

CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DE PAREDES DE ALVENARIA DE TIJOLO CERÂMICO MACIÇO DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

Maria Salomé Vaz

Estudante
FCT, Universidade
NOVA de Lisboa

Caparica
[ms.vaz@
campus.fct.unl.pt](mailto:ms.vaz@campus.fct.unl.pt)

Ana Isabel Marques

Investigadora Auxiliar
Laboratório Nacional de
Engenharia Civil

Lisboa
aimarques@lnec.pt

Paulina Faria

Professora Associada
CERIS. FCT,
Universidade NOVA de
Lisboa
Caparica
mpr@fct.unl.pt

Armando Demaj

Estudante de
Doutoramento
IST
Ulisboa, CERIS
Lisboa
[armando.demaj@
tecnico.ulisboa.pt](mailto:armando.demaj@tecnico.ulisboa.pt)

António Sousa Gago

Professor Associado
IST
Ulisboa, CERIS
Lisboa

[antonio.gago@
tecnico.ulisboa.pt](mailto:antonio.gago@tecnico.ulisboa.pt)

João Gomes Ferreira

Professor Associado
IST
Ulisboa, CERIS
Lisboa

[joao.gomes.ferreira@
tecnico.ulisboa.pt](mailto:joao.gomes.ferreira@tecnico.ulisboa.pt)

SUMÁRIO

O presente artigo insere-se no âmbito de um estudo presentemente em curso que consiste no desenvolvimento de sistemas de reforço sísmico de paredes de tijolo maciço, que se podem encontrar, entre outros, nos edifícios construídos entre as décadas de 1930 e 1940. Neste período ocorreu a transição entre os edifícios "gaioleiros" e os novos edifícios "de placa", cujas lajes, de madeira no caso dos "gaioleiros" e de betão armado no caso dos edifícios "de placa", são apoiadas em paredes de alvenaria, uma parte das quais eram de tijolo maciço. Neste artigo são apresentados e discutidos os resultados experimentais de parâmetros de resistência e deformação de provetes de parede de alvenaria de tijolo cerâmico maciço, que foram construídos à semelhança de paredes pertencentes aos edifícios construídos entre as décadas de 1930 e 1940.

Palavras-chave: Edifícios antigos, Alvenaria de tijolo cerâmico maciço, Argamassa bastarda, Caracterização mecânica, Compressão axial.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Rollo [1], o terramoto de 1755 foi a causa e a razão para a revolução urbanística e arquitetónica de que foi protagonista a cidade de Lisboa. A partir desse período a história da construção em Portugal passou a ser delimitada pelas épocas pré-pombalina

(anterior a 1755), pombalina (entre 1755 e 1880) e pós-pombalina (posterior a 1880). Estão incluídos na época pós-pombalina os edifícios “gaioleiros”, construídos entre 1880 e 1920/30, e os edifícios “de placa”, construídos sobretudo entre 1930 e 1940 [2].

Eventos sísmicos recentes em todo o mundo têm mostrado que as suas consequências no parque edificado podem ser devastadoras. A Itália e a Nova Zelândia apresentam algumas tipologias de edifícios de alvenaria bastante semelhantes a tipologias também existentes em Portugal. Atendendo aos danos observados em sismos anteriores, nomeadamente nos sismos de L’Aquila (Itália, 2009), de Amatrice (Itália, 2016) e de Christchurch (Nova Zelândia, 2011 e 2016), constata-se que os edifícios antigos de alvenaria apresentam uma elevada vulnerabilidade sísmica.

Apesar de todos os avanços científicos, o estudo deste tipo de edifícios tem sido limitado. A necessidade de desenvolver mais trabalho de investigação nesta área justifica-se plenamente tendo em conta que este problema envolve risco para vidas humanas. Também o crescente interesse pela preservação do património edificado, que se observa nos últimos anos, incentiva a procura de novas soluções de reabilitação e reforço sísmico compatíveis com as técnicas construtivas originais dos edifícios.

A característica fundamental que define os edifícios gaioleiros e de placa é o facto dos pisos descarregarem diretamente em paredes resistentes de alvenaria, que podem ser construídas por diversos materiais, tais como pedra argamassada, tijolo cerâmico maciço, ou tijolo cerâmico perfurado [3]. Os edifícios “de placa” apresentam lajes de betão armado enquanto nos gaioleiros os pisos eram, na maior parte das divisões, ainda em madeira, sendo em betão apenas nas zonas interiores húmidas.

Os edifícios de alvenaria antigos apresentam uma elevada vulnerabilidade sísmica, essencialmente porque as paredes de alvenaria não apresentam bom comportamento ao corte (ações no seu plano) e à flexão (ações para fora do plano) [4]. De acordo com os Censos 2021 [5], esta tipologia representa ainda uma parte importante do parque edificado de Lisboa.

Os resultados obtidos pelos Censos 2021 [5] indicam que, em 2011, existiam em Lisboa 52496 edifícios, sendo 9747 construídos no período de 1919 a 1945. Cerca de 19% dos edifícios pertencentes a esta época eram utilizados como habitação. Isso justifica a necessidade de conhecer melhor as características das alvenarias que compõem estes edifícios para uma avaliação do seu comportamento sísmico mais adequada, assim como uma escolha de melhores soluções de reabilitação e reforço.

O presente artigo procura caracterizar mecanicamente paredes de alvenaria de tijolo cerâmico maciço, através de ensaios de compressão axial. Esta caracterização corresponde a uma primeira fase do projeto de investigação “RESIST-2020 - Reabilitação Sísmica de Edifícios Antigos de Alvenaria-Betão” que tem como principal objetivo o desenvolvimento de sistemas de reforço sísmico de paredes de tijolo maciço.

As paredes alvo de estudo são constituídas por argamassa de assentamento à base de cal aérea e cimento ao traço volumétrico 1:3:12 (cimento:cal aérea:areia) e tijolos cerâmicos maciços atuais, selecionados tendo em conta os resultados da tensão de rotura obtidos em

tijolos maciços originais provenientes de um edifício antigo no centro da cidade de Lisboa e que estava a ser sujeito a obras de reabilitação.

Pretende-se, com este trabalho, fornecer mais informações sobre as características mecânicas das paredes de alvenaria resistentes que compõem os edifícios pertencentes à tipologia dos edifícios “de placa”, construídos entre 1930 e 1940. Um dos principais objetivos da caracterização mecânica destas paredes é o de possibilitar que se proceda a uma avaliação da eficácia de soluções de reforço.

