

# Paredes resistentes de alvenaria de tijolo reforçadas com revestimentos armados

Load-bearing brick masonry walls strengthened with reinforced renders

Ana Isabel Marques  
Paulo Xavier Candeias  
João Gomes Ferreira  
António Santos Silva  
Maria do Rosário Veiga

## Resumo

As construções antigas fazem parte do tecido histórico das cidades, pelo que é importante proceder a intervenções de reabilitação eficientes, mas não destruidoras da sua identidade e valor cultural intrínseco. No contexto do reforço sísmico, a utilização de rebocos armados apresenta-se como uma solução simples e pouco intrusiva. Os rebocos armados em paredes conferem um aumento da resistência e da ductilidade ao corte (no plano) e da ductilidade à flexão (fora do plano), um aumento da resistência superficial e permitem ainda um melhor controlo da fendilhação.

Neste artigo será apresentada a caracterização experimental dos materiais constituintes das alvenarias (argamassas de assentamento, argamassas de revestimento e tijolos), e os resultados obtidos em ensaios de compressão diagonal de pequenos provetes de alvenaria, com e sem a aplicação de rebocos armados.

## Abstract

Old buildings are part of the historic heritage of cities, so it is important to carry out efficient rehabilitation interventions, but not destructive of their identity and intrinsic cultural value. In the context of seismic strengthening, the use of reinforced plasters constitutes a simple, effective and little intrusive solution. Reinforcement renders supply increased strength and shear ductility (in-plane) and bending ductility (out-of-plane), as well as surface strength and better cracking control of masonry walls.

In this paper, the constituent materials of masonry (bedding mortars, coating mortar and bricks) will be characterized, and the results obtained in diagonal compression tests of small masonry specimens, with and without the application of reinforced renders, will be presented.

**Palavras-chave:** Paredes resistentes de alvenaria / Ensaios de compressão diagonal / Rebocos armados

**Keywords:** Load-bearing walls / Diagonal compression tests / Reinforced renders

## Ana Isabel Marques

Mestrado/Bolsista de Doutoramento  
LNEC  
Lisboa, Portugal  
aimarques@lnec.pt

## Paulo Xavier Candeias

Doutoramento/Investigador Auxiliar  
LNEC  
Lisboa, Portugal  
pcandeias@lnec.pt

## João Gomes Ferreira

Doutoramento/Professor Associado  
CERIS/IST  
Lisboa, Portugal  
joao.gomes.ferreira@tecnico.ulisboa.pt

## António Santos Silva

Doutoramento/Investigador Auxiliar  
LNEC  
Lisboa, Portugal  
ssilva@lnec.pt

## Maria do Rosário Veiga

Doutoramento/Investigadora Principal com Habilitação  
LNEC  
Lisboa, Portugal  
rveiga@lnec.pt

### Aviso legal

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

### Legal notice

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

MARQUES, A. I. [et al.] – Paredes resistentes de alvenaria de tijolo reforçadas com revestimentos armados. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 10. ISSN 2183-8488. (julho 2019) 5-18.

## 1 Introdução

Parte dos edifícios de alvenaria da cidade de Lisboa apresenta um elevado estado de degradação e, como consequência, uma maior vulnerabilidade às ações sísmicas. Apesar de todos os avanços científicos que se têm alcançado no contexto da vulnerabilidade sísmica e do reforço estrutural desses edifícios, verifica-se ainda a necessidade de continuar a desenvolver investigação neste domínio, tendo em conta a minimização do risco para as vidas humanas.

Por um lado, o conhecimento das características das paredes resistentes de alvenaria é um dos aspetos que ainda apresentam lacunas, principalmente devido à dificuldade na obtenção de provetes representativos. Por outro lado, o crescente interesse na reabilitação desses edifícios contribui para a busca de soluções de reforço que sejam compatíveis com as técnicas construtivas originais, sendo igualmente importante garantir que essas técnicas de reforço, para além da parte estética e funcional, permitam também reduzir a vulnerabilidade sísmica desses edifícios.

Para além das técnicas tradicionais de reforço, tais como tirantes, lajes metálicas, diafragmas horizontais, injeções ou conectores transversais [1], existem outras soluções de reforço à base de argamassas e compósitos que oferecem uma melhoria significativa da resistência sem modificar drasticamente a massa e a geometria estrutural.

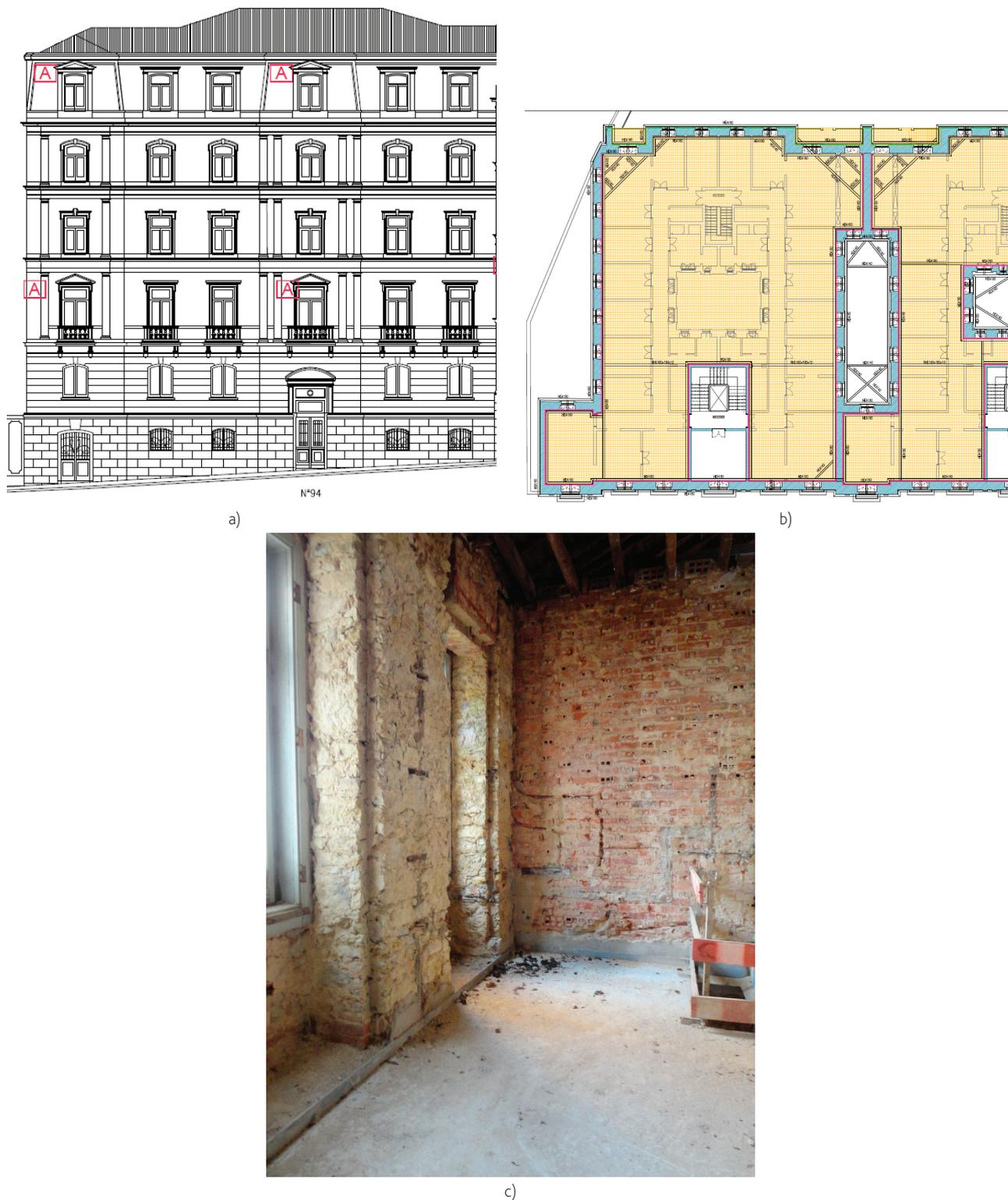
Os materiais compósitos reforçados com fibras são bastante utilizados em edifícios históricos pois, para além de cumprirem critérios específicos de preservação [2], melhoram a permeabilidade ao vapor de água, a compatibilidade entre materiais, têm uma aplicabilidade mais rápida e custos mais baixos, assim como uma maior resistência ao fogo.

