2007) e, como era expectável, foram bastante semelhantes.

De seguida procedeu-se por fim à determinação da profundidade de carbonatação dos muretes usando uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,5% e uma fita métrica. Os muretes M211 e M215, apresentaram profundidades de carbonatação iguais a $C_d = 85,0$ mm e $C_d = 72,5$ mm, respetivamente. Comparou-se mais uma vez, os valores obtidos por Pinho (2007) e conclui-se que estes se enquadram na linha evolutiva criada, em função do tempo de carbonatação.

Capítulo 3

Trabalho experimental

3.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta o trabalho experimental realizado no âmbito da presente dissertação. Inicialmente na secção 3.2 descreve-se o procedimento experimental de preparação do murete M212 e na secção 3.2.1, explica-se a constituição do sistema de ensaio de compressão axial. O procedimento do ensaio de macacos planos simples é descrito na secção 3.3.1, o ensaio de macacos planos duplo na secção 3.3.2 e o ensaio de compressão axial na secção 3.4. É caracterizada a calda de cimento utilizada em injeções, na secção 3.5 e por fim na secção 3.6, explica-se o ensaio de determinação da profundidade de carbonatação do murete M212.

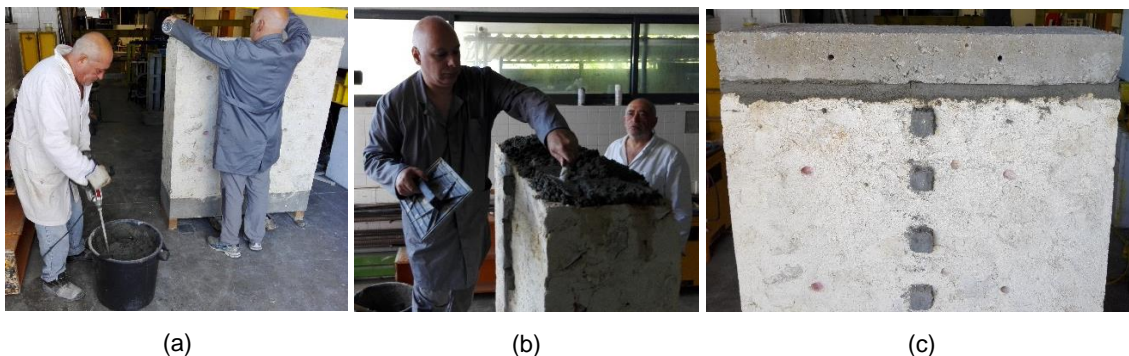
3.2 Procedimento experimental

Para o trabalho experimental foi utilizado o murete M212 que provém de uma segunda série de muretes construídos no DEC FCT NOVA, em 2010, no âmbito da tese de doutoramento do orientador da presente dissertação (Pinho, 2007). O murete tem dimensões de 1,20x1,20x0,40 m³ (largura x altura x espessura), é constituído por alvenaria ordinária, 75% de pedra calcária e 25% de argamassa, com um traço volumétrico 1:3 de 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.

Antes de iniciar o trabalho experimental, procedeu-se à limpeza do murete para retirar materiais soltos. Iniciou-se o procedimento experimental com a colocação sobre o murete de um lintel em betão armado com 0,15 m de altura, de forma a distribuir as cargas verticais aplicadas sobre o murete durante os ensaios laboratoriais (Pinho, 2007). Utilizando uma

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

misturadora de pás, misturou-se uma argamassa de assentamento de cimento (Portland CEM II/B-L 32,5 N) e areia com um traço 1:3 (Figura 3.1a). A face superior do murete foi humedecida e sobre esta foi aplicada manualmente a argamassa de assentamento (Figura 3.1b). Por fim, foi colocado o lintel com auxílio de uma grua e este foi nivelado de forma a ficar paralelo com o plano horizontal (Figura 3.1c). Em seguida o murete foi transportado para o sistema de ensaio de compressão axial, com auxílio de um empilhador elétrico, onde permaneceu durante todos os ensaios realizados.



(a) mistura da argamassa; (b) espalhamento da argamassa; (c) aspeto final

Figura 3.1 - Colocação do lintel de betão armado

3.2.1 Sistema de ensaio de compressão axial

O sistema de ensaio de compressão axial é constituído por um pórtico metálico, formado por dois pilares HEB300 e uma viga HEB450, fixa aos pilares por 8 parafusos 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 (ENERPAC CLRG 3006), com uma capacidade de 3000 kN, em condições de segurança. Existe uma viga metálica intercalada entre o cilindro e o lintel de modo a distribuir as forças verticais aplicadas sobre o murete. Entre a viga metálica e o cilindro hidráulico, encontra-se ainda um bloco maciço para perfazer a altura que resta entre os dois elementos. O murete apoia numa base de betão armado preparada para o efeito. Complementarmente, existe ainda um sistema de segurança que impede a queda da viga metálica e do lintel do murete, na fase final do ensaio, como é possível observar na Figura 3.2a (Pinho, 2007).

Adicionalmente, montou-se uma estrutura metálica de suporte dos defletómetros (transdutores de deslocamento), utilizados para medir deslocamentos verticais durante o ensaio de compressão axial. Esta estrutura metálica é fixada à base do murete por meio de quatro varões roscados (dois na face frontal e dois na face tardoz). Utilizando uma torna, realizaram-se quatro furos horizontais com 16 mm de diâmetro e um comprimento de 100 mm. Preencheram-se os furos com bucha química e introduziram-se varões de aço roscados de 12 mm. Posicionou-se uma célula de carga de 500 kN entre o êmbolo do cilindro hidráulico e o bloco maciço

(Figura 3.2b). Colocaram-se também os defletómetros nos pontos médios das arestas de topo do lintel, como se pode observar na Figura 3.2c. Estes possuem um curso de 100 mm, com uma precisão de $100 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$.



(a) (b) (c)

(a) vista geral; (b) célula de carga; (c) defletometro

Figura 3.2 – Localização de alguns equipamentos de ensaio

A pressão no cilindro é controlada por uma bomba hidráulica (Figura 3.3a). Ambos os defletómetros e a célula de carga foram conectados a um data logger, que regista os dados experimentais e os envia para suporte informático (Figura 3.3b). O software utilizado para a aquisição de dados foi o “Catman 4.0”, da Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM).



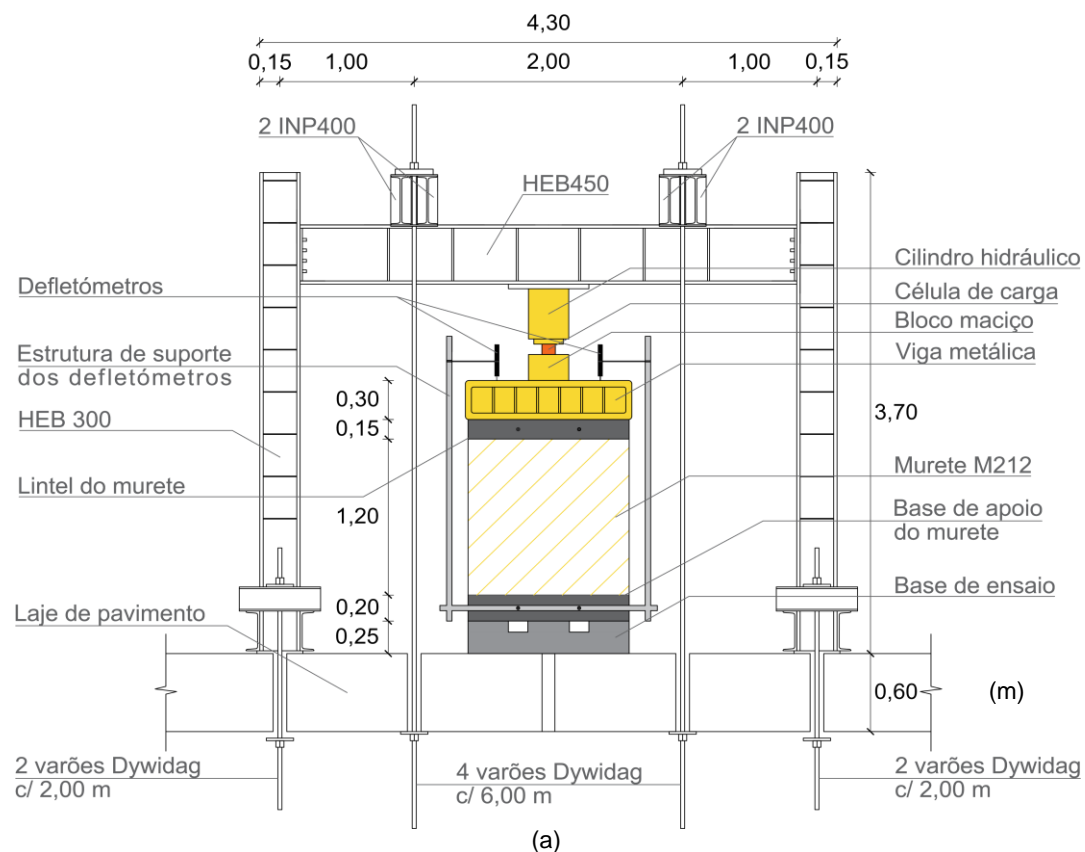
(a) (b)

(a) bomba hidráulica (Walter+Bai AG); (b) computador para registo de dados

Figura 3.3 – Bomba hidráulica e suporte informático

Na Figura 3.4 é possível observar uma representação esquemática do sistema de ensaio de compressão axial e uma fotografia do aspeto geral do mesmo.

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



(a) representação esquemática; (b) aspeto geral

Figura 3.4 – Sistema de ensaio de compressão axial

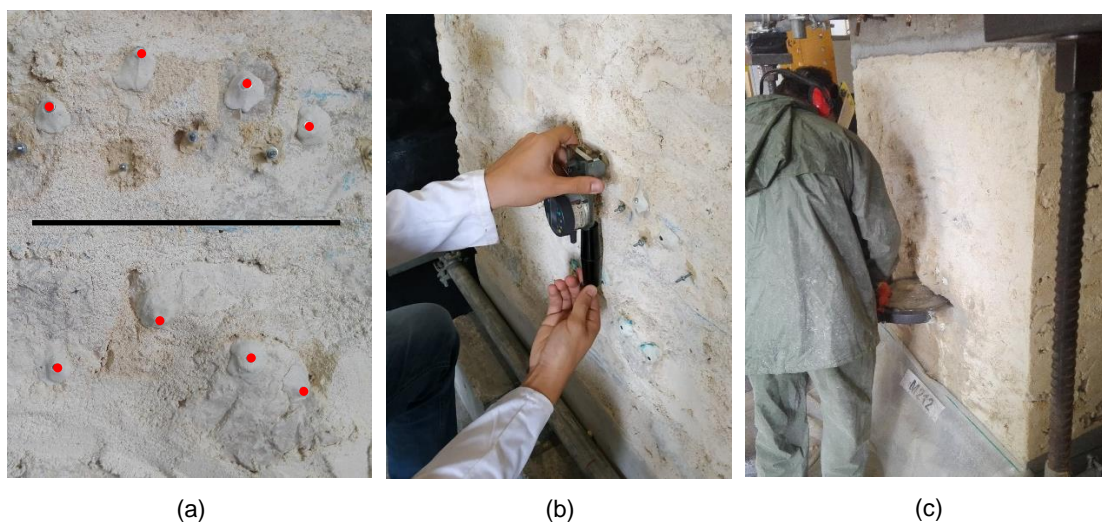
3.3 Ensaio de macacos planos

Nesta secção descreve-se os procedimentos dos ensaios de macacos planos simples e duplo realizados no murete M212 e apresentam-se os resultados.