2. CARACTERIZAÇÃO DE EDIFÍCIOS DO PARQUE EDIFICADO DE LISBOA ENTRE 1930 E 1940

2.1 Seleção dos casos de estudo

Como método de abordagem foram recolhidas informações de cinco edifícios construídos nas décadas de 1930 e 1940 existentes em Lisboa. Para o efeito, optou-se por recolher as informações nos processos de obra no Arquivo Municipal de Lisboa (AML), descrevendo os materiais constituintes das paredes de alvenaria desses edifícios.

Os edifícios analisados localizam-se na Rua Augusto Gil n.º 24 e 26, na Rua Joaquim Casimiro n.º 5, na Praça João do Rio n.º 12 e na Avenida Almirante Reis n.º 246. Estes edifícios localizam-se em diferentes zonas da cidade de Lisboa, conforme se ilustra na Figura 1.



Figura 1. Localização dos edifícios que constituem os casos de estudo

2.2 Processo do edifício situado na Rua Augusto Gil n.º 24

A construção deste edifício ocorreu em 1930. Inicialmente, era composto por rés-do-chão e mais dois andares, com uma fração por andar (Figura 2). As paredes das fachadas e empenas são de alvenaria de pedra argamassada e as argamassas, de acordo com os elementos do projeto, são compostas por cal e areia ao traço 1:2 em volume. Em 1956 foi substituído o pavimento de madeira dos compartimentos interiores por pavimento de betão armado.

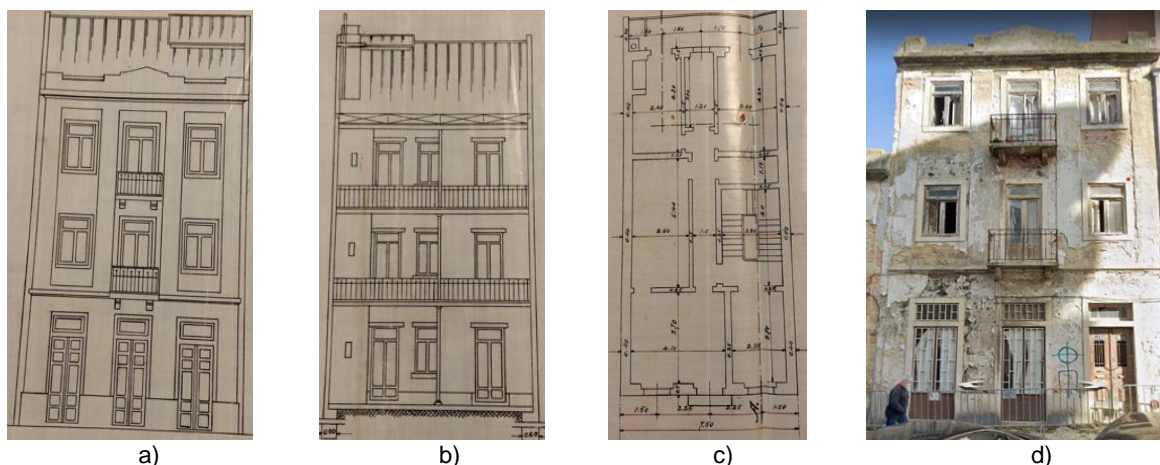


Figura 2. Edifício da rua Augusto Gil n.º 24: a) fachada principal; b) fachada tardoz; c) planta do 2.º andar e d) imagem atual do edifício (Google Earth, junho 2022)

2.3 Processo do edifício situado na Rua Augusto Gil n.º 26

A construção deste edifício iniciou-se em 1932, sendo constituído por rés-do-chão, 1.º andar e sótão (Figura 3). Tendo em conta as informações apresentadas na memória descritiva do edifício, as fundações foram executadas com pedra rija e argamassa de cal hidráulica e areia ao traço volumétrico 1:3. As paredes de empenas apresentam espessuras de 0,50 m no rés-do-chão e 0,40 m no 1.º andar e são construídas por alvenaria de pedra calcária e argamassa de cal e areia ao traço volumétrico 1:2,5. As paredes divisórias são construídas em alvenaria de tijolo. Os pavimentos são de madeira, constituído por madeira de pinho com secção transversal de 0,16 m x 0,08 m. A casa de banho do 1.º andar é constituída por um pavimento de betão armado, com ladrilho de mosaico.

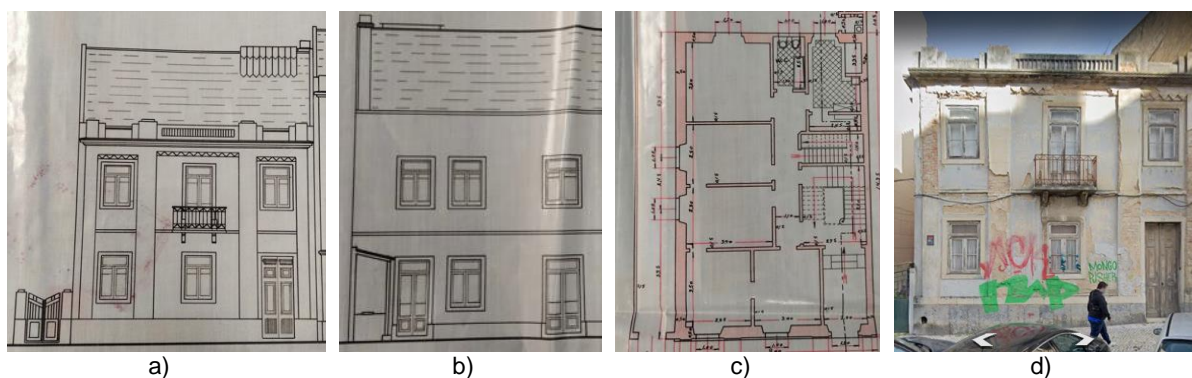


Figura 3. Edifício da rua Augusto Gil n.º 26: a) fachada principal; b) fachada tardoz; c) planta do rés-do-chão e d) imagem atual do edifício (Google Earth, Junho 2022)

2.4 Processo do edifício situado na Rua Joaquim Casimiro n.º 5

A construção deste edifício iniciou-se em 1930, sendo composto por uma cave, rés-do-chão e mais dois andares, com dois fogos por andar (Figura 4). De acordo com as informações que constam da memória descritiva, a argamassa é composta por um traço volumétrico de 1:1,5 na alvenaria em fundação e de 1:2 na alvenaria em elevação. As casas de banho e cozinhas possuem os pavimentos em betão armado. Em 1949 procedeu-se à ampliação do edifício com mais um andar; as paredes do 3.º andar são constituídas por alvenaria de pedra com argamassas de assentamento de cimento e areia ao traço volumétrico de 1:3. As paredes de

empena são constituídas por alvenaria de blocos de cimento e as paredes divisórias são construídas na mesma prumada da dos andares inferiores e executadas em alvenaria de tijolo com argamassa de cimento e areia ao traço volumétrico 1:3. Os pavimentos são em madeira com vigas de secção transversal de 0,16 m x 0,08 m, com exceção dos pavimentos das cozinhas, casas de banho e marquises, que são constituídos em betão armado e revestidos com mosaicos hidráulicos.