Recentemente existem trabalhos de investigação sobre a caracterização mecânica de revestimentos armados, nomeadamente no estudo sobre o comportamento à tração [3] e ligação entre a argamassa e o suporte [4 e 5]. Alguns destes estudos têm sido desenvolvidos em provetes de média escala [6 e 7].

Este artigo apresenta os resultados obtidos em termos de força máxima atingida em ensaios de compressão diagonal de pequenos provetes de paredes, designados por *muretes*, que foram retirados diretamente de um edifício com paredes resistentes de alvenaria, o qual estava a ser submetido a obras de reabilitação. Como base de comparação com os resultados obtidos nos provetes originais, são também apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compressão diagonal em paredes construídas para o efeito e reforçadas com reboco à base de cal hidráulica natural NHL 3,5 e com reboco à base de cimento, em ambos os casos armados com redes de fibra de vidro.

## 2 Identificação do caso de estudo

Foi localizado um edifício no centro da cidade de Lisboa cujas paredes resistentes de alvenaria são representativas da tipologia de estudo e que iria ser sujeito a obras de reabilitação. Dado que parte do edifício se encontrava num estado muito avançado de degradação, houve necessidade de proceder a demolições localizadas. Destas zonas de demolições foram retiradas amostras de paredes reais, com a finalidade de serem caracterizadas experimentalmente.



**Figura 1** Edifício de estudo: a) alçado principal; b) planta do piso tipo identificando o local de onde foram retiradas as amostras e c) exemplo de uma parede do edifício



Figura 2 Preparação dos provetes de argamassa de revestimento e assentamento

O referido edifício é constituído por um piso térreo parcialmente enterrado e cinco pisos elevados. As paredes do edifício são resistentes, sendo que as fachadas são constituídas por alvenaria de pedra ordinária, e as paredes interiores são constituídas por alvenaria de tijolo maciço, no piso térreo, e de tijolo furado, nos pisos elevados. Na Figura 1 apresenta-se o alçado e uma planta tipo do edifício alvo de estudo, assim como é identificada (retângulo encarnado) a zona de onde foram retiradas as amostras de parede dos diversos pisos escolhidos.

### 3 Caracterização dos materiais

#### 3.1 Argamassas

Relativamente à recolha de argamassas de assentamento do edifício de estudo, escolheram-se várias zonas das paredes onde as juntas horizontais eram mais espessas. Para a recolha de argamassas de revestimento foram escolhidas zonas aleatórias pois os revestimentos apresentavam em geral um ótimo estado de conservação. As amostras retiradas do edifício de estudo foram divididas em provetes de menor dimensão e devidamente preparadas de acordo com o ensaio a que se destinavam, conforme

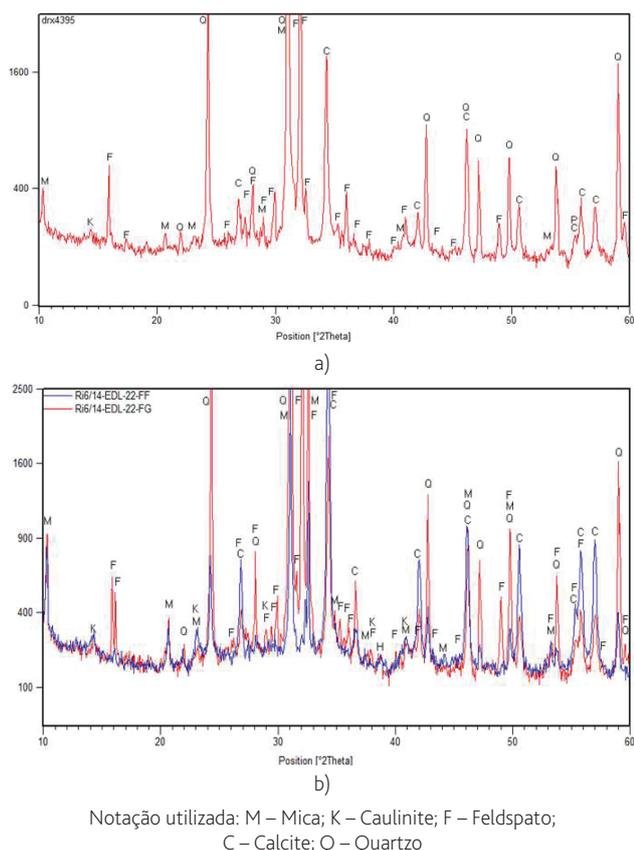
se ilustra na Figura 2.

#### 3.1.1 Ensaios químicos e mineralógicos

Os ensaios químicos e mineralógicos realizados às argamassas de assentamento e revestimento, nomeadamente os ensaios de difração de raios X, análise termogravimétrica e térmica diferencial e determinação do resíduo insolúvel em ácido, foram realizados na Unidade de Caracterização Mineralógica e Microestrutural de Materiais (U3M) do Departamento de Materiais do LNEC.

A análise por DRX baseia-se na propriedade de os raios X, radiações de comprimento de onda da ordem de grandeza das distâncias interatómicas, poderem ser difratados pelos cristais, segundo orientações bem definidas. Esta técnica permite assim a identificação dos compostos cristalinos presentes nas amostras em pó.

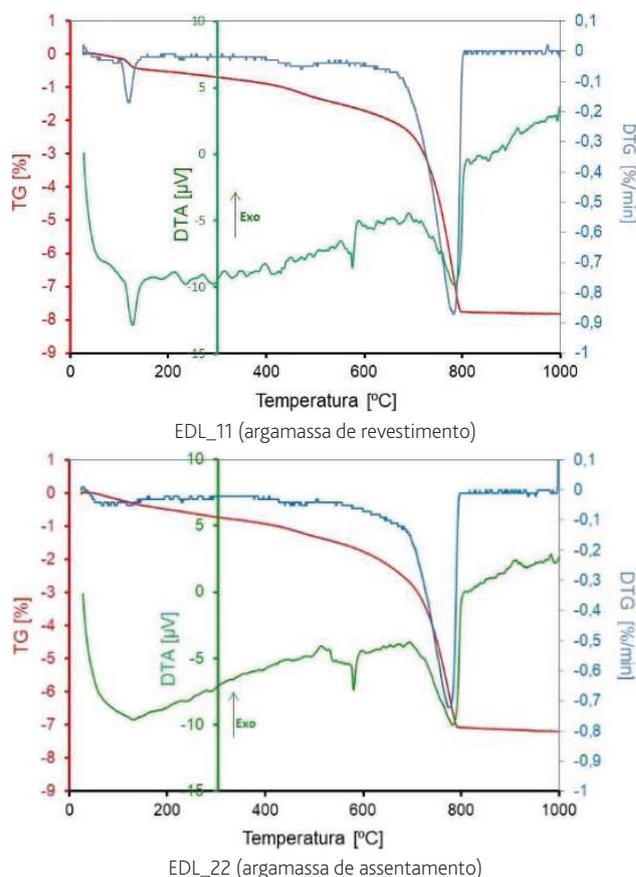
Foram preparadas e ensaiadas duas amostras de argamassa, uma de revestimento e outra de assentamento. Os fragmentos de cada argamassa foram suavemente desagregados com martelo, de forma a não partir os grãos de agregado, tendo-se preparado dois tipos de subamostras ou frações (fração global e fração fina). A fração fina representa uma fração enriquecida nos compostos da pasta do ligante. Os difratogramas das argamassas apresentam-se na Figura 3.