3.3.1 Ensaio de macacos planos simples

Iniciou-se o ensaio com a aplicação de uma pré-carga de 0,25 MPa sobre o murete, que na altura se pensou corresponder a aproximadamente 50% da resistência à compressão do murete. Escolheu-se este valor porque quanto mais alta é a tensão aplicada sobre o murete, mais fidedignos são os resultados do ensaio, no entanto, uma carga mais elevada poderia comprometer a integridade estrutural do murete.

Em seguida foram colados, quatro pares de miras metálicas espaçadas 200 mm verticalmente, utilizando massa adesiva de rápido endurecimento (Figura 3.5a). Foram medidas as distâncias entre miras utilizando o alongâmetro digital com base de 200 mm (Figura 3.5b). Posteriormente realizou-se o rasgo a 35 cm da base do murete (Figura 3.5c).



(a) posição das miras metálicas; (b) medição de distâncias entre miras; (c) execução do rasgo

Figura 3.5 - Ensaio de macacos planos simples

Ao concluir o rasgo, reparou-se que uma grande parte da alvenaria acima do rasgo se tinha desagregado, existindo um grande espaço vazio. Não sendo possível continuar o ensaio, tomou-se como solução realizar uma injeção do rasgo com calda de cimento, fechando-o por completo. Optou-se por utilizar uma calda de cimento, por este material ter uma resistência à compressão muito superior à da alvenaria, ser mais rígido e por estar prontamente disponível para utilização, esta tem como constituintes, cimento e água, numa proporção em massa

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

de 3:1, respetivamente. Foi também adicionado, 50 ml de retardador de presa, de modo a prolongar o tempo disponível para realizar a injeção.

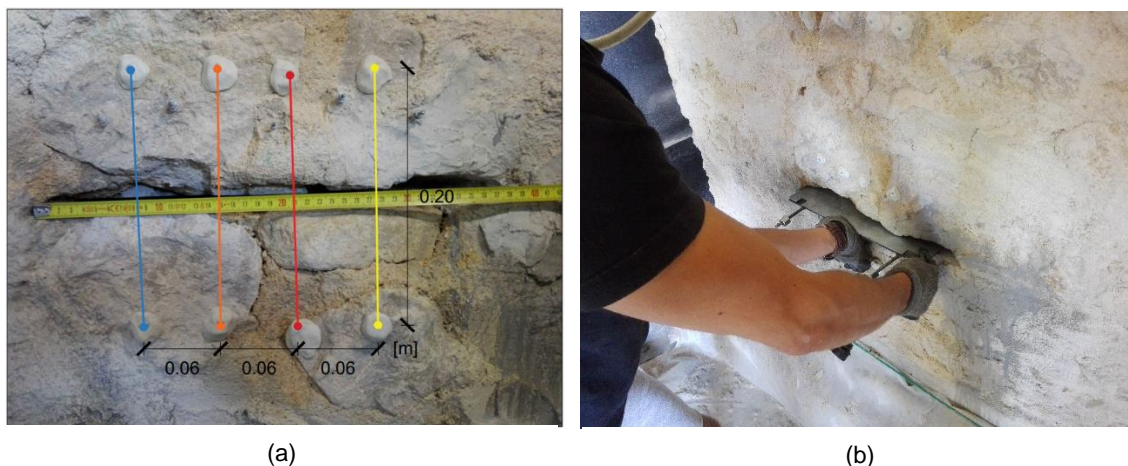
Utilizando uma torna, realizou-se um furo descendente no tardo do murete, de modo a ir de encontro ao topo do espaço vazio no interior do rasgo. Em seguida, colocou-se um tubo de borracha de silicone, com diâmetro suficiente para a calda de cimento fluir sem restrições, no início do rasgo realizado e outro no furo realizado no tardo, destinados à injeção da calda e à saída do ar do interior, respetivamente. Em seguida tapou-se o rasgo com gesso rápido e deixou-se secar durante quatro horas (Figura 3.6a). Finalmente, iniciou-se a injeção da calda até esta começar a sair pelo tubo destinado à saída do ar, terminando-se a injeção (Figura 3.6b). Foram também realizados 3 provetes para avaliar a resistência mecânica da calda de cimento (Figura 3.6c), os ensaios destes provetes encontram-se descritos na secção 3.5.



(a) aplicação de gesso; (b) injeção de calda de cimento; (c) provetes de calda de cimento

Figura 3.6 - Injeção do rasgo com calda de cimento

Aproximadamente 5 semanas após a injeção, foram novamente colocadas miras metálicas no mesmo local (Figura 3.7a), repetiu-se o procedimento e após avaliação do rasgo, observou-se que as superfícies superior e inferior do rasgo tinham uma camada sólida de calda de cimento, concluindo-se então ser possível continuar com o ensaio. Mediram-se as distâncias entre miras metálicas. Introduziu-se o macaco plano no rasgo, juntamente com uma chapa metálica, para garantir a colmatação do rasgo, e uma folha de papel químico envolvida por duas folhas de papel branco, para se medir a área do macaco plano que verdadeiramente está em contacto com a alvenaria (Figura 3.7b), como referido na secção 2.3.1.



(a) posição das miras metálicas; (b) introdução do macaco plano juntamente com a chapa metálica

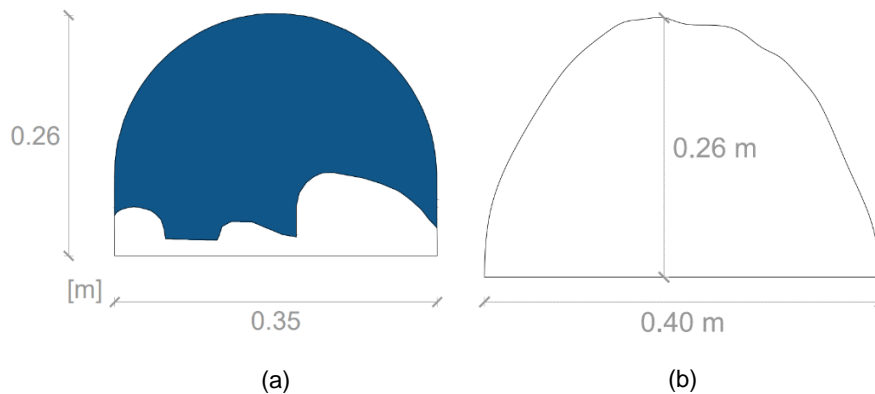
Figura 3.7 - Ensaio de macacos planos simples

Em seguida, fez-se a ligação do sistema de pressurização ao macaco plano. Retirou-se todo o ar do interior do macaco plano e após vedar a sua segunda entrada, procedeu-se à aplicação de pressão, em incrementos de 0,2 bar, até ser restituída a distância inicial entre as miras metálicas, registando-se as respetivas distâncias entre miras metálicas, em cada patamar de pressão. Terminou o ensaio e retirou-se a pré-carga inicialmente aplicada.

Após a realização do ensaio procedeu-se ao tratamento de dados. Não foi possível retirar a área efetiva em contacto com a alvenaria durante o ensaio, visto que o papel branco se degradou parcialmente em contacto com a alvenaria molhada (efeito secundário da utilização de água para arrefecer a lâmina da serra durante o corte), não tendo o papel químico deixado nenhuma área claramente delimitada no papel branco. Posto isto, admitiu-se que toda a área do macaco plano estava 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 3.8a.

Em seguida mediram-se as profundidades, em intervalos de 2 cm, do rasgo efetuado no murete, permitindo assim colocar estas medidas no programa AutoCAD e calcular a área em planta do rasgo, ilustrada na Figura 3.8b.

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



(a) área efetiva em contacto com a alvenaria; (b) área do rasgo efetuado

Figura 3.8 - Áreas para o cálculo do coeficiente k_a no ensaio de macacos planos simples

Após o cálculo de ambas as áreas, é possível calcular o coeficiente k_a , sendo este o quociente entre a área efetiva do macaco plano e a área do corte, como referido na secção 2.3.4. Tem-se então, $k_a = 0,76$, como é possível observar na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Cálculo do coeficiente k_a para o ensaio de macacos planos simples

A_{macaco}	A_{corte}	k_a
(m ²)		
0,061	0,080	0,763

O coeficiente k_m é de 0,85, disponibilizado pelo fornecedor dos macacos planos, visto que estes foram utilizados um reduzido número de vezes. Aplicando a expressão 2.1, é possível corrigir os valores de pressão (bar) registados no manómetro. Apresenta-se em seguida os resultados obtidos no ensaio de macacos planos simples sob a forma de um diagrama de deslocamento-tensão, ilustrado na Figura 3.9. Observando a figura, verifica-se que a tensão instalada sobre o murete, resultante do ensaio de macacos planos simples, é igual a $\sigma_m = 0,13$ MPa. Os valores da média foram obtidos através da média dos registos de deformação dos quatro alinhamentos.