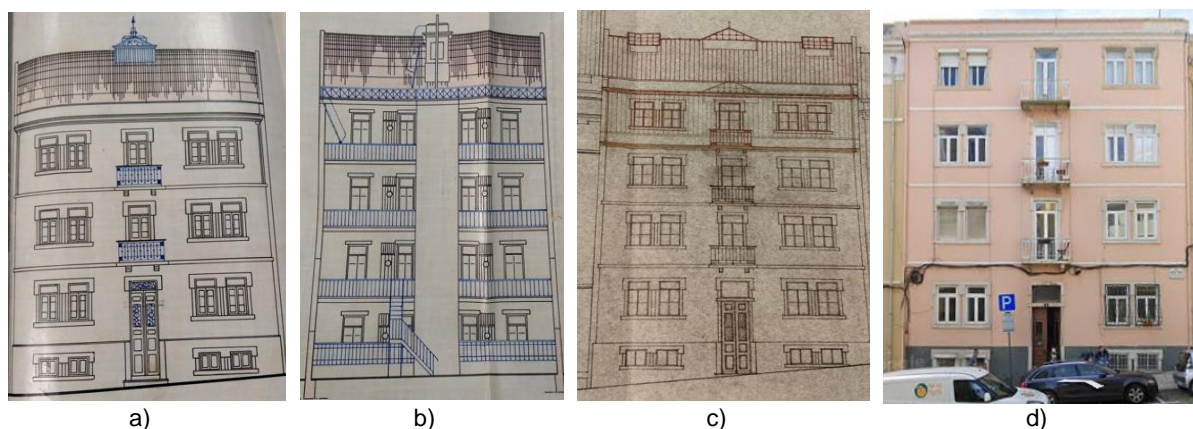


Figura 4. Edifício da rua Joaquim Casimiro n.º 5: a) fachada principal; b) fachada tardoz; c) fachada principal em 1949 e d) imagem atual do edifício (Google Earth, Junho 2022)

2.5 Processo do edifício situado na Praça João do Rio n.º 12

A construção deste edifício iniciou-se em 1942 e foi finalizada em agosto de 1945. O edifício é composto por rés-do-chão e cinco andares, com dois fogos por andar (Figura 5). De acordo com a memória descritiva do edifício, verifica-se que as fundações foram construídas com alvenaria de pedra “rija” e argamassa de cimento ao traço 1:3:5, com uma primeira camada de betão com 0,50 m de altura. As fachadas e empenas são constituídas por alvenaria de pedra “macia” com argamassa de cimento, ao traço volumétrico 1:5. As paredes interiores são de alvenaria de tijolo com argamassa de cimento e todos os pavimentos do edifício foram efetuados em betão armado. Verificou-se que, ao longo da construção do edifício, foram realizadas algumas alterações, conforme foi relatado nos relatórios de visita e nos autos de vistoria, constantes no processo do edifício. As alterações efetuadas tiveram como principal motivo a dificuldade de aquisição no mercado de tijolo maciço ou tijolo com as dimensões inicialmente propostas.

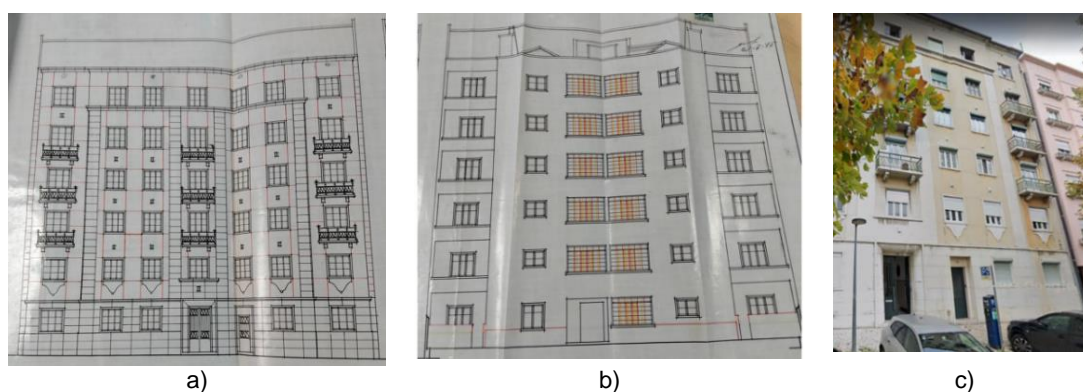


Figura 5. Edifício da Praça João do Rio n.º 12: a) fachada principal; b) fachada tardoz; c) imagem atual do edifício (Google Earth, Junho 2022)

2.6 Processo do edifício situado na Avenida Almirante Reis n.º 246

A construção deste edifício iniciou-se em 1943 e é composto por uma cave, rés-do-chão e mais cinco andares, com dois fogos por andar (Figura 6). Através da memória descritiva do edifício, constata-se que a argamassa usada para toda a construção é de cimento e areia ao traço volumétrico 1:4. As fundações são preenchidas com pedra “rija” e argamassa “hidráulica” ao traço 1:5. Os pavimentos de madeira têm o vigamento com uma secção transversal de 0,16 m x 0,08 m com espaçamento entre eles, eixo a eixo, de 0,40 m. Os pavimentos das casas de banho, cozinhas e marquises, são em betão armado revestidos a mosaico, com espessura uniforme de 0,12 m. A fachada principal e parte da fachada posterior são de alvenaria de pedra “rija” (alvenaria de pedra argamassada) com espessura de 1,0 m na parte correspondente à cave e decrescendo de 0,10 m em cada um dos andares superiores até perfazer a espessura de 0,40 m na parte correspondente ao 5.º andar. As paredes divisórias são de alvenaria de pedra, tijolo maciço e alvenaria de tijolo furado.