**Figura 3** Registos difratométricos dos provetes de argamassa ensaiados: a) argamassa de revestimento (fração global); b) argamassa de assentamento (fração global + fração fina)

Face aos resultados obtidos para a composição mineralógica das argamassas pode concluir-se que os minerais identificados em maior proporção foram o quartzo e o feldspato, que, associados com mica e vestígios de caulinite, são compostos usuais numa areia siliciosa com uma componente argilosa. Em termos dos compostos da pasta do ligante detetou-se calcite, o que indica tratar-se de uma argamassa de cal aérea cálcica.

Nas mesmas amostras foram também realizados ensaios de análise termogravimétrica e térmica diferencial (TG/DTA). A termogravimetria é uma técnica utilizada para medir de forma contínua as variações de massa de uma amostra durante o aquecimento (ou arrefecimento) a uma velocidade constante. Reações que impliquem uma perda de massa (evaporação, sublimação, decomposição, redução) ou ganho de massa (oxidação, adsorção de gás) podem ser quantificadas. Uma variante da TG consiste em representar a sua derivada em função do tempo (DTG), a qual é muito útil para interpretar eficientemente as perdas de massa da curva termogravimétrica. Além da TG, foram ainda em simultâneo registadas as diferenças de temperatura relativamente a um material de referência – análise térmica diferencial. Estas diferenças de temperatura são causadas pela emissão ou absorção



**Figura 4** Curvas TG/DTA/DTG das amostras de argamassa

de calor pela amostra, as quais podem ou não produzir variações de massa (por ex: transformações estruturais).

Através do ataque ácido das amostras de argamassa determinou-se o valor de resíduo insolúvel em ácido, o qual corresponde ao teor de areia siliciosa presente nas amostras em análise.

Da análise dos resultados de TG/DTA/DTG (Figura 4) confirmam-se os resultados da DRX, nomeadamente com a principal perda de massa a ser característica da presença de carbonato de cálcio [8 e 9], comprovando que o ligante utilizado na argamassa foi uma cal aérea cálcica.

No Quadro 1 apresentam-se os teores dos constituintes das argamassas, levando em consideração as perdas de massa e o teor de resíduo insolúvel obtido para cada tipo de argamassa.

Confrontando os resultados de TG/DTA/DTG, de DRX e de resíduo insolúvel, conclui-se que nas duas argamassas o traço em peso é entre 1:8 e 1:9 (cal hidratada:areia), que traduzido em volume é muito próximo de 1:3. Este cálculo é realizado considerando que foi utilizada uma cal hidratada em pó como seria comum no período desta construção e que a relação entre a massa volumica do agregado e a da cal aérea é muito próxima de três.

**Quadro 1** Valores de perda de massa, teores dos constituintes e traço das argamassas

Tipo de amostra	Perda de massa [%]					Perda ao rubro	Gesso	Calcite	Massa [%]			Traço em massa	
	25-95 °C	95-150 °C	150-400 °C	400-550 °C	550-850 °C				Cal hidratada	Resíduo insolúvel	Fração solúvel	Areia	Cal
Argamassa de assentamento	0,12	0,34	0,43	0,61	6,28	7,82	-	14,3	11	81	4,7	8	1
Argamassa de revestimento	0,20	0,74	0,38	0,57	5,60	7,20	3,5	12,7	9	83	4,3	9	1

### 3.1.2 Ensaios físicos e mecânicos

Os ensaios físicos e mecânicos realizados às argamassas de assentamento e revestimento, nomeadamente ensaio de resistência à compressão, ensaios de medição da velocidade de propagação de ultrassons e ensaio para a determinação da porosidade aberta e massa volúmica aparente, foram realizados na Unidade de Revestimentos de Paredes (URPa) do Departamento de Edifícios do LNEC.

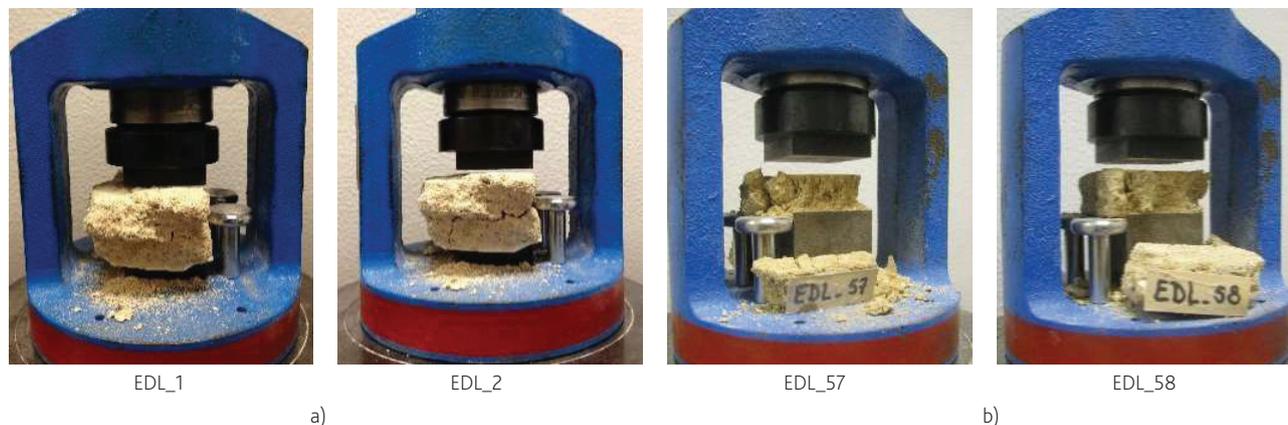
Para quantificar a resistência à compressão de provetes de argamassas irregulares procedeu-se a uma adaptação para amostras recolhidas *in situ* do método normalizado preconizado na norma EN 1015-11: 1999 [10] com base na Ficha de Ensaio do LNEC FE Pa 42 [11]. Este método consiste basicamente na colocação do provete na máquina de ensaio para aplicação da carga sem choque, de uma forma gradual, a fim de obter-se a rotura entre 30 e 90 segundos. Neste caso não foi necessário recorrer a uma “argamassa de confinamento” para ajustar as dimensões e forma dos provetes, uma vez que os provetes selecionados tinham uma área e espessura adequados para aplicação da força de compressão. Foram ensaiados seis provetes de argamassa de revestimento e cinco provetes de argamassa de assentamento, conforme se ilustra na Figura 5. Os resultados relativos à resistência à compressão

e deformação na rotura obtidos para os dois tipos de argamassas sintetizam-se no Quadro 2.

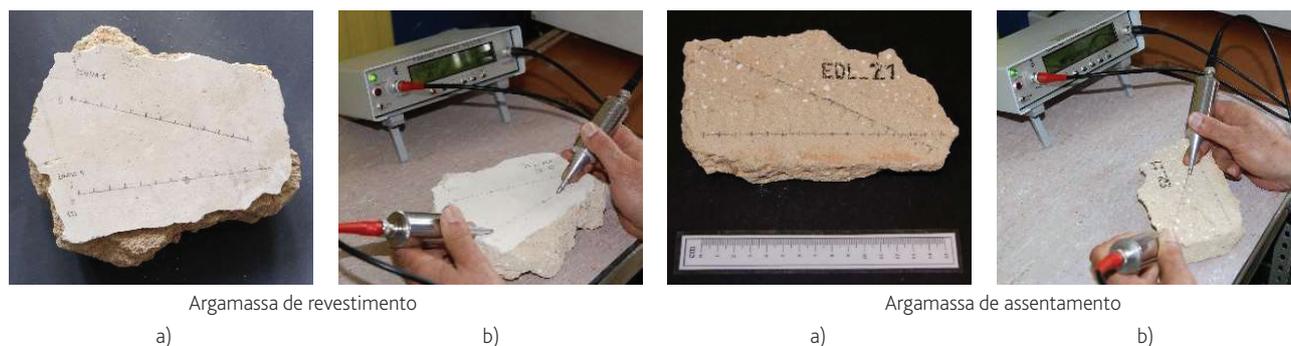
Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas foram realizados ensaios de medição da velocidade de propagação de ultrassons. O objetivo deste ensaio consiste na avaliação da compacidade e rigidez das argamassas. Foi utilizado o aparelho *Steinkamp Ultrasonic tester BP-7*, para determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas. O aparelho é constituído por dois transdutores (emissor e recetor) e um módulo central, que emite as ondas e procede à leitura e registo do tempo de propagação, conforme se ilustra na Figura 6b. O ensaio foi executado utilizando o método indireto de acordo com a Ficha de Ensaio do LNEC FE Pa 43 [11] baseada na norma NP EN 12504-4 [12].