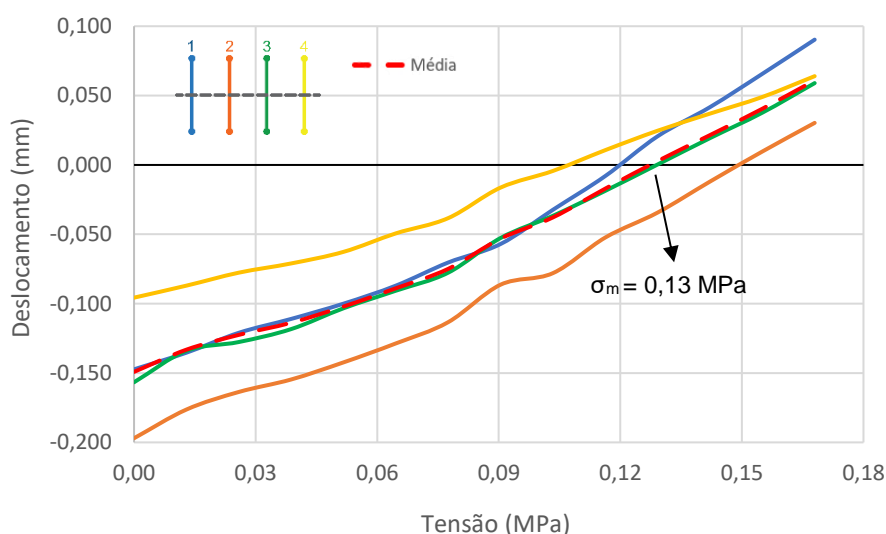


Figura 3.9 - Diagrama de Deslocamento-Tensão do ensaio de macacos planos simples

3.3.2 Ensaio de macacos planos duplo

Iniciou-se o ensaio com a aplicação de uma pré-carga de 0,20 MPa sobre o murete, que na altura se pensou corresponder aproximadamente a 40% da resistência à compressão do murete. Escolheu-se este valor porque para este ensaiado não é necessário o murete estar elevadamente carregado, porque a compressão ocorre maioritariamente no troço localizado entre os dois macacos planos. Após aplicar a pré-carga fecharam-se as mangueiras hidráulicas para impedir que, durante o ensaio, exista 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 verticalmente e um par também espaçado de 400 mm na horizontal. Realizou-se um novo rasgo 50 cm acima do rasgo realizado anteriormente no ensaio de macacos planos simples. Ao concluir o rasgo, reparou-se que, à semelhança do rasgo anterior, uma grande parte da alvenaria acima do rasgo se tinha desagregado, existindo um grande espaço vazio. Não sendo possível continuar o ensaio, voltou-se a realizar uma injeção do novo rasgo com calda de cimento. Desta vez, colocou-se um tubo de borracha de silicone, no fundo do rasgo realizado destinado à injeção da calda e outro no lado oposto no início do rasgo, para permitir a saída do ar do interior. Tapou-se o rasgo com gesso rápido e deixou-se secar durante quatro horas. Em seguida, iniciou-se a injeção e terminou-se aquando do aparecimento de calda no tubo destinado à saída do ar (Figura 3.10a). Foram novamente, realizados 3 provetes da calda de cimento utilizada (Figura 3.10b), os ensaios destes provetes encontram-se descritos na secção 3.5.



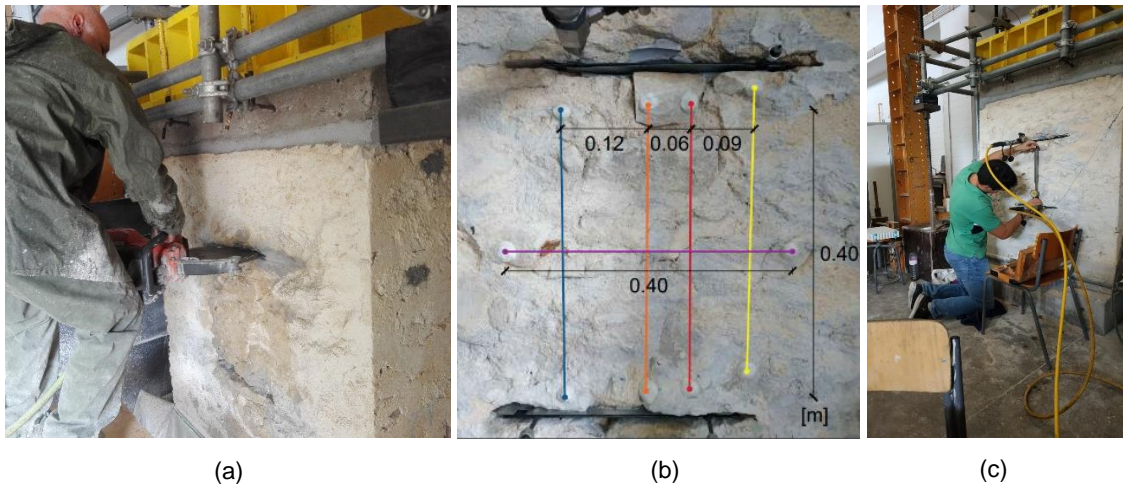
(a)

(b)

(a) Injeção da calda de cimento; (b) provetes de calda de cimento

Figura 3.10 – Injeção do 2º rasgo com calda de cimento

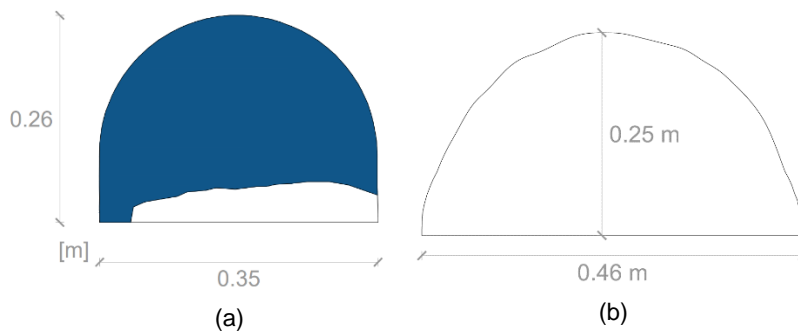
Um mês após a injeção, voltou a abrir-se o rasgo (Figura 3.11a) e foram novamente colocadas miras metálicas no mesmo local (Figura 3.11b), repetiu-se todo o procedimento e após avaliação do rasgo, observou-se que as superfícies superior e inferior do rasgo tinham uma camada sólida de calda de cimento, concluindo-se então ser possível continuar com o ensaio. Foram medidas as distâncias entre miras utilizando o alongâmetro analógico com base de 400 mm (Figura 3.11c). Introduziram-se os macacos planos nos rasgos, juntamente com uma chapa metálica por cima do macaco, no caso do rasgo inferior e por baixo do macaco, no caso do rasgo superior, para garantir a colmatação dos rasgos. Em seguida, fez-se a ligação ao sistema de pressurização. Retirou-se todo o ar do interior dos macacos planos e após vedar as suas segundas entradas, procedeu-se à aplicação de pressão, em incrementos de 1 bar, até se dar a rutura da alvenaria, detetada pela deformação excessiva com pouco 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 voltaram-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 3.4.



(a) abertura do rasgo superior no murete; (b) posição das miras metálicas;
(c) medição de distâncias entre miras

Figura 3.11 - Ensaio de macacos planos duplo

Após a realização do ensaio procedeu-se ao tratamento de dados. Admitiu-se novamente, 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 3.8a para o rasgo inferior e na Figura 3.12a para o caso do rasgo superior. Em seguida mediram-se as profundidades, em intervalos de 2 cm, do rasgo superior efetuado no murete, permitindo assim calcular a área em planta do rasgo (Figura 3.12b).



(a) área efetiva em contacto com a alvenaria do rasgo superior; (b) área do rasgo superior

Figura 3.12 – Áreas para o cálculo do k_a para o rasgo superior do ensaio de macacos planos duplo

Após o cálculo de ambas as áreas, é possível calcular o coeficiente k_a . Tem-se então, $k_a = 0,76$, tanto para o macaco plano superior como para o inferior, como é possível observar na Tabela 3.2.

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

Tabela 3.2 - Cálculo do coeficiente k_a para o ensaio de macacos planos duplo

Macaco plano	A_{macaco}	A_{corte}	k_a
	(m ²)		
inferior	0,061	0,080	0,763
superior	0,065	0,086	0,758

Como referido anteriormente, o coeficiente k_m é de 0,85 e aplicando a expressão 2.1, é possível corrigir os valores de pressão (bar) registados no manómetro. Apresenta-se em seguida os resultados obtidos no ensaio de macacos planos duplo em forma de um diagrama de tensão-deformação, ilustrado na Figura 3.13. 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 horizontal, porque se considerou que os deslocamentos registados eram bastante elevados. Uma possível razão para este acontecimento é um desprendimento de uma das pedras em que uma das miras metálica estava fixada.

É possível observar pela análise da Figura 3.13 que, o murete entra em rutura quando aplicada uma tensão de $\sigma_{\text{comp}} = 0,52$ MPa, segundo os resultados obtidos pelo ensaio de macacos planos duplo.

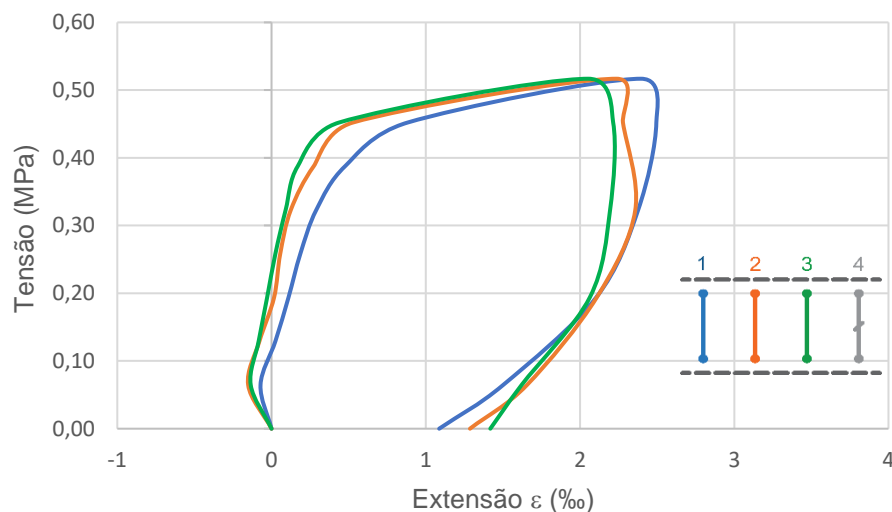


Figura 3.13 - Diagrama de tensão-deformação do ensaio de macacos planos duplo

3.4 Ensaio de compressão axial do murete M212

Iniciou-se o ensaio de compressão axial sobre o murete, aumentando a carga aplicada a uma velocidade de 1 kN/s. Durante o ensaio foi possível observar a desagregação de alvenaria inicialmente no canto superior esquerdo do murete, mas principalmente no lado direito a meia altura, o que provocou uma flexão do murete para o lado esquerdo, como é possível observar na Figura 3.14. Eventualmente atingiu-se o colapso do murete e o ensaio terminou.



Figura 3.14 – Evolução do ensaio de compressão axial do murete M212

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 totalizam 7,0 kN. Este peso foi adicionado à carga aplicada registada pela célula de carga (CC). Na Figura 3.15 é apresentada a história de carga e deslocamentos verticais do ensaio de compressão axial do murete M212.