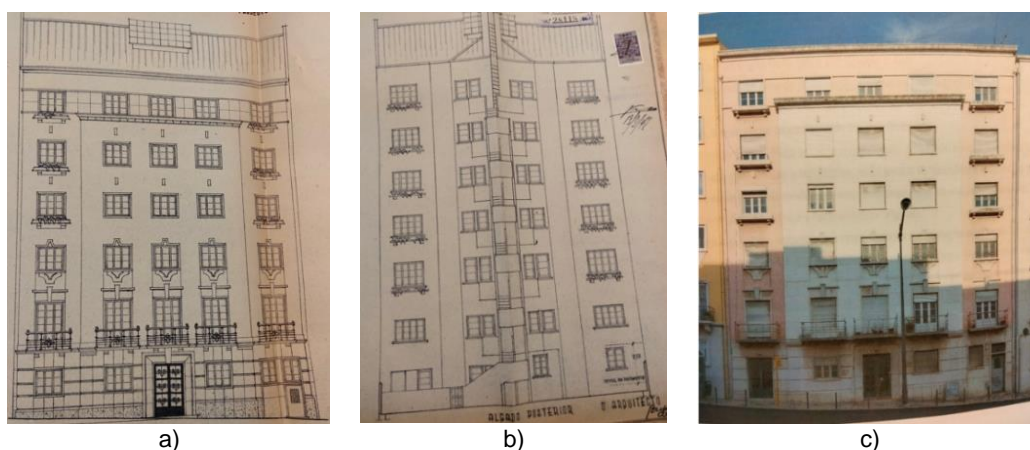


Figura 6. Edifício da Av. Almirante Reis n.º 246: a) fachada principal; b) fachada tardoz e c) imagem do edifício no ano de 2017 (Arquivo Municipal – AML)

2.7 Síntese dos dados recolhidos

Os dados revelam que o pé direito de todos os edifícios estudados varia entre 3,00 e 3,25 m, e o número de pisos varia de dois a cinco pisos. Na maioria dos processos analisados, as fachadas são de alvenaria de pedra argamassada, as divisórias são maioritariamente de tijolo cerâmico furado e os pavimentos são normalmente de madeira, sendo que, nas zonas da casa de banho e da cozinha, os pavimentos são de betão armado. Relativamente às argamassas de assentamento, três dos edifícios analisados utilizaram argamassa de cimento, sendo que apenas o edifício da Rua Augusto Gil n.º 24 e n.º 26 utilizou argamassa à base de cal e areia, com traços variados, conforme se indica no Quadro 1.

Quadro 1. Síntese das informações dos cinco edifícios analisados

Caso de estudo	Ano de construção	Tipo de alvenaria	Tipo de argamassa	Tipo de pavimento
Rua Augusto Gil n.º 24	1930	Pedra argamassada (fachadas)	Cal e areia (traço 1:2)	Todo o pavimento em betão armado
Rua Augusto Gil n.º 26	1932	Alvenaria de tijolo (divisórias)	Cal e areia (traço 1:2,5)	Pavimento de madeira com lajes de betão armado na zona da casa de banho
Rua Joaquim Casimiro n.º 5	1930	Alvenaria de tijolo (divisórias)	Cimento e areia (traço 1:2)	Pavimento de madeira com lajes de betão armado na zona da casa de banho e cozinha
Praça João do Rio n.º 12	1942	Alvenaria de tijolo (divisórias)	Cimento e areia (traço 1:5)	Todo o pavimento em betão armado
Avenida Almirante Reis n.º 246	1943	Alvenaria de tijolo (divisórias)	Cimento e areia (traço 1:4)	Pavimento de madeira com lajes de betão armado na zona da casa de banho, cozinha e marquises

3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO E DOS TIJOLOS CERÂMICOS MACIÇOS

3.1 Caracterização mecânica das argamassas de assentamento

A composição da argamassa de assentamento foi definida tendo em conta os trabalhos de investigação do projeto RESIST-2020 e da investigação realizada por Demaj *et al.* [6]. Utilizaram-se como matérias-primas cimento, cal aérea hidratada e areia de rio.

Foram selecionados dois tipos de argamassas bastardas à base de cimento e cal aérea ao traço volumétrico 1:3:12 e 1:4:15 (cimento:cal aérea:areia). Foram realizados provetes dessas argamassas, nos quais foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: determinação do módulo de elasticidade dinâmico através de frequência de ressonância, de acordo com os critérios estabelecidos na norma NP EN 14146 [7]; medição da velocidade de propagação de ultrassons, de acordo com os critérios estabelecidos na norma NP EN 12504-4 [8] e determinação da resistência à tração por flexão e resistência à compressão, de acordo com a norma EN 1015-11 [9]. Os resultados obtidos nos referidos ensaios, para os dois tipos de argamassa, aos 90 dias, são os que se apresentam no Quadro 2. A Figura 7 apresenta os provetes de argamassa sujeitos aos ensaios de caracterização.

Quadro 2. Valores médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de assentamento BAS_1:3:12 e BAS_1:4:15 aos 90 dias

		BAS_1:3:12	BAS_1:4:15
Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)	Frequência de ressonância	3325	2366
	Velocidade propagação de ultrassons (método direto)	2999	2217
	Velocidade propagação de ultrassons (método indireto)	2861	2137
Resistência à flexão (MPa)		0,36	0,22
Resistência à compressão (MPa)		0,81	0,46

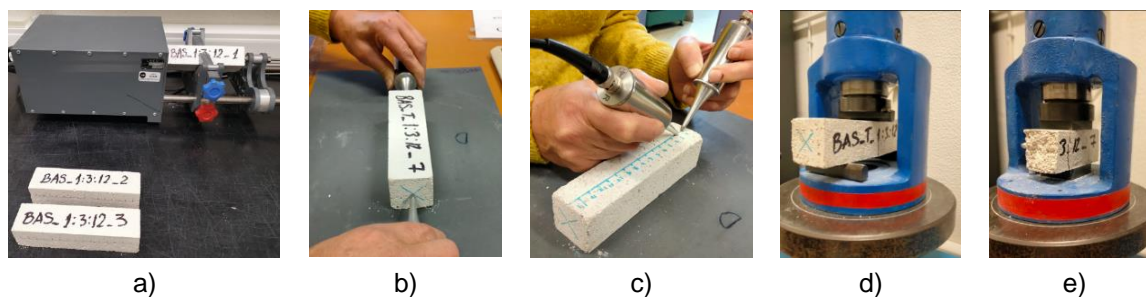


Figura 7. Ensaio de caracterização da argamassa de assentamento: a) frequência de ressonância; b) velocidade de propagação de ultrassons (método direto); c) velocidade de propagação de ultrassons (método indireto); d) resistência à flexão e e) resistência à compressão

Tendo em conta os valores da resistência à flexão e compressão obtidos aos 90 dias de idade, foi escolhida para construção das paredes de alvenaria a argamassa bastarda ao traço volumétrico 1:3:12 (cimento:cal:areia) com a designação BAS_1:3:12 por apresentar resistências similares às argamassas de assentamento de paredes de alvenaria resistente da tipologia em estudo, estudadas por Marques [10].