Foram ensaiados provetes de argamassa de assentamento e de argamassa de revestimento através de 2 alinhamentos, conforme se ilustra na Figura 6a. As velocidades de propagação dos ultrassons e o módulo de elasticidade dinâmico obtido no ensaio sintetizam-se no Quadro 2.

Foram também realizados ensaios para a determinação da porosidade aberta e massa volúmica aparente. Os procedimentos deste ensaio baseiam-se na norma portuguesa NP EN 1936 [13]. A



**Figura 5** Provetes de argamassa sujeitos ao ensaio de resistência à compressão: a) argamassa de revestimento e b) argamassa de assentamento



**Figura 6** Provetes de argamassa sujeitos ao ensaio de medição da velocidade de propagação de ultrassons: a) identificação dos alinhamentos; b) realização do ensaio

**Quadro 2** Resultados médios e respetivos desvios padrão obtidos para os diversos ensaios realizados para cada tipo de argamassa

Grandeza em estudo	Argamassa de revestimento		Argamassa de assentamento	
	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão
Resistência à compressão [MPa]	1,54	0,83	1,27	0,19
Extensão na rotura [-]	0,08	0,02	0,16	0,01
Velocidade de propagação dos ultrassons [m/s]	1275	110	1091	132
Módulo de elasticidade dinâmico [GPa]	2,53	0,44	2,04	0,49
Porosidade aberta [%]	31,67	1,53	33,50	1,29
Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1703	25	1615	47

determinação da porosidade aberta ( $P_o$ ), dada em percentagem, é realizada de acordo com a equação (1) e sintetizada no Quadro 2:

$$P_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (1)$$

O valor de  $m_s$  corresponde à massa do provete saturado, o valor de  $m_d$  corresponde à massa do provete seco, e o valor de  $m_h$  corresponde à massa hidrostática do provete. A determinação da massa volúmica aparente, dada em kg/m<sup>3</sup>, é realizada de acordo com equação (2) e sintetizada no Quadro 2, considerando a massa volúmica da água ( $\rho_{rh}$ ) correspondente à temperatura medida dentro do exsiccador.

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad (2)$$

### 3.2 Tijolos

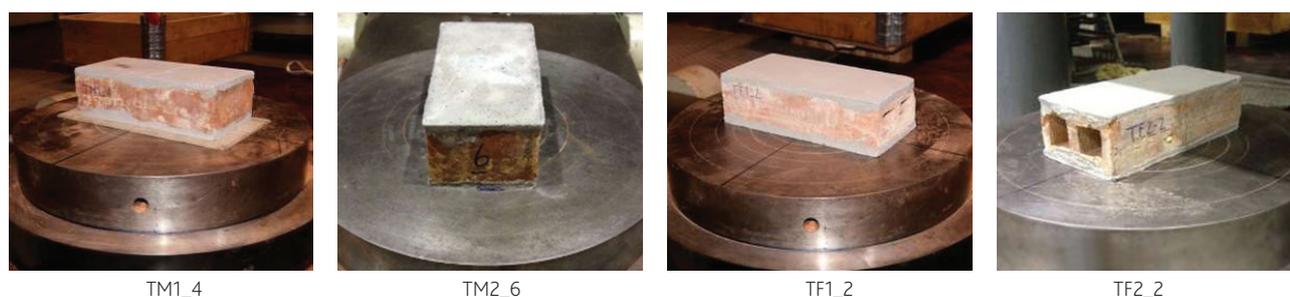
Também das paredes recolhidas do edifício de estudo, selecionaram-se dez tijolos cerâmicos maciços e dez tijolos cerâmicos furados para realização de ensaios de resistência à compressão e ensaios para determinação do módulo de elasticidade estático. Estes ensaios foram realizados na Unidade de Comportamento de Estruturas do Departamento de Estruturas do LNEC. Os tijolos têm uma dimensão aproximada de 23 × 11 × 7 cm<sup>3</sup> (comprimento, largura, altura). Por

observação visual dos vários elementos constituintes das paredes, verificou-se que, dentro do mesmo tipo de tijolos cerâmicos (maciços e furados), existiam dois grupos diferentes provenientes de duas fábricas distintas com métodos de fabrico também diferentes. Por essa razão, cada tipo de tijolos foi dividido em dois grupos: tijolos furados do tipo 1 (TF1) e do tipo 2 (TF2) e tijolos maciços do tipo 1 (TM1) e do tipo 2 (TM2).

Para ambos os ensaios houve a necessidade de se recorrer a uma regularização de ambas as faces que estão em contacto com os pratos da prensa, evitando assim zonas de concentração de tensões. Para quantificar a resistência à compressão dos tijolos cerâmicos procedeu-se a uma adaptação do método normalizado preconizado na norma portuguesa NP EN 772-1:2002 [14]. Este método consiste basicamente na colocação do provete na máquina de ensaio para aplicação da carga sem choque, isto é, de uma forma gradual e com uma velocidade controlada. A carga foi aplicada no sentido da menor dimensão do provete, igual ao estado de carregamento a que os elementos em análise estão a ser sujeitos quando estão inseridos em paredes nos edifícios em uso.

Foram ensaiados 5 tijolos de cada um dos 4 grupos existentes, conforme se ilustra na Figura 7. Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão sintetizam-se no Quadro 3.

Para quantificar o módulo de elasticidade estático de tijolos cerâmicos, usaram-se os restantes 5 provetes de cada um dos grupos



**Figura 7** Tijolos cerâmicos selecionados para o ensaio de resistência à compressão

**Quadro 3** Resultado dos ensaios de resistência à compressão e ensaio para determinação do módulo de elasticidade estático dos tijolos cerâmicos

Grandeza em estudo	Resistência à compressão [MPa]		Módulo de elasticidade estático [GPa]	
	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão
Tijolos maciços do tipo 1 (TM1)	35,43	3,56	20,17	0,99
Tijolos maciços do tipo 2 (TM2)	39,62	1,57	15,14	0,72
Tijolos furados do tipo 1 (TF1)	15,20	4,43	16,99 *	6,74 *
Tijolos furados do tipo 2 (TF2)	13,04	2,82	15,29 *	3,87 *

\* Trata-se de uma estimativa do módulo de elasticidade médio, que quantifica a relação força vs. deformação do tijolo furado e não do material constituinte do tijolo. A deformabilidade do tijolo é bastante influenciada pela geometria da furação que é muito irregular em cada tijolo.

de tijolos e procedeu-se à sua instrumentação. O objetivo deste ensaio é determinar os valores de deformação do material para cada nível de força. Fazendo um gráfico que relaciona a tensão imposta com a deformação obtida, e traçando uma linha de tendência obtém-se o valor do módulo de elasticidade dos tijolos cerâmicos furados e maciços utilizados nas paredes de alvenaria.