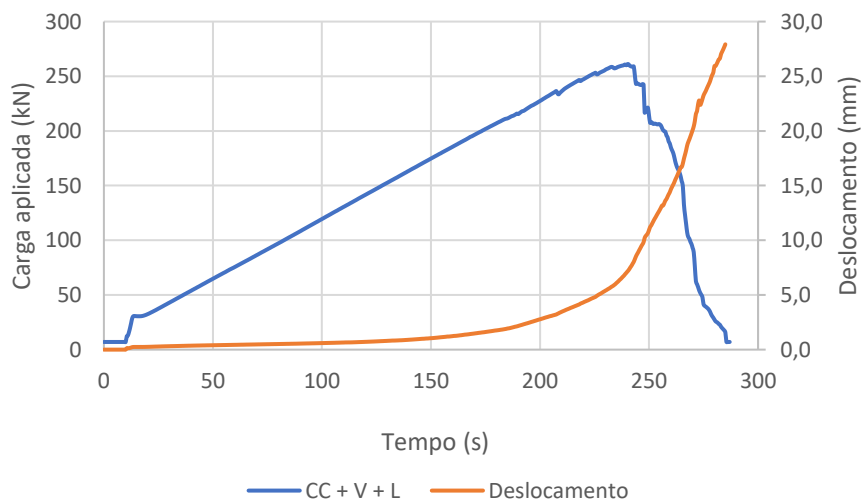


Figura 3.15 - História de carga e deslocamentos verticais do ensaio de compressão axial do murete M212

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

Através da análise da Figura 3.15, é possível observar que após a estabilização da velocidade de aplicação de carga, esta manteve-se constante no valor de 1 kN/s até o murete atingir a rotura. O deslocamento é calculado pela média dos registos obtidos por ambos os defletómetros posicionados sobre a viga metálica do pórtico.

A rotura ocorreu para uma força aplicada pelo macaco hidráulico correspondente a 261,2 kN aos 240 segundos. Na Figura 3.16 apresenta-se o diagrama força-deslocamento. O diagrama foi considerado até uma perda de capacidade resistente de 25% em relação à força máxima, ou seja, até 75% da carga aplicada máxima ($75\% F_{v,máx}$).

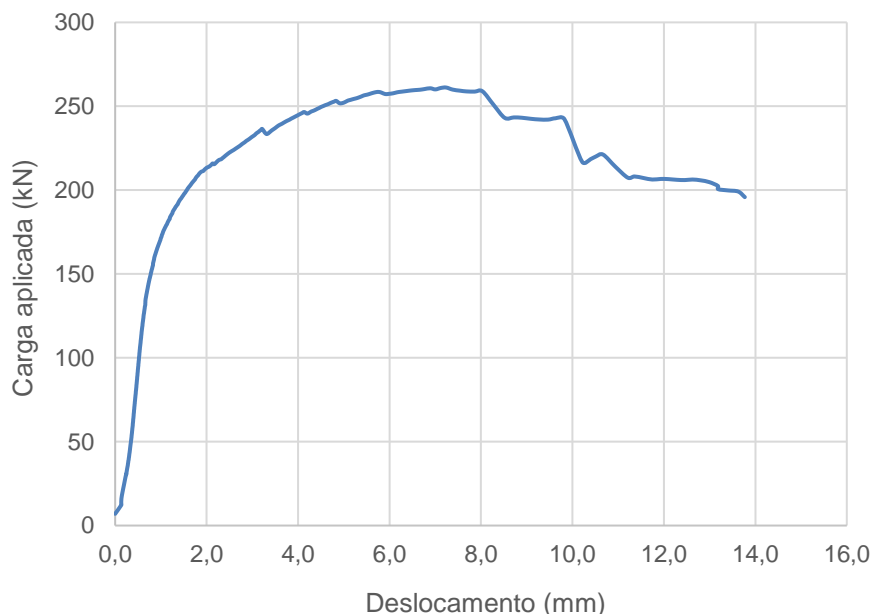
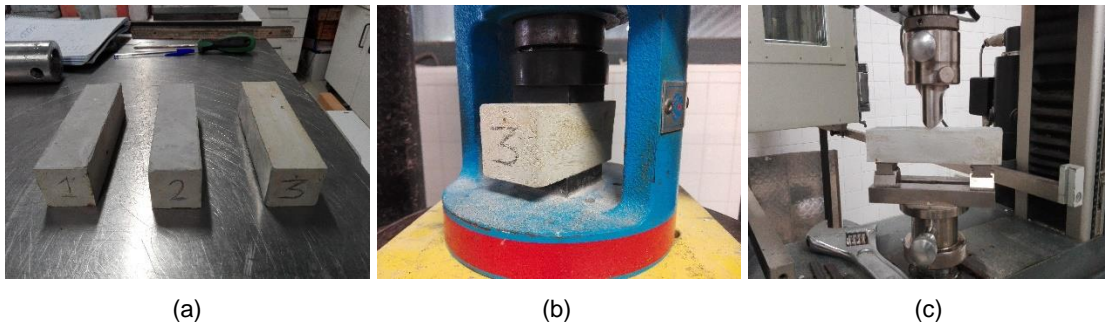


Figura 3.16 - Diagrama força-deslocamento do ensaio de compressão axial do murete M212

3.5 Caracterização da calda de cimento

Para caracterizar mecanicamente a calda de cimento injetada nos rasgos do murete, utilizaram-se provetes prismáticos de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, para determinar a resistência à flexão e à compressão a uma velocidade de 0,7 mm/min e 500 N/s, respetivamente. Como referido anteriormente, foram realizadas 3 injeções dos rasgos realizados no murete M212, uma para o rasgo inferior do murete, outra para o superior e uma terceira, de ambos os rasgos, no final dos ensaios de macacos planos, para permitir a realização do ensaio de compressão axial, numeradas pela ordem de realização como 1ª, 2ª e 3ª, respetivamente. Todos os provetes, estiveram condicionados a uma temperatura $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e a uma humidade relativa de $65 \pm 5\%$, até serem ensaiados. Os ensaios estão ilustrados na Figura 3.17.



(a) provetes de calda de cimento; (b) ensaio de compressão axial; (c) ensaio à flexão

Figura 3.17 - Ensaio mecânicos realizados nos provetes de calda de cimento

A resistência à flexão (σ_t) é calculada através da expressão 3.1.

$$\sigma_t = \frac{M}{I} v = \frac{12}{4} \times \frac{N \times L}{b \times h^3} \times \frac{h}{2} = \frac{3}{2} \times \frac{N \times L}{b \times h^2} \quad 3.1$$

Em que:

- M momento fletor;
- I momento de inércia;
- v distância da linha neutra à fibra mais tracionada do provete;
- N carga máxima de flexão aplicada no provete;
- L distância entre os dois apoios do provete (100 mm);
- b largura da secção transversal do provete;
- h altura da secção transversal do provete.

A resistência à compressão (σ_{comp}) é calculada através da expressão 3.2.

$$\sigma_{comp} = \frac{F_{comp}}{A} \quad 3.2$$

Em que:

- F_{comp} carga última de compressão aplicada no provete;
- A área da secção do provete sujeita a compressão.

Em anexo, apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à flexão e compressão, Tabelas A.1 e A.2, respetivamente, dos provetes das caldas de cimento. Resumidamente, a calda de cimento da 1ª injeção apresenta uma resistência à flexão de $\sigma_t = 8,12$ MPa e

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

resistência à compressão de $\sigma_{comp} = 47,6$ MPa. A 2ª injeção tem $\sigma_t = 8,30$ MPa e $\sigma_{comp} = 46,0$ MPa e a 3ª injeção tem $\sigma_t = 6,14$ MPa e $\sigma_{comp} = 35,1$ MPa. Confirma-se então que as resistências à compressão destas caldas de cimento são muito superiores à da alvenaria, como referido anteriormente.

3.6 Determinação da profundidade de carbonatação

Após o ensaio de compressão axial procedeu-se à limpeza das superfícies do murete já desagregado e prosseguiu-se para a aspersão da solução alcoólica de fenolftaleína para se determinar a profundidade de carbonatação com recurso a uma régua e uma fita métrica, o processo encontra-se ilustrado na Figura 3.18.



(a) aspersão da solução alcoólica de fenolftaleína; (b) medição da profundidade de carbonatação

Figura 3.18 - Determinação da profundidade de carbonatação

Foram medidas 8 profundidades de carbonatação, em diferentes pontos e alturas. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.3, obtendo uma média da profundidade de carbonatação de 106 mm. Caso as medições efetuadas apresentassem valores iguais a 200 mm, profundidade correspondente a metade da espessura do murete, o mesmo encontrava-se totalmente carbonatado.

Tabela 3.3 - Profundidade de carbonatação do murete M212

Medição	Profundidade de carbonatação (mm)
1	100
2	100
3	95
4	100
5	95
6	135
7	100
8	120
Média	106

Capítulo 4

Análise e discussão de resultados

4.1 Considerações iniciais

O presente capítulo, apresenta a análise dos resultados dos ensaios descritos no capítulo anterior e comparação dos mesmos com os de outros autores. Primeiramente, na secção 4.2 analisa-se os resultados do ensaio de macacos planos simples. Na secção 4.3 aborda-se os resultados do ensaio de macacos planos duplo, na secção 4.4 os resultados do ensaio de compressão axial, avalia-se a profundidade de carbonatação na secção 4.5 e na secção 4.6 compara-se os valores obtidos nos ensaios de macacos planos duplo e compressão axial.

4.2 Ensaio de macacos planos simples

O valor da tensão instalada segundo o ensaio de macacos planos simples, abordado na secção 3.3.1, foi de $\sigma_m = 0,13$ MPa. A tensão aplicada sobre o murete pelo cilindro hidráulico foi igual a $\sigma_m = 0,25$ MPa, o que corresponde a um erro de -48% em relação à tensão aplicada. Esta diferença pode dever-se a várias razões. O facto de não ter sido possível obter a área de contacto efetiva entre o macaco plano e a alvenaria pode ter sido uma das razões, porque em ensaios simples, a tensão aplicada é muito inferior à aplicada em ensaios duplos, que por consequência, diminui a área efetiva de contacto entre o macaco plano e a parede, tornando mais importante a sua correta definição. Ao contrário de outros autores, nesta dissertação, decidiu-se colocar o conjunto de papel químico mais folhas brancas, entre a chapa metálica e a área de corte da alvenaria, porque entendeu-se que, colocar o conjunto entre o macaco plano e a chapa, não define corretamente a área efetiva de contacto, porque a chapa distribui a pressão exercida pelo macaco plano, não sendo possível determinar onde, por exemplo, existiria um espaço vazio na alvenaria. No entanto, não se considerou a dificuldade da remoção do macaco plano do rasgo, após o ensaio, sem danificar o conjunto de folhas e

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

também não se considerou o contacto das folhas com a água resultante do arrefecimento da serra de disco durante a abertura do rasgo. Tornando impercetível a visualização da delimitação da área de contacto efetiva nas folhas brancas. Outra razão, bastante provável, é a elevada heterogeneidade da alvenaria de pedra, juntamente com a fraca coesão da argamassa de cal aérea, impedindo um carregamento axial uniforme. Por fim, é possível que a injeção de calda de cimento realizada, tenha tido influência no resultado. No entanto, apesar disso, o resultado obtido foi bastante conservativo.

