

Caracterização mecânica de paredes de alvenaria de bloco de betão existentes no arquipélago dos Açores

Mechanical characterization of existing infill panels of concrete block on Azores islands

Patrícia Raposo
André Furtado
António Arêde
Hugo Rodrigues
Humberto Varum

Resumo

Durante os últimos anos observou-se um crescimento significativo dos edifícios de betão armado no arquipélago dos Açores o que, associado ao seu historial sísmico, com particular destaque para os grupos Central e Oriental, e às deficiências de comportamento das alvenarias de enchimento reveladas em diversos sismos recentes a nível internacional, reforça a importância de se conduzirem estudos visando caracterizar o comportamento expectável dos edifícios existentes face a um sismo. A falta de estudos de caracterização das alvenarias de blocos de betão de enchimento utilizadas nos Açores justifica o presente estudo, em que se realizou uma caracterização mecânica, através de ensaios normalizados dos seus constituintes, unidades de alvenaria (blocos de betão produzidos no Faial) e argamassa, e de painéis executados em laboratório. Nestes painéis foram realizados ensaios de compressão simples, de tração por compressão diagonal e de flexão (segundo planos de rotura paralelos e perpendiculares às juntas horizontais), reportando-se aqui os resultados e as principais conclusões dos ensaios realizados.

Abstract

Following the seismic history of the Azores, with more emphasis on the Central and Eastern groups, which associated with the deficient behaviour revealed by the infill masonry walls in recent worldwide earthquakes, shows that it's necessary to conduct studies to characterize the behaviour of existing buildings under seismic action. The evaluation of seismic vulnerability of Azores buildings is of great importance in order to provide an effective evaluation of casualties and losses due to future earthquakes. The lack of mechanical characterization studies of the Azorean infill walls blocks justifies the investigation herein reported, which includes experimental tests on sample sets to evaluate mechanical properties of masonry components (units and mortar) and assemblages (low walls) made with masonry units from Faial Island. Normal compressive, diagonal tensile/shear and out-of-plane flexural strengths (parallel and perpendicular to the horizontal joints) were obtained from tests made according to the respective standard procedures, which results are addressed here.

Palavras-chave: Estruturas de betão armado / Paredes de enchimento / Comportamento sísmico de estruturas / Caracterização mecânica / Ensaios experimentais

Keywords: Reinforced concrete structures / Infill masonry walls / Mechanical characterization / Experimental tests

Patrícia Raposo

Investigadora
CONSTRUCT, LESE – FEUP
Porto, Portugal
praposo@fe.up.pt

André Furtado

Investigador
CONSTRUCT, LESE – FEUP
Porto, Portugal
afurtado@fe.up.pt

António Arêde

Professor Associado
CONSTRUCT, LESE – FEUP
Porto, Portugal
aarede@fe.up.pt

Hugo Rodrigues

Professor Ajunto
RISCO – ESTG-IPLeia
Leiria, Portugal
hugo.f.rodrigues@ipleiria.pt

Humberto Varum

Professor Catedrático
CONSTRUCT, LESE – FEUP
Porto, Portugal
hvarum@fe.up.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.

RAPOSO, P.; FURTADO, A.; ARÊDE, A. [et al.] – Caracterização mecânica de paredes de alvenaria de bloco de betão existentes no arquipélago dos Açores. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 3. ISSN 2183-8488. (março 2017) 49-62.

1 Introdução

Ao longo da história dos Açores, têm sido registadas diversas perdas humanas e materiais em consequência dos diversos sismos que afetaram a região devido ao seu enquadramento tectónico e vulcânico. Os sismos da Terceira (1980) e do Faial (1998) evidenciaram deficiências de comportamento dos edifícios de alvenaria tradicional, tendo-se registado inúmeras perdas de vidas humanas, danos e colapsos estruturais. Sismos recentes têm alertado a comunidade científica para que as estruturas antigas não são as únicas a apresentar elevada vulnerabilidade sísmica, devendo as estruturas de betão armado ser também alvo de estudos aprofundados, focando em particular a influência das paredes de enchimento na sua resposta estrutural. Diversos trabalhos têm sido realizados visando caracterizar o comportamento sísmico das estruturas de alvenarias de pedra nos Açores, mas existe falta de estudos, mais recentes, sobre alvenarias de enchimento de bloco de betão. É importante caracterizar as características mecânicas destes elementos para no futuro avaliar a sua influência no comportamento sísmico deste tipo de edifícios, dado que após o sismo de 1980 na Terceira houve um grande impulso na construção de edifícios com estruturas em pórtico de betão armado e paredes de enchimento em bloco de betão.