Para se obter a deformação colou-se um extensómetro em cada face dos provetes. A aplicação de carga foi realizada de acordo com o posicionamento dos tijolos na parede de alvenaria e os extensómetros foram colados de forma a ficarem alinhados com a carga. Foram aplicados 4 ciclos de carga ao provete, o primeiro ciclo é aplicado para um nível de carga 100 kN acima do limite de um terço da força média de rotura para eventuais ajustes iniciais, enquanto os três ciclos seguintes são aplicados para níveis de carga de um terço da força média de rotura. Os módulos de elasticidade estáticos obtidos sintetizam-se no Quadro 3.

## 4 Caracterização da alvenaria

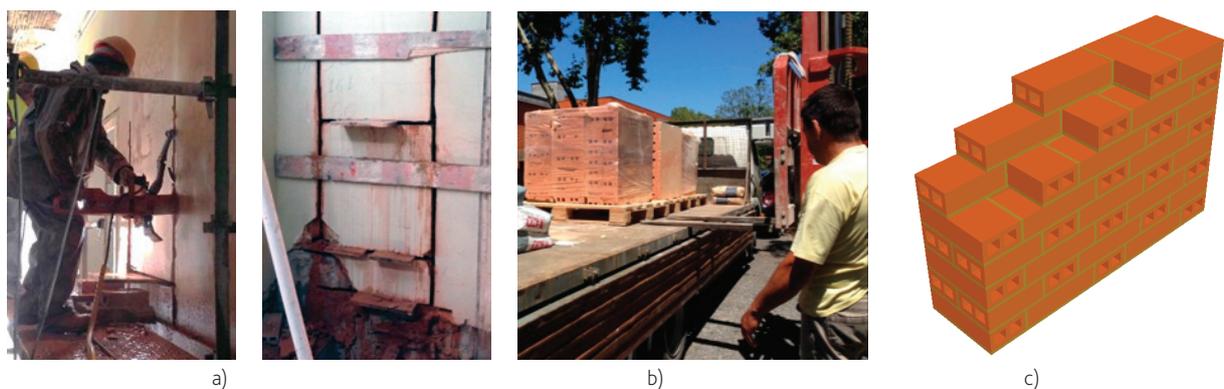
### 4.1 Alvenaria não reforçada

As amostras de alvenaria foram retiradas diretamente das diversas paredes do edifício usando uma serra elétrica arrefecida com água com um disco de grandes dimensões para que o corte fosse realizado de uma única vez, conforme se ilustra na Figura 8a. O processo de remoção foi cuidadosamente realizado tentando corresponder o mais possível às diretrizes preconizadas na norma ASTM C 1420 – 03a [15], sendo que as amostras de parede com tijolo cerâmico maciço (MOM#) foram retiradas do piso térreo e

as amostras de parede com tijolo cerâmico furado (MOF#) foram retiradas dos pisos 1, 2 e 3, visto que os pisos 4 e 5 estavam bastante danificados. Foram escolhidas as paredes originais sem danos e os revestimentos existentes foram, sempre que possível, preservados junto das paredes. Após a remoção, a amostra da parede original foi cuidadosamente colocada em caixas de madeira e pré-comprimida com o auxílio de madeiras e cintas ajustáveis, com os espaços vazios colmatados por plásticos de bolhas para que os eventuais impactos do transporte fossem minimizados, conforme se ilustra na Figura 8b. O aparelho de assentamento é realizado a “uma vez” conforme se ilustra no esquema da Figura 8c.

Após a sua receção as amostras foram colocadas na Unidade de Comportamento de Estruturas (UCEst) do Departamento de Estruturas do LNEC, local onde foram realizados os ensaios. As amostras de paredes foram cuidadosamente observadas para averiguar se existiam fissuras e todo o material que se encontrava solto foi removido (nomeadamente as fiadas das extremidades de forma a que a amostra fosse o mais representativa possível de um troço de parede sem danos). Obtiveram-se assim provetes (*muretes*) mais ou menos regulares, com uma dimensão aproximada de 70 cm de largura por 80 cm de altura, que foram identificados tendo em conta os ensaios a que seriam sujeitos.

As quatro faces dos *muretes* sujeitos ao ensaio de compressão diagonal foram regularizadas, conforme se exemplifica na Figura 9a. Como a parede será suportada através de dois cantos, todas as faces estarão em contacto com o dispositivo de suporte, logo optou-se por fazer a regularização de todas as faces de forma a optar pelo canto que melhor se ajusta ao dispositivo de suporte.



**Figura 8** Remoção das amostras no edifício de estudo e transporte para as instalações do LNEC: a) corte da amostra da parede original; b) acondicionamento das paredes para transporte; c) tipo de aparelho de assentamento das amostras

No caso dos *muretes* de tijolo cerâmico furado, antes da regularização lateral das faces, todos os furos foram tapados superficialmente com poliestireno expandido por forma a que a argamassa de regularização não preenchesse os furos dos tijolos.

Foram realizados ensaios de compressão diagonal com o objetivo de avaliar a capacidade de distorção da parede no seu próprio plano devido à atuação de uma força horizontal (caso da ação sísmica). Neste ensaio procedeu-se a uma adaptação do método normalizado preconizado na norma ASTM E519/E519M – 10 [16].

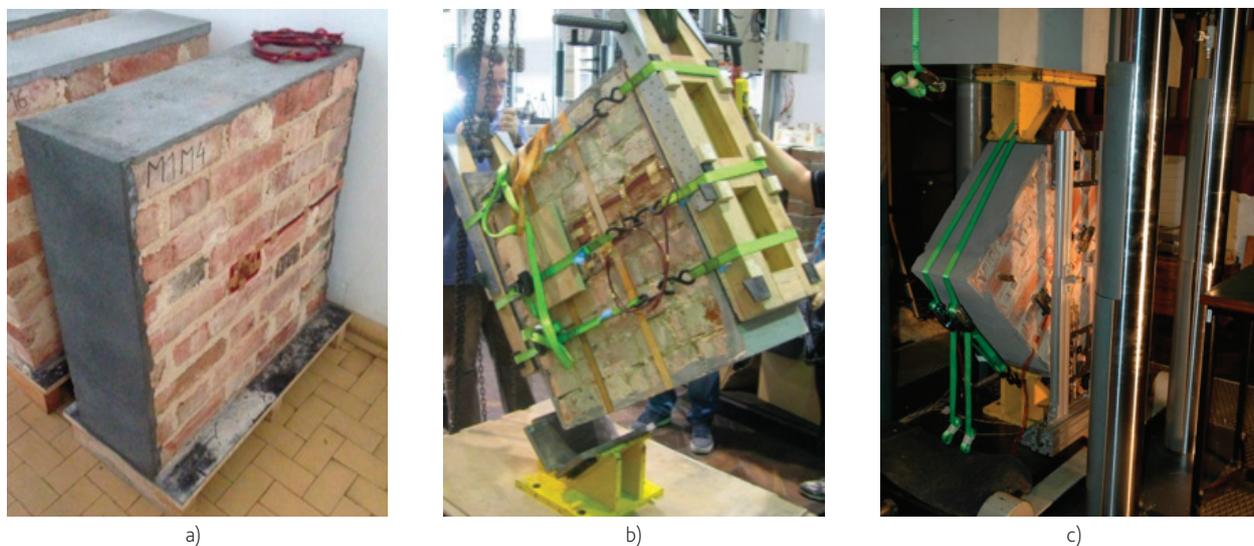
Dada a limitação de a ponte rolante da sala de ensaios só ter um guincho, foi montada uma estrutura auxiliar para colocação de um cadernal por forma a poder rodar os *muretes* com vista ao encaixe dos cantos do provete nas peças de suporte, conforme se ilustra na Figura 9b. Após colocação do *murete* na posição de ensaio, procedeu-se à instrumentação do mesmo.