Na Tabela 4.1, comparam-se os valores entre as tensões estimadas, no caso de ensaios in-situ e tensões aplicadas, no caso de ensaios laboratoriais, com as tensões determinadas através dos ensaios de macacos planos simples, dos trabalhos de Vicente et al. (2015), Łątka e Matysek (2017), Lourenço e Gregorczyk (2000), Roque e Lourenço (2003) e da presente dissertação.

Tabela 4.1 - Comparação das tensões obtidas nos ensaios de macacos planos simples com as tensões instaladas

Autor	Ensaio	Alvenaria	σ_{ensaio} (MPa)	$\sigma_{\text{instalada}}$ (MPa)	Varição relativa à $\sigma_{\text{instalada}}$
(Vicente et al., 2015)	1	Pedra e cal aérea	0,360	0,193	86,5%
	2		0,258	0,242	6,6%
	3		0,145	0,246	-41,1%
	4		0,081	0,178	-54,5%
	5		0,240	0,178	34,8%
	6		0,062	0,110	-43,6%
	7		0,139	0,110	26,4%
	8		0,111	0,178	-37,6%
	9		0,162	0,227	-28,6%
(Łątka e Matysek, 2017)	1	Tijolo	1,540	1,590	-3,1%
	2		1,540	1,660	-7,2%
(Lourenço e Gregorczyk, 2000)	1	Blocos	0,420	0,344	22,0%
	2	"YTONG"	0,400	0,339	18,0%
(Roque e Lourenço, 2003)	1	Pedra e cal aérea	0,120	0,130	-7,7%
	2		0,120	0,130	-7,7%
	3		0,070	0,090	-22,2%
Presente dissertação	1	Pedra e cal aérea	0,130	0,250	-48,0%

Através da análise da Tabela 4.1, observa-se que existem bastantes ensaios com diferenças significativas entre a tensão obtida pelo ensaio de macacos planos simples e a tensão realmente instalada, no entanto não é detetado nenhum padrão claro. Repara-se que os valores com maiores discrepâncias pertencem às alvenarias de pedra, o que é expectável devido à heterogeneidade do material, as alvenarias de tijolo, têm erros bastante reduzidos, justificado pela sua grande homogeneidade. É possível concluir que os ensaios de macacos

planos têm maior hipótese de sucesso em alvenarias de tijolo do que de pedra e quanto menor for a tensão instalada, maior é a probabilidade de existir uma grande percentagem de erro.

4.3 Ensaio de macacos planos duplo

Apresenta-se na Figura 4.1 o diagrama tensão–deformação dos valores médios de extensão dos três alinhamentos verticais considerados, do ensaio de macacos planos duplo do murete M212.

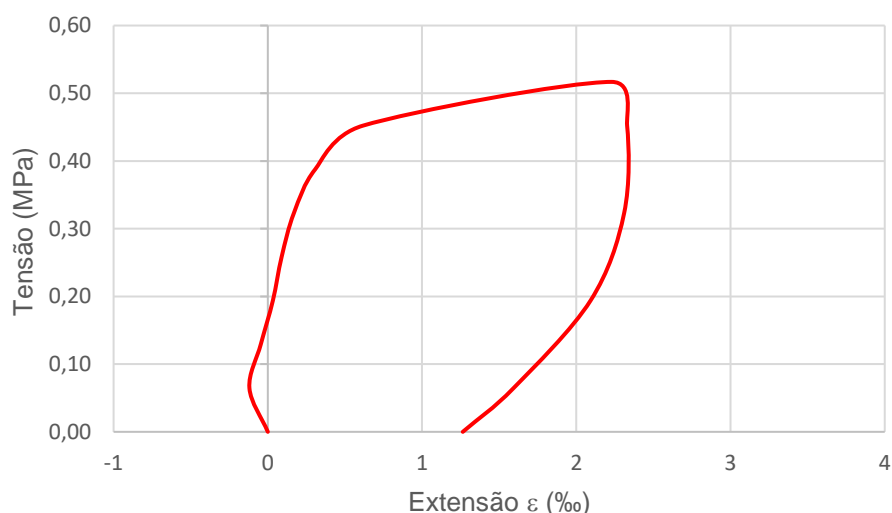


Figura 4.1 - Diagrama tensão-deformação dos valores médios do ensaio de macacos planos duplo do murete M212

Como descrito na secção 2.3.5, durante o ensaio de macacos planos duplo, normalmente existe uma aproximação dos alinhamentos verticais de miras, devido à pressão de compressão, exercida pelos macacos planos. Neste ensaio, isso não aconteceu, mas sim o oposto, existiu um afastamento dos alinhamentos verticais de miras, o que significa que estavam a ser exercidas, forças de tração na face exterior do murete. Uma possível justificação para este fenómeno, pode ser o facto de existir uma área significativa do macaco plano que não estava em contacto com a alvenaria durante o ensaio, como representado nas Figuras 3.8 e 3.12, exercendo compressão apenas no fundo do rasgo, provocando trações na face do murete. No entanto, os valores de deslocamento obtidos não são absurdos e decidiu-se utilizá-los, apesar de serem deslocamentos consequentes de forças de tração.

Analisando a Figura 4.1, observa-se que o murete entra em rotura para uma tensão de $\sigma_{comp} = 0,52$ MPa. Obtém-se o módulo de elasticidade do murete entre 30 e 60% da carga máxima ($E_{30-60\%}$), através do cálculo do declive do diagrama, nesse intervalo de valores. O módulo de elasticidade do murete M212 segundo o ensaio de macacos planos duplo é igual a $E_{30-60\%} = 948,8$ MPa.

4.4 Ensaio de compressão axial do murete M212

Para determinar a resistência à compressão axial do murete M212, calcula-se o quociente entre a carga máxima aplicada (261,2 kN) e a área em planta da alvenaria (1,20x0,40 m²), obtendo-se um valor de $\sigma_{comp} = 0,54$ MPa. A extensão é calculada através do quociente entre a média dos deslocamentos medidos pelos dois defletómetros e a altura do murete, 1,20 m.

Na Figura 4.2 apresenta-se o diagrama conjunto de força–deslocamento e tensão–deformação do ensaio de compressão axial do murete M212. Refere-se o acréscimo do peso da viga e do lintel à qual corresponde um valor de tensão de 0,015 MPa, sem que tenha sido feita a correção da extensão correspondente, por falta de dados exatos. O módulo de elasticidade do murete M212 é igual a $E_{30-60\%} = 510,9$ MPa.

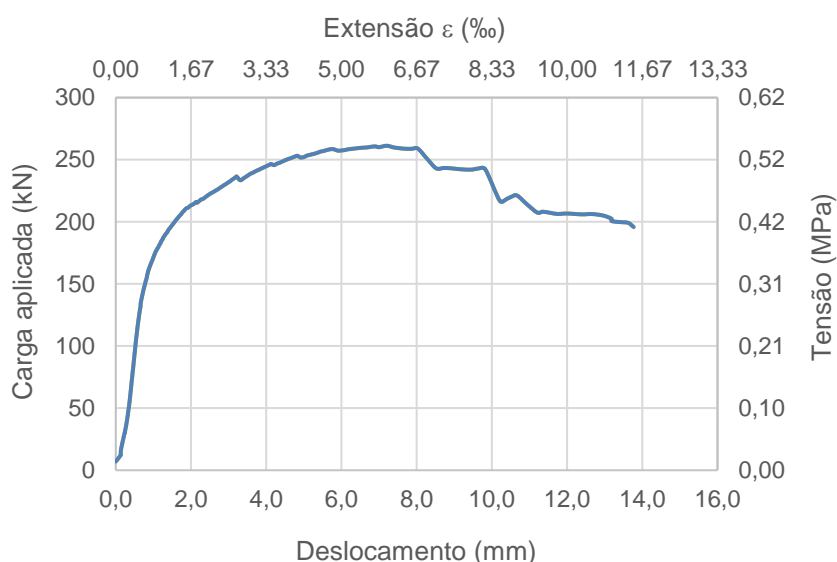


Figura 4.2 – Diagrama conjunto força-deslocamento e tensão-deformação do ensaio de compressão axial do murete M212

Como explicado anteriormente, os muretes utilizados na presente linha de investigação foram construídos numa segunda série em que se utilizaram os mesmos materiais, proporções e técnicas construtivas que a primeira série de muretes. Deste modo, os resultados obtidos no murete M212 são comparados com os muretes utilizados no âmbito desta linha de investigação e com alguns dos muretes construídos numa primeira série.

Primeiramente, apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão axial dos muretes da presente linha de investigação, incluindo os muretes ensaiados, por Martins (2014), Simões (2015), Hritiu (2016) e Rosa (2017). Na Figura 4.3 apresentam-se todos os resultados obtidos da resistência à compressão de muretes simples, não reforçados, da segunda série

construtiva, incluindo as idades de cada murete. Todos os resultados utilizados na Figura 4.3, encontram-se em anexo na Tabela A.3.