Este sistema construtivo, que inclui enchimento de alvenaria de bloco de betão, confinada ou não por elementos de betão armado, carece ainda de caracterização adequada de modo a que seja possível uma correta avaliação do seu desempenho sísmico em termos do seu comportamento no plano e para fora do seu plano. Apesar de as paredes de enchimento serem maioritariamente consideradas elementos não estruturais, podem, no entanto, desempenhar um papel decisivo na resposta estrutural de um edifício, conforme o seu dimensionamento e disposição em altura e planta [1, 2].

Assim, no presente trabalho são apresentados resultados de ensaios experimentais de caracterização mecânica de muretes de alvenaria de blocos de betão produzidos no Faial, realizados no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LESE-FEUP). Foram realizados ensaios de caracterização material dos blocos de betão e da argamassa utilizada, e quatro tipos de ensaios de caracterização mecânica de muretes deste tipo de alvenaria, nomeadamente ensaios de compressão simples, de tração por compressão diagonal e de flexão (segundo uma direção de rotura paralela e perpendicular às juntas de assentamento). Informação mais detalhada sobre todos os ensaios pode ser encontrada em [3].

2 Caracterização mecânica de elementos de alvenaria de blocos de betão dos Açores

Foi realizada uma campanha de ensaios no Laboratório LESE-FEUP com o objetivo de caracterizar mecanicamente amostras de alvenaria de blocos de betão provenientes do Faial. Para este estudo foram executados ensaios de compressão em blocos de betão e ensaios de flexão e compressão em provetes de argamassa. Foram também realizados diversos ensaios em muretes construídos em laboratório, à escala real e de acordo com a metodologia construtiva adotada

naquela ilha. Ao longo desta secção serão apresentadas informações relativas aos provetes, *setup* experimental, instrumentação e resultados principais.

2.1 Materiais e aspetos construtivos

2.1.1 Caracterização dos blocos

Realizaram-se ensaios para determinar as propriedades físicas e mecânicas dos blocos constituintes dos provetes de alvenaria. Os blocos de betão com bagacinas, que são produzidos na ilha do Faial, possuem dimensões nominais de 400 × 270 × 200 mm³ (comprimento x espessura x altura) (Figura 1).

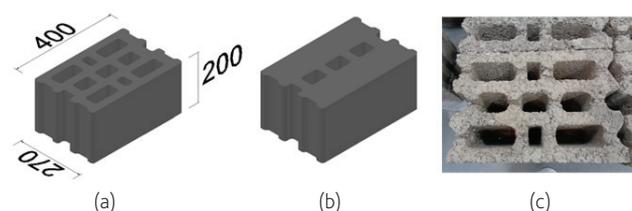


Figura 1 Bloco de betão do Faial: (a) dimensões em (mm); (b) perspetiva esquemática do bloco em estudo; (c) aspeto geral

A resistência à compressão das unidades de alvenaria foi determinada de acordo com a norma europeia NP EN 772-1 [4]. Seguindo os princípios apresentados na norma de ensaio, calculou-se a resistência à compressão normalizada, a partir das áreas brutas e efetivas de cada bloco, sendo esta última de 62% da área bruta.

Quadro II Propriedades físicas dos blocos

Lote	Provete	Massa				Massa volúmica			
		Massa (kg)	Média (kg)	Desvio Padrão (kg)	C.V. (%)	ρ (kg/m ³)	Média (kg/m ³)	Desvio Padrão (kg/m ³)	C. V. (%)
1	Bloco 1	25,305	24,8	0,8	3,4	377,687	369,7	12,5	3,4
	Bloco 2	23,520				351,045			
	Bloco 3	25,205				376,194			
	Bloco 4	25,040				373,731			
2	Bloco 1	23,470	24,6	0,8	3,3	350,299	366,5	12,2	3,3
	Bloco 2	24,520				365,970			
	Bloco 3	25,020				373,433			
	Bloco 4	25,870				386,119			
	Bloco 5	24,195				361,119			
	Bloco 6	24,245				361,866			

As características geométricas dos blocos de betão utilizados são apresentadas no Quadro I, no Quadro II apresentam-se os valores médios e correspondentes coeficientes de variação (C.V.) da massa e massa volúmica dos blocos e no Quadro III os valores da resistência, da resistência normalizada e do módulo de elasticidade obtido nos ensaios à compressão de quatro unidades de alvenaria.