Dado que as peças de suporte só permitem a colocação dos provetes a 45° e que a geometria dos provetes é retangular com uma dimensão

aproximada de 70 cm de largura por 80 cm de altura, as diagonais do provetes não ficaram exatamente a 45°. Ou seja, a diagonal que une os vértices não ficou exatamente vertical, sendo que os valores dos ângulos de desvio (relativamente à vertical) foram medidos e variam entre 1.º e 3.º. O valor da força para o cálculo da tensão de corte foi posteriormente corrigido tendo em conta essa geometria.

O método de ensaio consiste basicamente na colocação do *murete* na máquina de ensaio para aplicação da carga sem choque, isto é, de uma forma gradual e com uma velocidade controlada de 0,005 mm/s com uma frequência de amostragem de 50 Hz. A aplicação de carga foi realizada verticalmente com o *murete* posicionado a 45° conforme se ilustra na Figura 9c. Foram ensaiados três *muretes* originais sem reforço de cada tipo de parede (alvenaria de tijolo cerâmico maciço e furado).

Na Figura 10 apresenta-se o tipo de rotura de cada um dos *muretes* originais após o ensaio de compressão diagonal, onde as linhas a amarelo representam a rotura pela argamassa de assentamento



**Figura 9** *Muretes* originais: a) rotação do provete; b) peças de suporte do provete; c) provete em ensaio

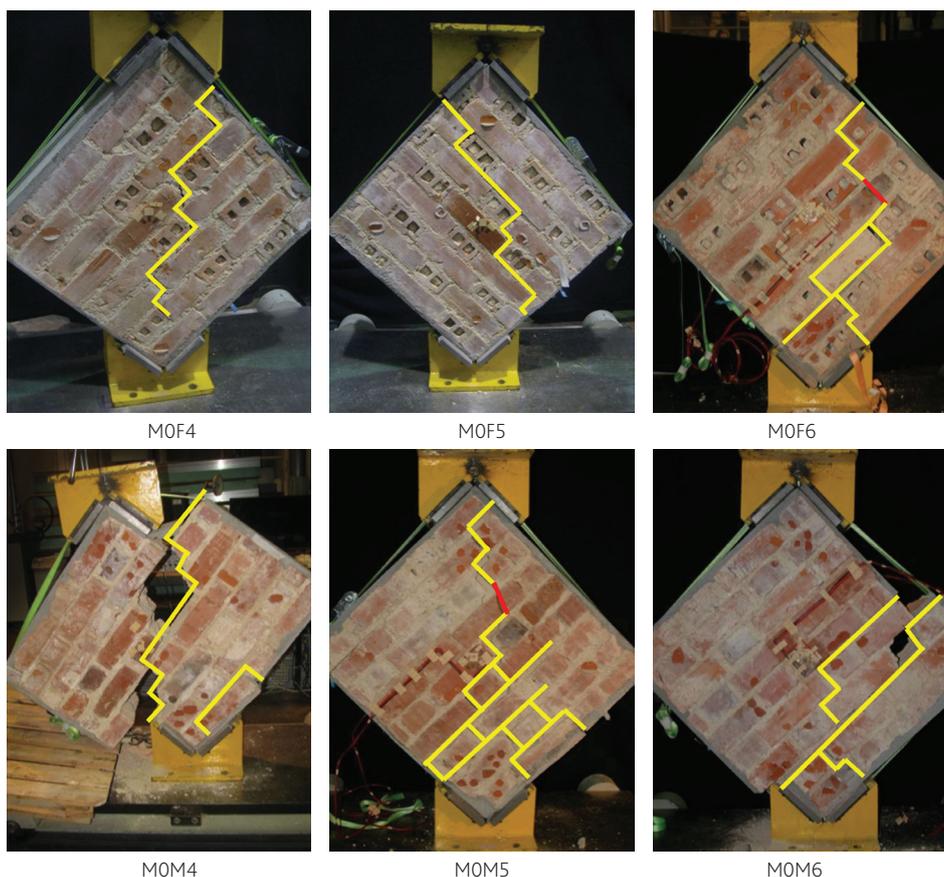


Figura 10 Roturas obtidas nos diversos provetes originais ensaiados

e as linhas a vermelho representam a rotura do tijolo cerâmico, verificando-se que a rotura é na sua grande maioria pelas juntas de argamassa. As tensões máximas atingidas no ensaio de compressão diagonal para os *muretes* originais são apresentadas no Quadro 4.

Dado não haver *muretes* originais em número suficiente para os ensaios das duas soluções de reforço em estudo, foi necessário construir novos *muretes* de tijolo cerâmico maciço com as mesmas dimensões simulando o melhor possível a constituição e o comportamento dos *muretes* originais, conforme se ilustra na Figura 11. Neste contexto foram utilizados os tijolos sobrantes da demolição do edifício devidamente limpos e escovados e realizada uma composição de argamassa de cal aérea ao traço 1:3 com mistura de agregado (areia de rio e areia de areeiro) tendo por base os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de assentamento apresentados anteriormente. Dois dos *muretes* novos foram selecionados e regularizados com a mesma metodologia dos *muretes* originais. Após um processo de cura das argamassas de assentamento de aproximadamente 1 ano, foram sujeitos a ensaios de compressão diagonal, conforme se ilustra na Figura 12, utilizando a mesma metodologia descrita anteriormente, tendo como principal objetivo a comparação dos resultados.

Na Figura 13 apresenta-se o tipo de rotura de cada um dos *muretes* novos após o ensaio de compressão diagonal, onde as linhas a

amarelo representam a rotura pela argamassa de assentamento, verificando-se que a rotura é sempre pelas juntas de argamassa. As tensões máximas atingidas no ensaio de compressão diagonal para os *muretes* novos são apresentadas no Quadro 4.



Figura 11 Construção de *muretes* novos de tijolo cerâmico maciço



Figura 12 Murete novo durante o ensaio



M1M4

M1M5

Figura 13 Roturas obtidas nos muretes novos ensaiados

## 4.2 Alvenaria reforçada

Foram selecionados 6 muretes novos para aplicação de dois tipos de solução de reforço. As soluções de reforço escolhidas são compostas por revestimentos armados constituídos por: i) argamassa à base de cal hidráulica natural NHL 3,5 ao traço 1:2 e rede de fibra de vidro VIPLÁS 275 [17] e ii) argamassa à base de cimento ao traço 1:3 e rede de fibra de vidro VIPLÁS 275 [17].

Os revestimentos armados foram aplicados nos muretes novos 7 meses após a sua construção, período este que corresponde a uma cura considerada representativa das características a longo prazo das respetivas argamassas de assentamento. Os revestimentos armados foram aplicados em ambas as faces dos muretes com uma

espessura de 3 cm (2 cm para a camada de regularização + 1 cm para a camada de acabamento). Foi criada uma estrutura de madeira à volta dos muretes por forma a que a rede de reforço permanecesse esticada durante a aplicação e respetiva cura do revestimento. A rede foi fixada ao murete parede através de conectores plásticos, com aproximadamente 7 cm de comprimento, numa malha de 50 cm de largura por 50 cm de altura centrada no murete, conforme se ilustra na Figura 14.

Garantido um tempo de cura de pelo menos 28 dias para a argamassa de cimento e pelo menos 90 dias para a argamassa de cal hidráulica, os muretes reforçados foram sujeitos a ensaios de compressão diagonal utilizando a mesma metodologia descrita anteriormente, conforme se ilustra na Figura 15. Na Figura 16 e Figura 17 apresenta-se o tipo de rotura de cada um dos muretes reforçados após o ensaio de compressão diagonal.