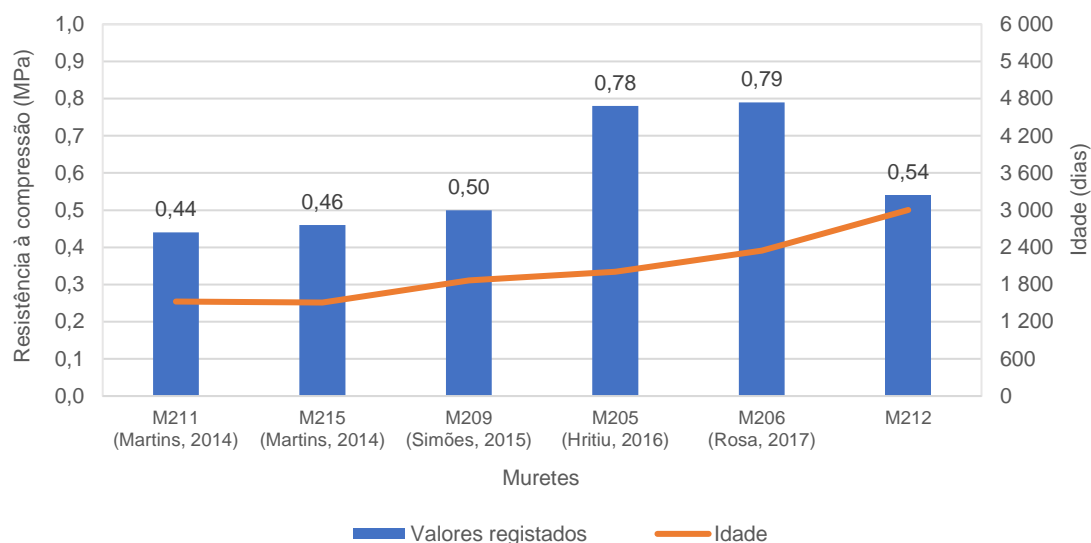


Figura 4.3 - Resultados da resistência à compressão dos muretes na presente linha de investigação

Analisando a Figura 4.3, é possível observar que os valores obtidos para a resistência à compressão dos muretes M205 e M206 são bastante superiores aos dos outros muretes. Uma possível explicação é a presença de elementos de confinamento transversal utilizados pelos autores, em ensaios de ligações pavimento-parede. Apesar de terem sido retirados todos os elementos dispensáveis ao ensaio de compressão, existem outros que passaram a ser inerentes aos muretes (varões de aço e calda de cimento), atribuindo-lhe resistência. Por outro lado, apesar de todos os muretes apresentados, terem sido construídos segundo os mesmos materiais, proporções e processos construtivos, é impossível obter a mesma resistência devido à heterogeneidade da alvenaria de pedra.

Observando apenas os muretes, M211, M215, M209 e M212, constata-se que existe um aumento da resistência à compressão dos muretes ao longo do tempo. Isto acontece porque, existe um aumento gradual da carbonatação dos muretes, como abordado na secção 2.5, influenciando a resistência das argamassas constituintes e por sua vez a resistência mecânica do murete, mostrando que, apesar da maior contribuição para a resistência do murete ser dada pela pedra, o colapso é condicionado pela argamassa de cal aérea.

A evolução da profundidade de carbonatação dos muretes, aumenta rapidamente nos anos iniciais, tornando-se mais lenta com o aumento da profundidade, sendo mais difícil a penetração de CO₂ no seu interior.

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

Esta análise mostra que a profundidade de carbonatação e a resistência mecânica não cresceram de igual forma ao longo do tempo. Admite-se que, à medida que a idade do murete aumenta, o incremento de resistência mecânica tenderá a aumentar mais lentamente que o avanço da profundidade de carbonatação, uma vez que, à medida que a profundidade de carbonatação aumenta linearmente, o “núcleo central” não carbonatado diminui cada vez menos, ou seja, a sua influência na resistência global da alvenaria tenderá a diminuir.

Em seguida, na Figura 4.4 compara-se a resistência à compressão do murete M212 com os muretes simples da primeira série construtiva de muretes, incluindo os muretes ensaiados por Pinho (2007), Morais (2011), Correia (2011) e Celis (2017). Todos os resultados utilizados na Figura 4.4, encontram-se em anexo na Tabela A.4.

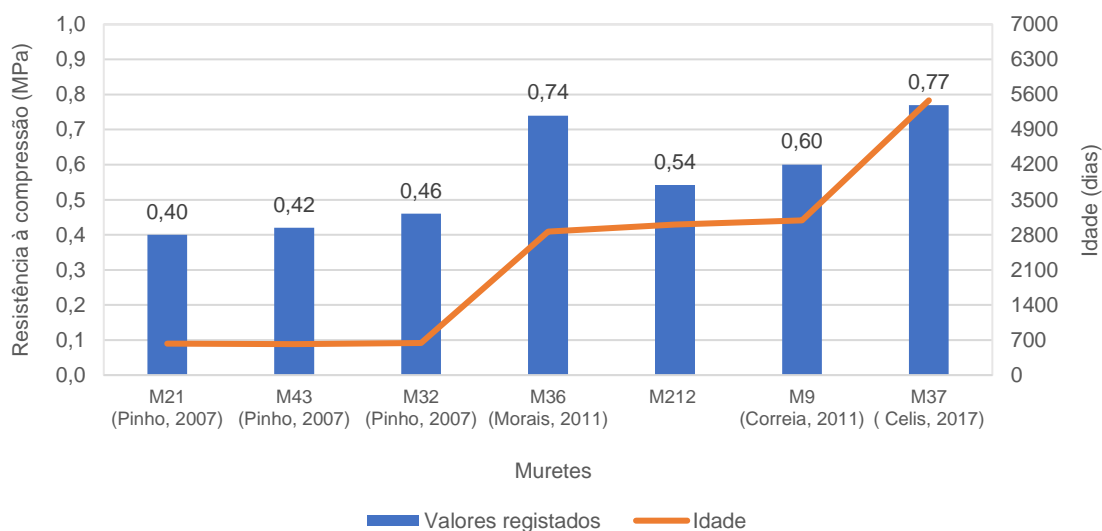


Figura 4.4 - Comparação de resultados entre o murete M212 e os muretes simples da primeira série construtiva de muretes

Com a análise da Figura 4.4, verifica-se que os muretes M21, M43 e M32 foram ensaiados relativamente na mesma altura e caracterizam-se por uma resistência à compressão da mesma ordem de grandeza. Observando o comportamento dos muretes, é possível observar, novamente, um aumento da resistência à compressão dos muretes ao longo do tempo, com a exceção do valor do murete M36, que é bastante superior ao esperado de acordo com a idade do murete.

Em seguida analisa-se a compatibilidade do resultado da resistência à compressão do murete M212, com a expressão 2.5 desenvolvida por Pinho e Lúcio (2017), utilizada para estimar a resistência à compressão de um modelo experimental de alvenaria em função da área carbonatada, aplicada apenas no contexto dos muretes de ambas as linhas de investigação referidas anteriormente.

Na Figura 4.5 apresenta-se a relação entre a resistência de compressão e o rácio de carbonatação (Ca/A), de todos os muretes simples, não reforçados, ensaiados até à data, de ambas as séries de construção dos muretes, com a exceção do murete M36, por apresentar um valor de resistência à compressão anómalo em relação aos restantes muretes, de acordo com a sua idade e os muretes M205, M206, M209 e M215, pela existência de varões de aço e calda de cimento, inerentes aos muretes, como referido anteriormente. Através da análise da Figura 4.5, constata-se que o valor da resistência à compressão do murete M212, é bastante inferior ao valor deduzido pela expressão 2.5, para o rácio Ca/A do murete (0,61), o mesmo acontece com outros muretes ensaiados após o desenvolvimento desta expressão. Note-se que a expressão 2.5 foi desenvolvida quando ainda apenas se tinham ensaiado 5 muretes e utilizou o valor do murete M36, que na altura não existiam dados suficientes para o considerar anómalo.

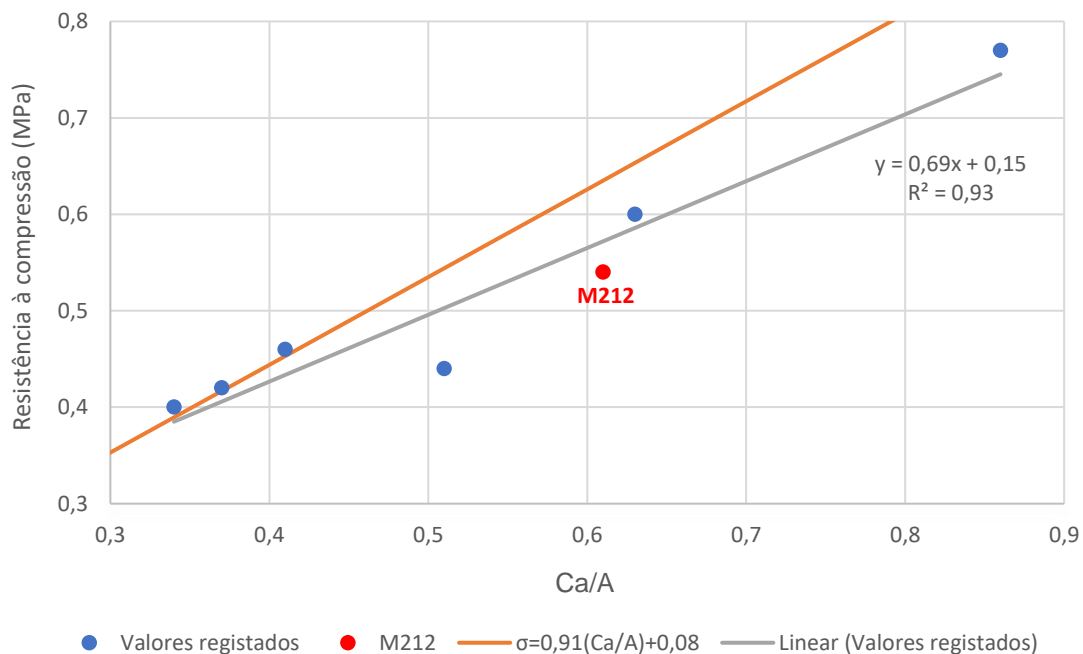


Figura 4.5 - Diagrama da evolução da resistência à compressão com o rácio de carbonatação (Ca/A) da argamassa de cal aérea, adaptado de (Pinho e Lúcio, 2017)

Posto isto, apresenta-se então uma nova expressão para estimar a resistência à compressão de um modelo experimental em alvenaria em função da área carbonatada, aplicada apenas no contexto de ambas as séries de construção dos muretes, referenciadas anteriormente. A expressão 4.1 é obtida por regressão linear dos valores apresentados na Figura 4.5. Todos os resultados utilizados neste procedimento, encontram-se em anexo na Tabela A.5.

$$\sigma^{\text{máx}} = 0,69 \times (Ca/A) + 0,15 \quad 4.1$$

4.5 Profundidade de carbonatação

Como referido anteriormente na secção 3.6, o valor médio das medições da profundidade de carbonatação efetuadas no murete M212 foi de 106 mm. Na Figura 4.6 apresenta-se o valor médio obtido da profundidade de carbonatação do murete M212, bem como, os valores correspondentes aos muretes de ambas as séries de construção, ensaiados por Pinho (2007), Pinho et al. (2012), Martins (2014), Simões (2015), Hritiu (2016), Justiniano (2016), Rosa (2017), Morais (2011), Fonseca (2010), Correia (2011), Rodrigues (2011), Freire (2011) e Celis (2017). Todos os resultados utilizados na Figura 4.6, encontram-se em anexo na Tabela A.6.