Foram construídos provetes de parede de alvenaria de tijolo cerâmico maciço (*wallettes*) cujas propriedades se pretendiam que fossem semelhantes às paredes de alvenaria resistentes de tijolo cerâmico maciço dos edifícios antigos. Durante a construção dos *wallettes* foram recolhidas, de forma aleatória, três amostras de argamassa de assentamento ao traço 1:3:12 (cimento:cal:areia). Estas recolhas foram denominadas por BAS_REC1, BAS_REC2 e BAS_REC3. Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização destas argamassas aos 28, 90 e 180 dias são os que se apresentam no Quadro 3.

Quadro 3. Valores médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas de assentamento utilizadas nos *wallettes* aos 28, 90 e 180 dias

Identificação da amostra		BAS_REC1			BAS_REC2			BAS_REC3		
Idade (dias)		28	90	180	28	90	180	28	90	180
Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)	Frequência de ressonância	2787	2834	3053	2700	2952	2990	3245	3381	3669
	Velocidade Propagação de Ultrassons (método direto)	2472	3110	2684	2385	2608	2559	2842	2700	3003
	Velocidade Propagação de Ultrassons (método indireto)	2257	2821	2424	2195	2417	2141	2691	2550	2789
Resistência à flexão (MPa)		0,37	0,36	0,13	0,28	0,32	0,12	0,34	0,36	0,14
Resistência à compressão (MPa)		0,64	0,88	0,80	0,62	0,63	0,71	0,68	0,76	0,93

3.2 Caracterização mecânica dos tijolos cerâmicos maciços

Foram escolhidos dois tipos de tijolos de fábricas diferentes, denominados TMF e TML, para a construção dos *wallettes*. Esses tijolos foram sujeitos a ensaios de resistência à compressão, de acordo com a norma NP EN 772-1 [11], e verificou-se que os tijolos TMF são os mais adequados para construção dos *wallettes* porque apresentaram resistências

semelhantes aos tijolos originais pertencentes às paredes de alvenaria resistente da tipologia em estudo, que tinham sido estudados por Marques [10].

As dimensões dos tijolos foram medidas de acordo com a norma EN 772-16 [12], apresentando em média 255 mm de comprimento, 120 mm de largura e 62 mm de altura. Para a realização dos ensaios de resistência à compressão, a preparação dos tijolos consistiu na regularização das faces de assentamento com uma argamassa de cimento e areia de rio ao traço 1:2, estando estas previamente humedecidas. O ensaio consistiu basicamente na colocação do provete na prensa para aplicação da carga de uma forma gradual a uma velocidade de carregamento de 8,5 kN/s, conforme se ilustra na Figura 8. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.



Figura 8. Ensaio de resistência à compressão dos tijolos e o mecanismo de rotura

Quadro 4. Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão para os dois tipos de tijolos

Tijolo	Área (mm ²)	Força de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)
TMF	30557	625,4	20,5
TML	21600	191,1	8,8

4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS *WALLETES*

4.1 Preparação dos *wallettes*

Foram construídos vários *wallettes* com a argamassa de assentamento bastarda BAS_1:3:12, ao traço 1:3:12 (cimento:cal aérea:areia) e pelos tijolos cerâmicos maciços TMF, com aparelho de assentamento a “uma vez” (em que as fiadas de tijolo são constituídas por dois tijolos lado a lado e um tijolo colocado transversalmente relativamente à espessura da parede), conforme se pode verificar na Figura 10. Foram selecionados três *wallettes* para realização de ensaios de compressão axial de acordo com a norma NP EN 1052-1 [13], permitindo assim determinar a resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da alvenaria alvo de estudo.

Os *wallettes* foram construídos sobre uma superfície horizontal plana que foi regularizada com uma camada de argamassa de cimento e areia ao traço 1:2 na face superior e inferior. Os *wallettes* permaneceram no local da construção por 90 dias e posteriormente foram transportados para o interior da sala de ensaios, onde permaneceram até à data do ensaio. Para transportar os *wallettes* recorreu-se a um dispositivo de madeira revestido com uma

camada de borracha, desenvolvido nos trabalhos de investigação de Marques [10]. O dispositivo de transporte é composto por duas peças de madeira que são apertadas com cintas ajustáveis a pelo menos três níveis de altura, sendo que cada uma dessas peças tem um ponto de suspensão, conforme se ilustra na Figura 9. Os três *wallettes* selecionados para realização do ensaio de resistência à compressão, W1, W2 e W3, foram medidos e apresentam em média 76 cm de comprimento, 26 cm de largura e 77 cm de altura. As juntas de argamassa de assentamento variam entre 1 cm a 1,5 cm. A geometria adotada foi semelhante aos trabalhos de Marques [10], por forma a poder-se reutilizar o equipamento e as metodologias desenvolvidas nesse trabalho de investigação.



Figura 9. Dispositivo de transporte dos *wallettes*

4.2 Instrumentação dos *wallettes*

Toda a instrumentação foi fixa ao *wallette* sobre o tijolo cerâmico, através da colagem dos suportes dos aparelhos de medição. Antes da colagem, os tijolos que iriam receber os suportes foram limpos retirando-se o excesso de argamassa e passando uma lixa fina para remoção da camada vidrada dos tijolos cerâmicos. Posteriormente fez-se a marcação da localização das bases de suporte dos aparelhos de medição diretamente no *wallette* e procedeu-se à respetiva colagem dessas bases, conforme ilustra a Figura 10.



Figura 10. Marcação e colagem das bases de suporte dos aparelhos de medição nos *wallettes*

Para medir a deformação da parede foram utilizados transdutores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) A configuração da instrumentação foi a mesma nos três *wallettes*, conforme se apresenta na Figura 11 e Figura 12. Foram colocados seis LVDTs do tipo W50 para medir o deslocamento vertical (quatro no *wallette* e dois no prato da prensa) e dois LVDTs do tipo W20 para medir deslocamentos horizontais. A colocação dos

LVDTs no prato da prensa permitiu a continuação da medição da deformação vertical mesmo após a remoção dos LVDTs do *wallete* (após se atingir a força de rotura máxima).