Figura 14 Aplicação dos revestimentos armados nos novos muretes

Após a remoção dos revestimentos armados observou-se uma fissura diagonal denteada na parede de alvenaria, típica de uma rotura por corte. As linhas a amarelo representam a rotura pela argamassa de assentamento e as linhas a vermelho representam a rotura do tijolo cerâmico, verificando-se que a rotura é na sua grande maioria pelas juntas de argamassa.

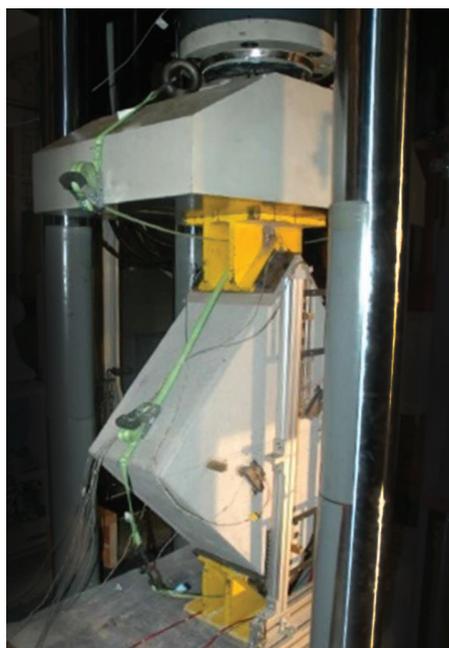
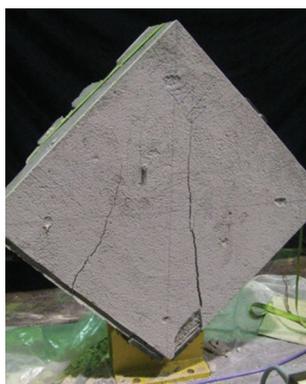


Figura 15 Murete reforçado durante o ensaio

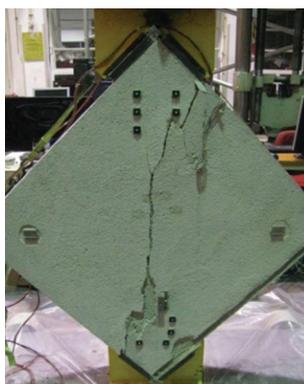
Na Figura 18 ilustra-se a título de exemplo a rotura da parede para cada tipo de murete reforçado. As tensões máximas atingidas no ensaio de compressão diagonal para os muretes reforçados são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 Tensões máximas atingidas no ensaio de compressão diagonal para todos os muretes ensaiados

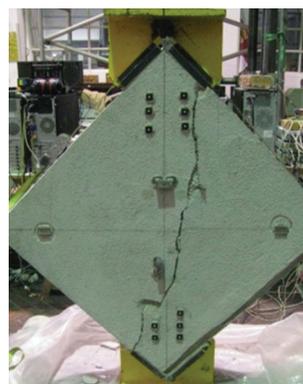
Tipo de provete	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]
Muretes originais de alvenaria de tijolo maciço	0,15	0,03
Muretes originais de alvenaria de tijolo furado	0,17	0,04
Muretes novos	0,09	0,00
Muretes novos reforçados com argamassa de cimento e rede de fibra de vidro	0,78	0,11
Muretes novos reforçados com argamassa de cal hidráulica natural e rede de fibra de vidro	0,27	0,02



M2M1



M2M2

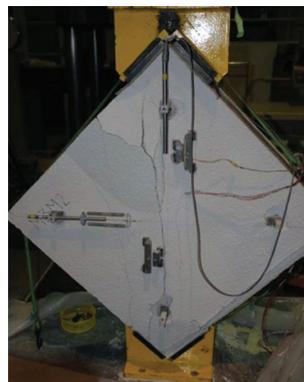


M2M3

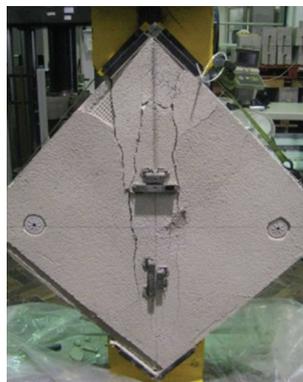
Figura 16 Roturas obtidas nos muretes reforçados com argamassa de cimento e rede de fibra de vidro



M3M1

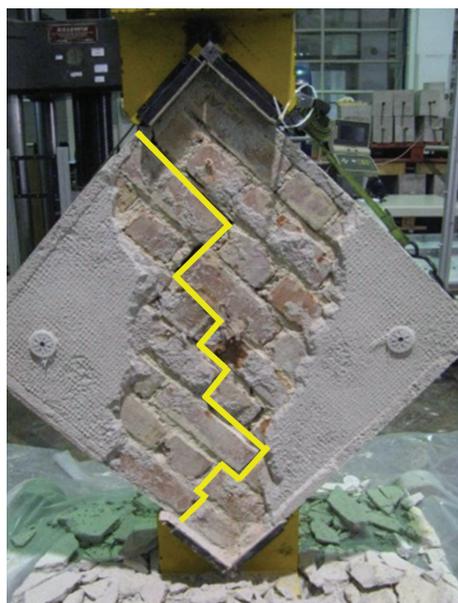


M3M2

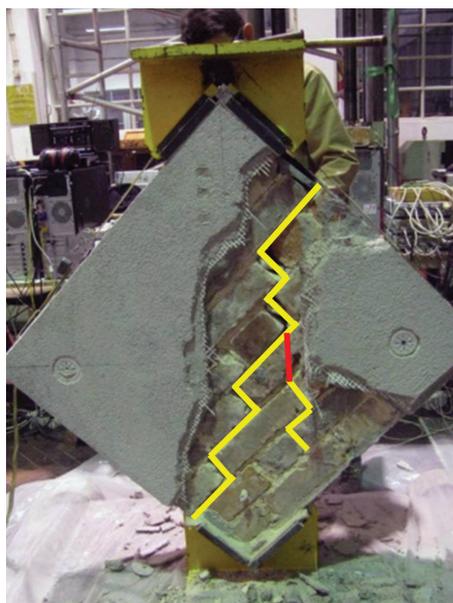


M3M3

Figura 17 Roturas obtidas nos muretes reforçados com argamassa de cal hidráulica e rede de fibra de vidro



Murete reforçado com argamassa de cal hidráulica e rede de fibra de vidro



Murete reforçado com argamassa de cimento e rede de fibra de vidro

**Figura 18** Roturas obtidas na alvenaria dos *muretes* reforçados

## 5 Conclusões

Relativamente aos ensaios realizados nas argamassas, os resultados obtidos comprovam que as argamassas de revestimento e de assentamento são do mesmo tipo, com ligante de cal aérea e agregado essencialmente silicioso, provavelmente provenientes de areiro, como se verifica pela presença de mica e caulinite. O uso de areias com alguma argila é bastante corrente neste tipo de argamassas, por conferir alguma "goma", muito apreciada pelos mestres que faziam a aplicação.

As argamassas apresentam resistências moderadas e deformações na rotura relativamente elevadas, como expetável neste tipo de argamassas [18 e 19]. Os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos determinados através do ensaio de medição da velocidade de propagação de ultrassons são característicos de uma argamassa de cal sem a existência de fissuração. Os resultados obtidos para porosidade aberta e massa volúmica aparente comprovam mais uma vez a semelhança entre os dois tipos de argamassa, sendo os valores obtidos concordantes com o tipo de argamassas de cal utilizadas nesta época, com porosidades muito elevadas.

Relativamente aos resultados obtidos nos ensaios realizados nos tijolos cerâmicos verifica-se que este material é bastante resistente (obtendo-se valores médios aproximados para a resistência à compressão de 40 MPa para os tijolos maciços e de 15 MPa para os tijolos furados), em comparação com a argamassa que os une (onde foi obtida uma resistência à compressão de aproximadamente 1 MPa). Sendo a resistência à compressão bastante superior nos tijolos maciços justifica-se plenamente a sua utilização nas paredes dos pisos inferiores pois são estas paredes que suportam o peso de todo o edifício. Verificou-se ainda que os resultados relativos ao módulo de elasticidade estático têm maior variabilidade nos

tijolos furados, visto que a furação e a irregularidade geométrica influenciam bastante a medição realizada pelo extensómetro.