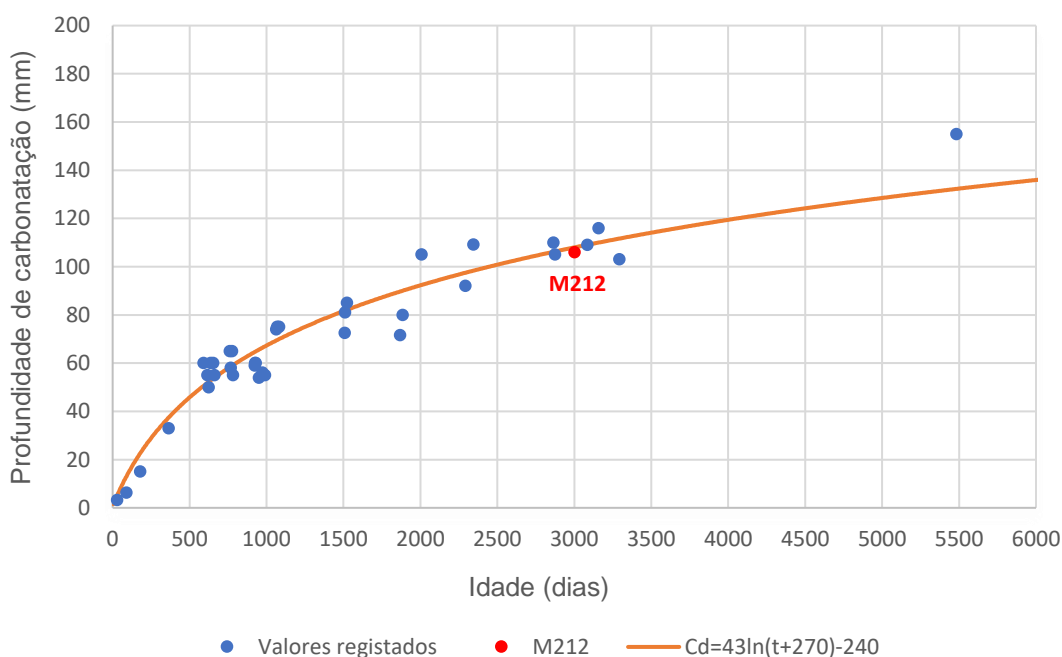


Figura 4.6 - Diagrama de evolução da profundidade de carbonatação do murete ao longo do tempo, adaptado de (Pinho e Lúcio, 2017)

Com a análise da Figura 4.6, observa-se que a profundidade de carbonatação da alvenaria do murete M212 está na mesma linha evolutiva que os restantes muretes, sabendo que o murete M212 tem uma idade de 3003 dias, é possível determinar a profundidade de carbonatação expectável em função da idade do murete (dias), aplicando a expressão 2.4 desenvolvida por Pinho e Lúcio (2017), no âmbito da linha de investigação da primeira série construtiva de muretes. Obtém-se então, uma profundidade de carbonatação expectável de 108 mm, que corresponde a uma variação de 1,9% em relação à profundidade realmente medida, provando ser uma estimativa bastante exata para o caso do murete M212, que faz parte da segunda série construtiva. Esta evolução da profundidade de carbonatação das alvenarias em função do tempo era expectável, uma vez que os materiais, as suas proporções e as técnicas construtivas utilizadas foram as mesmas nas duas séries construtivas de muretes.

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

Apresenta-se na Figura 4.7 o diagrama conjunto tensão-deformação do ensaio de compressão axial e de macacos planos duplo do murete M212.

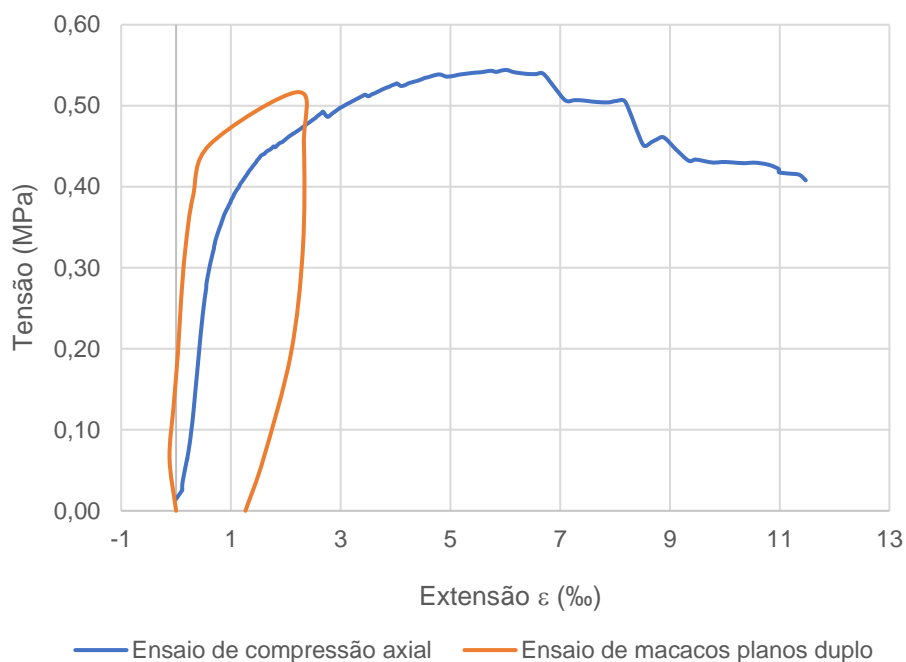


Figura 4.7 – Diagrama conjunto tensão-deformação do ensaio de compressão axial e de macacos planos duplo

Através da análise da Figura 4.7, verifica-se que no ensaio de macacos planos duplo, o murete M212 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. Continuando o estudo efetuado por Vicente et al. (2010) e Vicente et al. (2015), abordado na secção 2.6.1 e 2.6.2, respetivamente, os valores dos módulos de elasticidade são comparados com os valores $1000 \times f_k$, segundo o Eurocódigo 6 (CEN, 2005), Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Comparação de módulos de elasticidade

Ensaio	$E_{30-60\%}$ (Mpa)	$1000 \times \sigma_{\acute{u}lt}$ (Mpa)
Macacos planos	948,8	520
Compressão axial	510,9	540

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

Através da análise da Tabela 4.2, observa-se que o módulo de elasticidade do ensaio de macacos planos duplo apresenta uma diferença de 85,7% em relação ao módulo de elasticidade do ensaio de compressão axial. Esta diferença ainda é um pouco 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. Como abordado na secção 2.6.2, Vicente et al. (2015), 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 apresenta algumas limitações nesse aspeto. O módulo de elasticidade segundo o Eurocódigo 6 enquadra-se neste tipo de alvenaria, de acordo com o ensaio de compressão axial.

Capítulo 5

Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo sintetiza-se de forma global o trabalho desenvolvido na presente dissertação e elaboram-se diversas conclusões baseadas na análise e discussão dos resultados experimentais e analíticos.

5.2 Conclusões

Em termos de pesquisa bibliográfica, foram analisados alguns trabalhos de ensaios in-situ em alvenaria de pedra e cal aérea e trabalhos laboratoriais de alvenarias diversas, mas não se encontrou nem a nível nacional ou internacional, ensaios laboratoriais em alvenarias de pedra e cal aérea, que foi o tema deste trabalho.

Em relação ao ensaio de macacos planos simples, a estimativa da tensão instalada sobre o murete, resultou num erro de -48% em relação à tensão aplicada. Possíveis razões podem ser, o facto de não ter sido possível obter a área de contacto efetiva entre o macaco plano e a alvenaria, a elevada heterogeneidade da alvenaria de pedra, juntamente com a fraca coesão da argamassa de cal aérea, impedindo um carregamento axial uniforme e também é possível que a injeção de calda de cimento realizada, tenha tido influência no resultado. Da comparação do ensaio simples com os de outros autores, é possível concluir que os ensaios de macacos planos simples têm maior hipótese de sucesso em alvenarias de tijolo do que de pedra e quanto menor for a tensão instalada, maior é a probabilidade de existir uma grande percentagem de erro.

A comparação do resultado da resistência à compressão do murete M212 dado pelo ensaio de macacos planos duplo e pelo ensaio de compressão axial, apresenta uma diferença de apenas 3,7%. Este resultado, apesar de ser único, permite reforçar a eficácia da técnica de macacos

planos duplo para a determinação da resistência à compressão. O módulo de elasticidade do ensaio de macacos planos duplo apresenta uma diferença de 85,7% em relação ao módulo de elasticidade do ensaio de compressão axial. Esta diferença ainda é um pouco 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. Conclui-se 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. O módulo de elasticidade segundo o Eurocódigo 6 enquadra-se neste tipo de alvenaria, de acordo com o ensaio de compressão axial.

A medição da profundidade de carbonatação do murete M212 foi de 10,6 cm e encontra-se dentro dos valores previstos para a idade do murete. Constata-se que existe um aumento da resistência à compressão dos muretes ao longo do tempo. Isto acontece porque, existe um aumento gradual da carbonatação dos muretes, influenciando a resistência das argamassas constituintes e por sua vez a resistência mecânica do murete, mostrando que, apesar da maior contribuição para a resistência do murete ser dada pela pedra, o colapso é condicionado pela argamassa de cal aérea.

Por fim, tendo em conta todos os resultados dos ensaios de muretes analisados, apresenta-se uma nova expressão (expressão 4.1) para estimar a resistência à compressão de um modelo experimental em alvenaria em função da área carbonatada, aplicada apenas no contexto de ambas as séries de construção dos muretes, abordados nesta dissertação.

5.3 Desenvolvimentos futuros

Nesta linha de investigação, propõe-se a continuação da realização dos ensaios de macacos planos criando uma base de dados que permite uma comparação de resultados mais abrangente. No caso de serem realizados ensaios de macacos planos em muretes constituídos com o mesmo tipo de argamassa, aconselha-se a realizar o rasgo na alvenaria, ao longo das pedras ao invés de ao longo da argamassa, por esta ser de fraca coesão. Certificando-se que existe uma separação completa das duas metades das pedras.

Caso se continue uma série de ensaios de macacos planos em muretes de alvenaria de pedra e se continue a observar, como no caso desta dissertação, uma grande diferença entre a tensão instalada sobre o murete e o resultado obtido no ensaio de macacos planos simples e se esta diferença apresentar algum padrão recorrente, apresenta-se a possibilidade da criação de um novo fator corretivo, denominado por exemplo, k_c , de maneira a corrigir o valor da tensão registada durante o ensaio, juntando-se aos fatores k_a e k_m , sendo que este fator só seria

aplicável em ensaios realizados nos muretes de alvenaria de pedra dentro da linha de investigação abordada na presente dissertação.