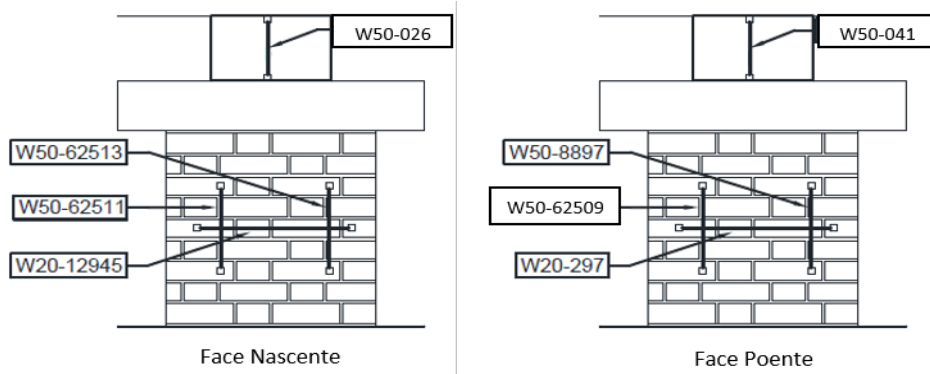


Figura 11. Localização dos LVDTs para medição dos deslocamentos em cada face dos *wallettes* (esquema adaptado do trabalho de Demaj *et al.* [6])

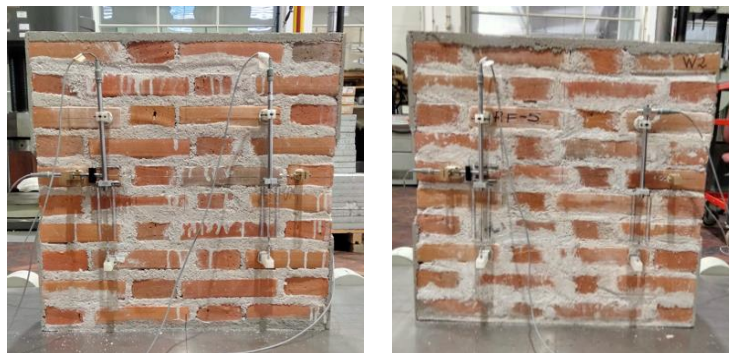


Figura 12. Instrumentação colocada em cada face de um dos *wallettes*

4.3 Ensaios de compressão axial

Para os ensaios de compressão axial seguiu-se a norma portuguesa NP EN 1052-1 [13]. Conforme o preconizado por esta norma, o *wallete* é colocado no centro da máquina de ensaio e aplica-se uma carga vertical uniforme no topo do *wallete* de uma forma gradual até que a rotura seja atingida. Escolheu-se adotar uma velocidade de aplicação da carga de 0,005 mm/s e uma frequência da amostragem de 5 Hz. Os ensaios foram realizados na prensa MFL UPS 5000V, conforme ilustra a Figura 13.



Figura 13. Ensaio de compressão axial realizado num dos *wallettes*

Com o aparecimento de algumas fissuras no *wallete* e após ser atingida a força de rotura, os seis LVDTs colocados diretamente no *wallete* foram retirados, de modo a que não sofressem danos com eventuais roturas localizadas e queda de material, permanecendo apenas os LVDTs no prato superior da prensa, que registam as deformações verticais desde o início até ao fim do ensaio.

4.4 Resultados de ensaios

Para a caracterização mecânica dos *wallettes* foram efetuados os cálculos da resistência à compressão, R_c ,

$$R_c = \frac{F_{i,max}}{A_i} \quad (1)$$

o módulo de elasticidade, E_i ,

$$E_i = \frac{F_{i,max}}{3 \times \varepsilon_v \times A_i} \quad (2)$$

e coeficiente de Poisson, ν ,

$$\nu = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v} \quad (3)$$

onde $F_{i,max}$ é a carga máxima aplicada, A_i é a área da secção do provete sujeita à carga, ε_v as extensões verticais e ε_h as extensões horizontais medidas para um terço da tensão máxima atingida. As extensões verticais e horizontais (ε_v e ε_h) são calculadas pela equação 4:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (4)$$

onde ΔL , é a diferença entre o comprimento medido entre dois pontos para um terço da tensão máxima e L_o é o comprimento inicial.

Os três *wallettes* apresentam valores de tensões de rotura muito próximos, com um valor médio de 6,4 MPa. Os respetivos mecanismos de rotura são também muito semelhantes entre si, conforme se ilustra na Figura 14.

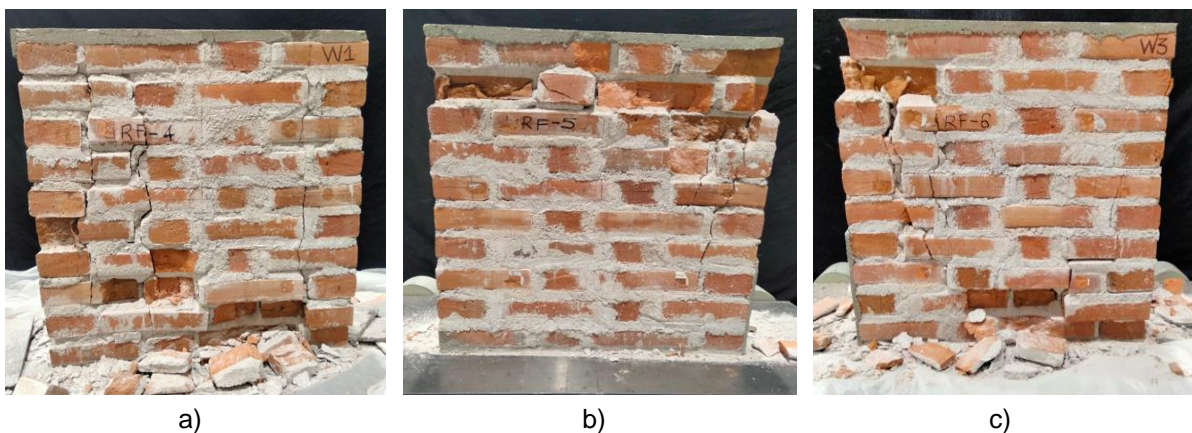


Figura 14. Mecanismos de rotura obtidos no ensaio de compressão axial para os *wallettes* ensaiados: a) W1; b) W2 e c) W3

Na Figura 15 apresenta-se os gráficos que relacionam as extensões verticais e horizontais com a tensão aplicada para cada *wallette* ensaiado. A média das extensões horizontais, dadas pelas deformações medidas nos transdutores de deslocamento colocados no *wallette*, na posição horizontal é representada pela linha azul. A média das extensões verticais, dadas pelas deformações medidas nos transdutores de deslocamento colocados no *wallette*, na posição vertical é representada pela linha vermelha. A média das extensões, dadas pelas deformações obtidas através dos dois LVDTs colocados no prato superior da prensa, após a remoção da instrumentação colocada no *wallette*, é representada pela linha verde. A linha roxa representa o período em que a prensa está em pausa, aguardando a remoção dos LVDTs.