Tendo em conta as tensões máximas obtidas nos ensaios de compressão diagonal dos *muretes* originais, verifica-se que as paredes de alvenaria resistente de tijolo cerâmico apresentam uma resistência ao corte reduzida quando solicitadas horizontalmente. Verificou-se que em todos os ensaios de compressão diagonal realizados, todas as roturas ocorreram maioritariamente nas ligações argamassa tijolo, quer nos *muretes* de tijolos furados quer nos *muretes* de tijolo maciço, o que indica que a argamassa é o elemento condicionante no comportamento das paredes sujeitas às ações horizontais. O facto de se ter obtido aproximadamente a mesma tensão de corte nos dois tipos de muretes originais (maciços e furados) é consistente com o facto de a rotura ser condicionada pela argamassa de assentamento

Os resultados obtidos nos *muretes* novos são mais reduzidos do que nos *muretes* originais pois a aderência da argamassa de assentamento é inferior, facto que se poderá dever ao menor aperto da argamassa na construção dos provetes, ou à menor porosidade superficial dos tijolos por terem já sido utilizados. Nas paredes reais a argamassa fica bastante apertada durante muitos anos devido ao peso da parede subjacente, não sendo possível simular este aspeto aquando da construção dos *muretes*, o que contribui para justificar a menor resistência das paredes novas.

Os resultados obtidos nos *muretes* reforçados permitem concluir que ambos os reforços escolhidos aumentam de uma forma bastante satisfatória a capacidade resistente da parede. Embora no caso do reforço de cimento essa capacidade resistente seja superior, a compatibilidade entre o revestimento armado e o suporte não é tão satisfatória como no reforço com cal hidráulica.

Verificou-se que no reforço com argamassa de cimento houve maior destacamento entre a primeira camada de revestimento e a parede de alvenaria do que no reforço com argamassa de cal hidráulica, evidenciando assim uma maior compatibilidade da argamassa de cal hidráulica com este tipo de parede de alvenaria. No entanto, no reforço com argamassa de cal hidráulica verificou-se que a ligação entre as duas camadas de revestimento não foi tão eficaz, mostrando assim que a abertura da malha da rede deveria ser de maior dimensão para facilitar a ligação entre camadas.

## Agradecimentos

Este trabalho insere-se no Projeto de Investigação e Inovação 2013-2020 do LNEC "REuSE – Revestimentos para Reabilitação: Segurança e Sustentabilidade". Os autores agradecem a colaboração da empresa A2P Consult, Lda., e das empresas Coporgest e HCI Construções, S.A., por terem possibilitado a obtenção dos provetes de paredes de alvenaria. Os autores também agradecem à empresa Vimaplás pelo fornecimento da rede de fibra de vidro, à SECIL Argamassas pelo fornecimento de cimento e cal hidráulica NHL 3,5 e mão de obra para a aplicação dos revestimentos armados, assim como às empresas Lena Agregados, S.A. e Soarvamil – Sociedade de Areias de Vale de Milhaços, Lda. pelo fornecimento das areias.

## Referências

- [1] Mauro, A.; De Felice, G. – "Seismic assessment of multi-leaf masonry strengthened with injections or transversal ties". 8th International Conference on Structural Analysis of Historic Constructions (SAHC 2012), Jerzy Jasieńko ed., Wrocław, Polónia, Outubro 15-17, 2012.
- [2] Valluzzi, M.R.; Modena, C.; De Felice, G. – "Current practice and open issues in strengthening historical buildings with composites", *RILEM Materials and Structures*, vol. 47(12), pp. 1971-1985, Dezembro de 2014.
- [3] De Santis, S.; De Felice, G. – "Tensile behaviour of mortar-based composites for externally bonded reinforcement systems". *Composites Part B: Engineering*, Vol. 68, pp. 401-413, janeiro de 2015.
- [4] D'Ambrisi, A.; Feo, L.; Focacci, F. – "Experimental and analytical investigation on bond between Carbon-FRCM materials and masonry". *Composites Part B: Engineering*, vol. 46, pp. 15-20, 2013.
- [5] Malena, M.; De Felice, G. – "Externally bonded composites on a curved masonry substrate". *Composite Structures*, vol. 112, pp. 194-206, 2014.
- [6] Papanicolaou, C.G.; Triantafyllou, T.C.; Papathanasiou M.; Karlos, K. – "Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading". *RILEM Materials and Structures*, vol. 41(1), pp. 143-157, 2008.
- [7] Borri, A.; Castori, G.; Corradi, M. – "Shear behavior of masonry panels strengthened by high strength steel cords". *Construction and Building Materials*, vol. 25(2), pp. 494-503, 2011.
- [8] Santos Silva, A.; Adriano, P.; Magalhães, A.; Pires, J.; Carvalho, A.; Cruz, A. J.; Mirão, J.; Candeias, A. – "Characterization of historical mortars from Alentejo's religious buildings". *International Journal of Architectural Heritage*, 4(2), p. 138-154, 2010.
- [9] Santos Silva, A.; Santos, A.R.; Veiga, M.R.; Lera, F. – "Characterization of mortars from the Fort of Nossa Senhora da Graça, Elvas (Portugal) to support the conservation of the monument". 4th Historic Mortars Conference - HMC2016, Santorini, Greece, 10- Outubro, pp. 42-49, 2016.
- [10] CEN - Comité Europeu de Normalização – EN 1015-11: 1999 - "Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar", 1999, Bruxelas.
- [11] Veiga, M.R.; Santos, D. – "Métodos de ensaio de revestimentos existentes – Ensaio in situ e ensaios em laboratório sobre amostras recolhidas em obra", Lisboa: LNEC. Relatório 39/2016 – DED/NRI, Proc. 0803/112/19460, Relatório não confidencial, 2016.
- [12] IPQ - Instituto Português da Qualidade – NP EN 12504-4: 2007 – "Ensaio do betão nas estruturas – Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons", outubro de 2010, Caparica.
- [13] IPQ - Instituto Português da Qualidade – NP EN 1936:2008 – "Métodos de ensaio para pedra natural; Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta", setembro de 2008, Caparica.
- [14] IPQ - Instituto Português da Qualidade – NP EN 772-1:2002 – "Método de ensaio de blocos para alvenaria - Parte 1: Determinação da resistência à compressão", Julho de 2002, Caparica.
- [15] ASTM - American Society for Testing and Materials – ASTM C 1420 – 03a - "Standard Practice for Selection, Removal and Shipment of Manufactured Masonry Units Placed in Usage", West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos da América, 2003.
- [16] ASTM - American Society for Testing and Materials – ASTM E519/E519M – 10, "Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages", West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos da América, Julho 2010.
- [17] LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil – "VIPLÁS 167 e VIPLÁS 275 – Redes para reforço de revestimentos de paredes (para aplicação em ETICS)", Documento de Homologação de novos materiais e processos de construção DH942, julho de 2017, <http://www.lnec.pt>.
- [18] Veiga, M. R. *et al.* – "Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings", *International Journal of Architectural Heritage*, (2) vol. 4, pp.177-195, abril-junho de 2010, Philadelphia: Taylor e Francis, Paulo B. Lourenço e Pere Roca eds. Special Issue. ISSN 1558-3058. DOI: 10.1080/15583050902914678.
- [19] Magalhães, A.; Veiga, M.R. – "Physical and mechanical characterisation of ancient mortars. Application to the evaluation of the state of conservation", *Materiales de Construcción*, (295), vol 59: 61-77, 2009. doi: 10.3989/mc.2009.41907.