Realçando a importância da determinação da área de contacto efetiva do macaco plano com a alvenaria, recomenda-se a utilização de papel químico entre duas folhas brancas, à semelhança deste trabalho, mas ao invés de colocar este conjunto entre a chapa metálica e a alvenaria, colocar entre a chapa metálica e o macaco plano, de forma a não comprometer as folhas, devido à água que resulta da abertura do rasgo na alvenaria.

Propõem-se também a continuação do estudo dos ensaios de compressão axial de mais muretes, para avaliar a evolução da resistência à compressão com a evolução da profundidade de carbonatação.

Referências bibliográficas

Abdunur, C. (1983). Stress and deformability in concrete and masonry. IABSE Symp. Strength. Build. Struct. - Diagn. Ther. Veneza, Itália.

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. Archit. Herit. 8, 376–407.

ASTM (2004). C 1197 - Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Deformability Properties Using the Flatjack Method.

ASTM (2009). C 1196 - Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements.

Binda, L., Rossi, P., Landriani, G., and Sacchi, G. (1983). Diagnostic Analysis of Masonry Buildings. IABSE Symp. Strengthening Build. Struct. Veneza, Itália.

Celis, V. (2017). Caracterização mecânica de paredes de alvenaria de pedra. Dissertação de mestrado. FCT NOVA

CEN (2005). Eurocode 6 - Design of masonry structures -Part 1-1: General Rules for reinforced and unreinforced masonry structures.

Correia, J. (2011). Análise experimental de um murete de alvenaria de pedra tradicional de grandes dimensões. Dissertação de mestrado. FCT NOVA

Coutinho, A. (1997). Fabrico e propriedades do betão (Lisboa). Volume 1, 3ª Edição. Lisboa.

Fonseca, M. (2010). Análise experimental de um murete de alvenaria de pedra tradicional reforçado com confinamento transversal contínuo por fitas metálicas. Dissertação de mestrado. FCT NOVA.

Freire, P. (2011). Análise experimental de um murete de alvenaria de pedra tradicional reforçado com confinamento transversal anelar por fitas metálicas. Dissertação de mestrado. FCT NOVA.

Hritiu, V. (2016). Análise experimental da ligação por pregagens entre pavimentos e paredes de alvenaria de pedra tradicional. Dissertação de mestrado. FCT NOVA.

Instituto Nacional de Estatística, (2013). Ed., Censos 2011 Resultados Definitivos - Portugal.

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

Justiniano, C. (2016). Ligação por pregagens entre pavimentos e paredes de alvenaria reforçadas. Dissertação de mestrado. FCT NOVA

Łątka, D., and Matysek, P. (2017). The Estimation of Compressive Stress Level in Brick Masonry Using the Flat-jack Method. *Procedia Eng.* 193, 266–272.

LNEC (1970). An improved method and apparatus for testing stresses in soil. Portugal.

Lourenço, P.B., and Gregorczyk, P. (2000). A Review on Flat-Jack Testing. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.

Martins, S. (2014). Ligações pavimento/parede com pregagens para reabilitação de edifícios antigos. Dissertação de mestrado. FCT NOVA.

Miranda, L. (2011). Ensaios acústicos e de macacos planos em alvenarias resistentes. Tese de doutoramento. Universidade do Porto.

Morais, H. (2011). Análise experimental de um murete de alvenaria de pedra tradicional. Dissertação de mestrado. FCT NOVA

Noland, J.L., Atkinson, R.H., and Schuller, M.P. (1990). A review of the flat-jack method for nondestructive evaluation. *Nondestruct. Eval. Civ. Struct. Mater.* Boulder, EUA.

Pinho, F. (2007). Paredes de alvenaria ordinária: estudo experimental com modelos simples e reforçados. Tese de doutoramento. FCT NOVA.

Pinho, F., and Lúcio, V. (2017). Rubble stone masonry walls in Portugal material properties, carbonation depth and mechanical characterization. *Int. J. Archit. Herit.*

Pinho, F., Lúcio, V., and Baião, M. (2012). Rubble stone masonry walls in Portugal strengthened with reinforced micro concrete layers. *Bulletin of Earthquake Engineering.* 10.1, 161-180.

Qinglin, W., and Xiuyi, W. (1988). The evaluation of compressive strength of brick masonry in-situ. 8 th Int. Brick/Block Mas. Conf., Dublin, Irlanda

RILEM (2004a). RILEM Recommendation MDT. D.4: In-situ stress tests based on the flat jack.

RILEM (2004b). RILEM Recommendation MDT. D.5 – In-situ stress - strain behaviour tests based on the flat jack.

Rodrigues, P. (2011). Análise experimental de um murete de alvenaria de pedra tradicional de grandes dimensões. Efeito do confinamento transversal contínuo por fitas metálicas. Dissertação de mestrado. FCT NOVA

Ronca, P., Tiraboschi, C., and Binda, L. (1997). In-situ flatjack tests matching new mechanical interpretations. China.

Roque, J., and Lourenço, P. (2003). Caracterização Mecânica de Paredes Antigas de Alvenaria. Um Caso de Estudo no Centro Histórico de Bragança.

Rosa, B. (2017). Ligação pavimento-paredes de edifícios antigos por conectores metálicos. Avaliação experimental. Dissertação de mestrado. FCT NOVA

Rosa, C. (2013). Caracterização de alvenarias de pedra antigas. Dissertação de mestrado. FCT NOVA

Rossi, P. (1982). Analysis of Mechanical Characteristics of Brick Masonry by Means of non-destructive “in Situ” Tests.

Rossi, P. (1985). Flat - jack test for the analysis of mechanical behaviour of brick masonry structures.

Rufo, R. (2010). Ensaios de caracterização mecânica das alvenarias de adobe: flat-jack testing. Dissertação de mestrado. Universidade de Aveiro.

Simas, M. (2007). Sistemas de protecção do betão face à carbonatação. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

Simões, L. (2015). Ligação pavimentos/paredes de edifícios antigos. Ensaios e verificações de projeto. Dissertação de mestrado. FCT NOVA.

Vicente, R., Silva, J., Varum, H., Costa, A., Ferreira, T., Figueiredo, A., and 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.

Vicente, R., Ferreira, T., Silva, J., and Varum, H. (2015). In Situ Flat-Jack Testing of Traditional Masonry Walls: Case Study of the Old City Center of Coimbra, Portugal. *Int. J. Archit. Herit.* 9, 794–810.

Anexos

Anexo I

Em seguida apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização da calda de cimento, utilizada nas injeções.

Tabela A.1 - Resistência à flexão dos provetes de calda de cimento

Nº injeção	Provetes	idade (dias)	Flexão		
			Carga de rotura (N)	Média	Tensão de rotura σ_t (MPa)
1 ^a	1	36	3332,5	3465,6	8,12
	2		3352,1		
	3		3712,3		
2 ^a	1	32	3357,2	3540,0	8,30
	2		3513,8		
	3		3749,1		
3 ^a	1	3	2574,6	2620,2	6,14
	2		2703,2		
	3		2582,8		

Tabela A.2 - Resistência à compressão dos provetes de calda de cimento

Nº injeção	Provetes	idade (dias)	Compressão		
			Carga de rotura (kN)	Média	Tensão de rotura σ_{comp} (Mpa)
1 ^a	1	36	72	76,2	47,6
			51		
			62		
			95		
			84		
2 ^a	2	32	93	73,7	46,0
			84		
			76		
			64		
			73		
3 ^a	3	3	82	56,2	35,1
			63		
			45		
			53		
			58		
			56		
			68		
			57		

Anexo II

Em seguida apresentam-se os resultados de ensaios realizados nos muretes.

Tabela A.3 - Resultados dos ensaios de muretes da segunda série construtiva

Autor	Murete	σ_{comp} (Mpa)	Idade (dias)
(Martins, 2014)	M211	0,44	1523
	M215	0,46	1509
(Simões, 2015)	M209	0,5	1869
(Hritiu, 2016)	M205	0,78	2008
(Rosa, 2017)	M206	0,79	2345
Presente dissertação	M212	0,54	3003

Tabela A.4 - Resultados dos ensaios de muretes da primeira série construtiva

Autor	Murete	σ_{comp} (Mpa)	Idade (dias)
(Pinho, 2007)	M21	0,4	626
	M43	0,42	618
	M32	0,46	638
(Morais, 2011)	M36	0,74	2866
Presente dissertação	M212	0,54	3003
(Correia, 2011)	M9	0,6	3087
(Celis, 2017)	M37	0,77	5484

Tabela A.5 - Resistência à compressão, profundidade de carbonatação e rácio (Ca/A) dos muretes, adaptado de (Pinho e Lúcio, 2017)

Autor	Murete	σ_{comp} (Mpa)	Cd (mm)	Ca/A
(Pinho, 2007)	M21	0,4	50	0,34
	M43	0,42	55	0,37
	M32	0,46	60	0,41
(Martins, 2014)	M211	0,44	85	0,51
Presente dissertação	M212	0,54	106	0,61
(Correia, 2011)	M9	0,6	109	0,63
(Celis, 2017)	M37	0,77	155	0,86

Tabela A.6 - Profundidade de carbonatação média dos muretes ao longo do tempo, adaptado de (Pinho e Lúcio, 2017)

Autor	Murete	Idade (dias)	Profundidade de carbonatação (Cd) (mm)
Muretes não reforçados (Pinho, 2007)	M14, M20	30	3,2
	M27, M37	90	6,3
	M49, M50	180	15
	M57, M60	365	33
	M20	593	60
	M43	618	55
	M21	626	50
	M32	638	60
	M5	654	60
	M12	662	55
Solução de reforço IIB (Pinho et al., 2012)	M53	762	65
	M51	769	58
	M42	777	65
	M30	784	55
Solução de reforço I (Pinho, 2007)	M41	925	59
	M44	927	60
	M28	931	60
	M10	952	54
	M13	974	56
Solução de reforço III (Pinho et al., 2012)	M17	992	55
	M25	1065	74
	M55	1070	75
(Martins, 2014)	M24	1083	75
	M215	1509	72,5
	M216	1512	81
(Simões, 2015)	M211	1523	85
	M209	1869	71,6
(Hritiu, 2016)	M213	1886	80
(Justiniano, 2016)	M205	2008	105
(Rosa, 2017)	M214	2293	92
(Morais, 2010)	M206	2345	109,2
(Fonseca, 2010)	M36	2866	110
Presente dissertação	M45	2876	105
(Correia, 2011)	M212	3003	106
(Rodrigues, 2011)	M9	3087	109
(Freire, 2011)	M8	3158	116
(Celis, 2017)	M40	3294	103
	M37	5484	155