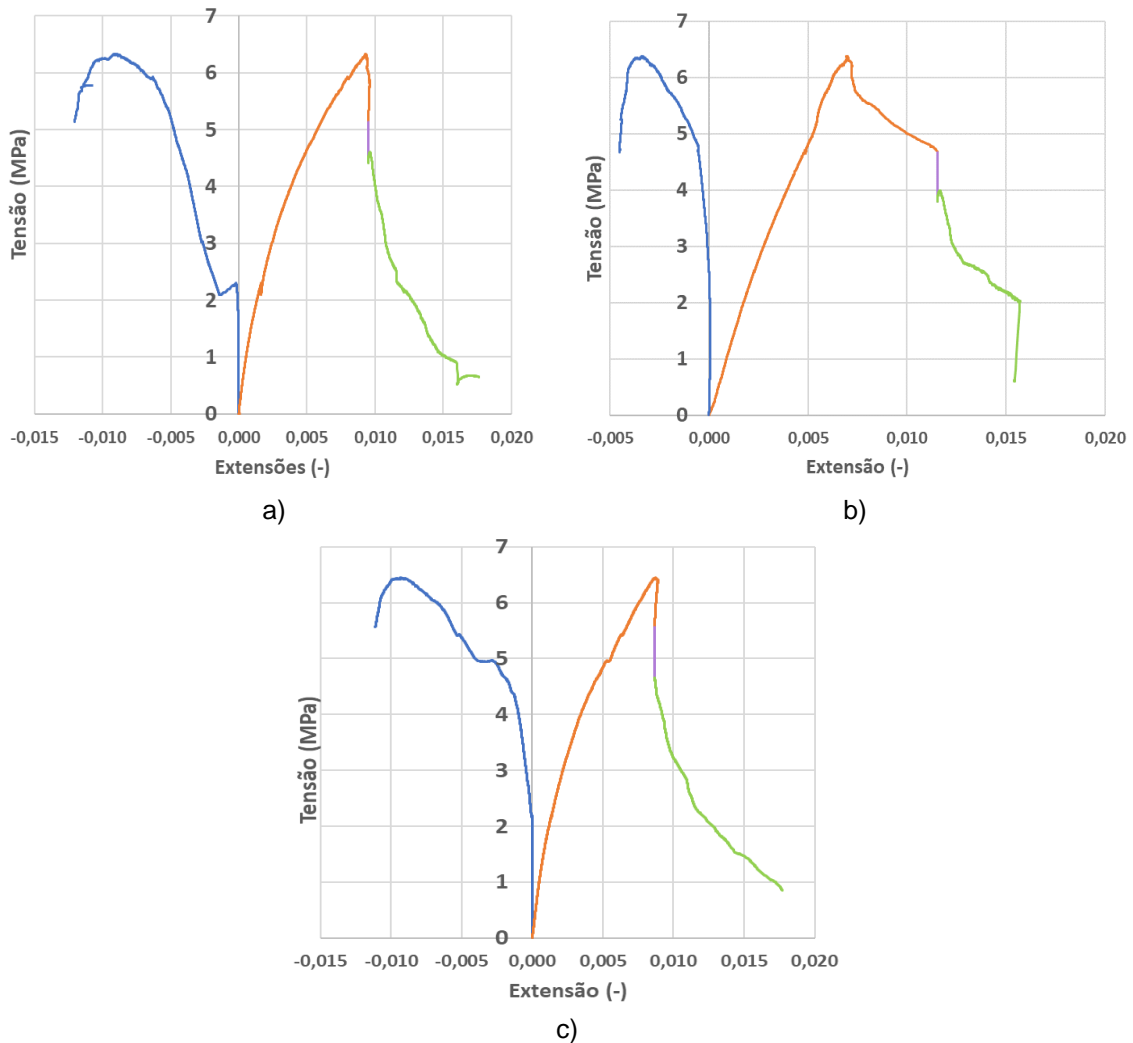


Figura 15. Gráficos da tensão vs extensão vertical e horizontal para os *wallettes* ensaiados: a) W1; b) W2 e c) W3

O módulo de elasticidade de cada *wallette* ensaiado foi determinado através do traçado de uma linha tangente no gráfico da média das extensões verticais vs tensão, no ponto em que a tensão corresponde a um terço da tensão máxima de rotura. A inclinação dessa linha corresponde ao módulo de elasticidade da alvenaria.

O coeficiente de Poisson define-se como razão entre a média das extensões horizontal e a média das extensões verticais medidas no *wallette* para um terço da tensão máxima atingida,

conforme equação (3). Este coeficiente traduz a tendência que um material tem em expandir-se em direções perpendiculares à direção da força de compressão. O Quadro 5 apresenta os valores da força de rotura, tensão de rotura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson que foram obtidos para os *wallettes* ensaiados.

Quadro 5. Resultados obtidos no ensaio de compressão axial dos *wallettes*

<i>Walette</i>	Força de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coeficiente de Poisson (MPa)
W1	1248	6,3	1471	0,08
W2	1244	6,4	1144	0,02
W3	1267	6,5	1615	0,02
Valor médio	1253	6,4	1410	0,04
Desvio-padrão	12	0,1	241	0,03
Coeficiente de variação	0,01	0,01	0,17	0,90

Os módulos de elasticidade obtidos para os *wallettes* ensaiados (Quadro 5) são semelhantes entre si, com valores médios de 1253 MPa, sendo estes valores muito relacionáveis com os obtidos nas paredes de alvenaria originais estudadas por Marques [10] conforme era pretendido. No que diz respeito ao coeficiente de Poisson, os resultados obtidos não são tão satisfatórios tendo em conta a dificuldade da obtenção de medições mais fiáveis. Para a obtenção de valores mais realistas era necessária uma medição (deformação horizontal) que abrangesse um maior número de juntas de argamassa de assentamento verticais; portanto seriam necessários provetes com maiores dimensões.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos no ensaio para determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dinâmico para as argamassas de assentamento utilizadas na construção dos *wallettes* são na ordem de 0,3 MPa e 2707 MPa, respetivamente, e mostram-se muito coerentes com os valores obtidos no estudo realizado por Marques [10]. As argamassas originais à base de cal aérea com areia ao traço 1:2,5 de edifícios antigos apresentam valores de resistência à compressão de 1,3 MPa e um módulo de elasticidade dinâmico de 1628 MPa (através do ensaio de medição da velocidade propagação de ultrassons pelo método direto).

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos tijolos cerâmicos maciços TML foam, em média, de 8,8 MPa, sendo que, com os tijolos TMF, registou-se um valor médio de resistência à compressão de 20,5 MPa. Os tijolos originais estudados por Marques [10] apresentam um valor médio de resistência à compressão de 35,3 MPa, enquanto nos estudos de Drougkas *et al.* [14] os tijolos apresentam um valor médio de resistência à compressão de cerca de 23,2 MPa. Neste contexto, considera-se que os tijolos do tipo TMF são os mais representativos dos tijolos de paredes de alvenaria da tipologia em estudo, sendo que foi esse o tipo de tijolos escolhidos para a construção dos *wallettes*.

Os resultados das resistências à compressão das alvenarias obtidos por Costigan *et al.* [15] e Marques [10] são relativamente semelhantes e seguem o mesmo padrão dos valores obtidos neste artigo. Note-se que esta comparação não pode ser feita de uma forma direta, tendo em conta que nos trabalhos de Costigan *et al.* [15] foi utilizado uma argamassa de assentamento à base de cal aérea hidratada ao traço 1:3 (com um valor para a tensão de compressão de 1,4 MPa), correspondendo a uma tensão de compressão da alvenaria de 3,9 MPa. Uma argamassa de assentamento à base de cimento e cal ao traço 1:0,5:4 (com um valor para a tensão de compressão de 22,2 MPa), também foi estudado por Costigan *et al.* [15], obtendo valores de tensão de compressão da alvenaria de 9,7 MPa. O mesmo se verifica com os resultados obtidos por Marques [10] para a alvenaria original, constituída por uma argamassa de assentamento à base de cal aérea ao traço 1:2,5 (com um valor para a tensão de compressão de 1,3 MPa), correspondendo a uma tensão de compressão da alvenaria de 5,4 MPa. Os valores obtidos no presente estudo apresentam uma tensão de compressão da alvenaria de 6,4 MPa, utilizando uma argamassa de assentamento bastarda ao traço 1:3:12 (cimento:cal:areia) (com um valor para a tensão de compressão de 0,27 MPa).

Este estudo permitiu concluir que as propriedades da argamassa condicionam o comportamento da alvenaria, visto que com o aumento da resistência da argamassa aumenta também a resistência da alvenaria. Alguns autores comprovam também que o aumento da resistência da argamassa está diretamente relacionado com o aumento da resistência da parede de alvenaria, como é o caso de Nalon *et al.* [16] que apresenta valores da resistência e rigidez de estruturas de alvenaria e que mostra como essas características estão diretamente relacionadas com as propriedades de seus componentes (argamassas de assentamento e tijolos cerâmicos) e à complexa interação entre eles.

Para além da caracterização da resistência à compressão uniaxial deste tipo de paredes apresentada neste artigo, este estudo está incluído num projeto de investigação mais vasto onde estão incluídos ensaios de compressão diagonal de *walletes* com e sem reforço e ensaios cíclicos de paredes à escala real também com e sem reforço.

O projeto de investigação pretende, de alguma forma, colmatar a lacuna na procura de soluções de reforço eficazes para edifícios antigos de alvenaria. O projeto “RESIST-2020 – Reabilitação Sísmica de Edifícios Antigos de Alvenaria-Betão” estuda o comportamento ao corte no plano de paredes de alvenaria de tijolo cerâmico maciço e avalia a eficácia de soluções de reforço à base da introdução de varões do tipo TSB – Twisted Steel Bars com vários tipos de configurações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) através do financiamento do projeto PTDC/ECI-EGC/30567/2017, “RESIST-2020 – Reabilitação Sísmica de Edifícios Antigos de Alvenaria-Betão”.

REFERÊNCIAS

- [1] Rollo, M.F. – *Dimensões e réplicas intemporais do Terramoto de 1755*. Revista Ingenium 89, 2005, Universidade NOVA de Lisboa/FCSH.
- [2] Pinho, F. – *Paredes de edifícios Antigos em Portugal*. Coleção Edifícios, CED 8, 2.^a ed, 2008, LNEC.
- [3] Lamego, P.R.C.; Lourenço, P.B. – “Caracterização e comportamento sísmico de edifícios de “Placa””, *Comunicação apresentada no 4.º Congresso Nacional (Congresso Construção 2012)*, 2012, 11 p.
- [4] Monteiro, M.; Bento, R. – “Characterization of ‘Placa’ Buildings”. *Relatório ICIST*, DTC n.º 02/2012, 2012, 34 p.
- [5] Instituto Nacional de Estatística – Disponível em https://censos.ine.pt/scripts/db_censos_2021.html, 2021.
- [6] Demaj, A.; Gago, A. S.; Marques, A. I.; Ferreira J. G. – “In-Plane Seismic Behavior of Brick Masonry Walls Reinforced with Twisted Steel Bars and Conventional Steel Bars”. *Buildings* 2022 12, 421. <https://doi.org/10.3390/buildings12040421>.
- [7] NP EN 14146. – *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*, Instituto Português da Qualidade, 2006.
- [8] NP EN 12504-4 – *Ensaio do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultrassons*. Instituto Português da Qualidade, 2007.
- [9] EN 1015-11. – *Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. European Committee for Standardization, 1999.
- [10] Marques, A.I.M. – *Reabilitação de edifícios antigos – redução da vulnerabilidade sísmica através do reforço de paredes* (Tese de Doutoramento), LNEC/Instituto Superior Técnico, 2020, 857 p.
- [11] NP EN 772-1 – *Método de ensaio de blocos para alvenaria Parte 1: Determinação da resistência à compressão*. Instituto Português da Qualidade, 2002.
- [12] EN 772-16 – *Methods of test for masonry units - Part 16: Determination of dimensions*. European Committee for Standardization, 2011.
- [13] NP EN 1052-1 – *Método de ensaio para alvenaria Parte 1: Determinação da resistência à compressão*. Instituto Português da Qualidade, 2002.
- [14] Drougkas A.; Roca P.; e Molins C. – “Compressive strength and elasticity of pure lime mortar masonry”. *Materials and Structures* 49, 2016, p. 983-999. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/272390195_Compressive_strength_and_elasticity_of_pure_lime_mortar_masonry.
- [15] Costigan, A.; Pavía, S.; Kinnane, O. – “An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry under compression” *Journal of Building Engineering* 4, 2015, p. 283-294.
- [16] Nalon, G. H.; Santos, C. F. R.; Pedroti, L. G.; Ribeiro, J. C.; Verissimo, G. S.; Ferreira F. A. – “Strength and failure mechanisms of masonry prisms under compression, flexure and shear: Components mechanical properties as design constraints”, *Journal of Building Engineering* 28, 101038, 2020. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219305583>

Vaz, Maria Salomé; Marques, Ana Isabel; Faria, Paulina; Demaj, Armando; Sousa Gago, António; Gomes Ferreira, João (2022), Caracterização da resistência à compressão uniaxial de paredes de alvenaria de tijolo cerâmico maciço de edifícios antigos. JPEE2022 - 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2022, 12º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Carlos Pina, José Manuel Catarino, Ana Sofia Louro, Teresa O. Santos (Eds.), RNI 114. Lisboa, LNEC, 9-11 novembro 2022, ISBN 978-972-49-2323-9, 2015-2031.