Quadro I Propriedades geométricas dos blocos de betão

Bloco	
Comprimento (mm)	400
Altura (mm)	200
Espessura (mm)	270
Área total (mm ²)	108000
Área de vazios (mm ²)	41000
Percentagem de vazios (%)	37,96
n (%)	62,04

2.1.2 Caracterização das argamassas

As argamassas utilizadas na construção dos muretes de alvenaria foram preparadas com o tipo de cimento utilizado nas ilhas do Grupo Central e produzido pela Cimpor: CEM II/B-L 32,5N. Todas as argamassas foram produzidas ao traço de 1:4, com areia de granulometria média, escolhida de forma a ser semelhante à utilizada na generalidade da construção na ilha do Faial, visto não ter havido possibilidade de ter acesso a areia da ilha em questão [3]. Vários provetes de argamassa foram ensaiados para determinar a resistência à flexão e à compressão segundo a norma EN 1015-

Quadro III Propriedades mecânicas dos blocos de betão

Lote	Propriedade mecânica	Grandeza estatística	Unidades	Provetes
1	Resistência à compressão	Média	(N/mm ²)	3,1
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	0,7
		Coefficiente de variação	(%)	22,3
	Resistência à compressão normalizada	Média	(N/mm ²)	3,5
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	0,8
		Coefficiente de variação	(%)	22,3
	Módulo de elasticidade	Média	(N/mm ²)	519,1
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	448,8
		Coefficiente de variação	(%)	86,5
2	Resistência à compressão	Média	(N/mm ²)	4,3
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	0,7
		Coefficiente de variação	(%)	16,5
	Resistência à compressão normalizada	Média	(N/mm ²)	4,7
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	0,8
		Coefficiente de variação	(%)	16,5
	Módulo de elasticidade	Média	(N/mm ²)	1019,8
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	525,3
		Coefficiente de variação	(%)	51,5

11 [5]. Os resultados dos parâmetros mecânicos das argamassas produzidas e ensaiadas estão representados no Quadro IV. É visível que a argamassa usada na construção dos provetes ensaiados à compressão diagonal possui um elevado C.V. associado à resistência média à flexão, resultante de dois dos provetes ensaiados possuírem resistências bastante inferiores às dos restantes, provavelmente devido à existência de pequenos grumos soltos de argamassa que conduziram a descontinuidades internas do provete e afetaram a sua resistência à tração.

2.2 Resistência à compressão simples de muretes de alvenaria de blocos de betão

2.2.1 Descrição dos provetes e *setup* experimental

Os provetes para o ensaio de resistência à compressão foram executados de acordo com a norma NP EN 1052-1 [6], adotando-se as dimensões 600 × 1000 × 270 mm³ (comprimento x altura x espessura), como ilustrado na Figura 2 (a). O esquema de ensaio dos provetes encontra-se representado na Figura 2 (b), com o qual foi possível determinar a resistência e o módulo de elasticidade dos muretes em compressão simples.

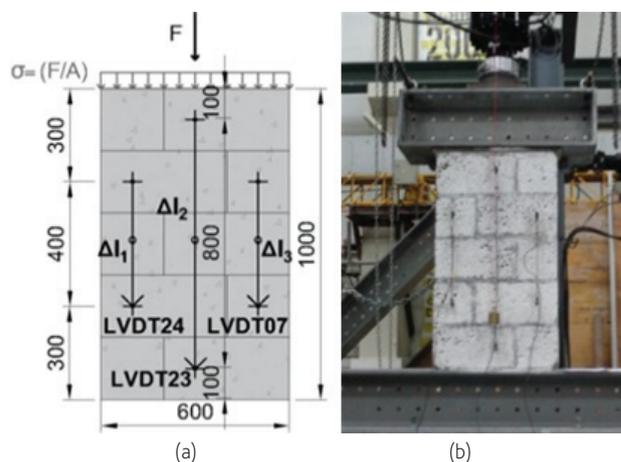


Figura 2 Configuração do ensaio de compressão simples dos muretes de alvenaria: (a) Dimensões do provete e distâncias de medida de deformações; (b) *Setup* experimental

A carga foi aplicada através de um atuador hidráulico com capacidade máxima de 1500 kN e curso de 150 mm. Acoplado a

Quadro IV Características mecânicas das argamassas

Finalidade da argamassa	Propriedade mecânica	Grandeza estatística	Unidades	Provetes
Ensaio de resistência à compressão de alvenarias	Resistência à flexão	Média	(N/mm ²)	3,8
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	0,7
		Coeficiente de variação	(%)	17,5
	Resistência à compressão	Média	(N/mm ²)	16,1
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	0,5
		Coeficiente de variação	(%)	2,9
Ensaio de resistência à tração por compressão diagonal de alvenarias	Resistência à flexão	Média	(N/mm ²)	4,0
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	1,8
		Coeficiente de variação	(%)	44,8
	Resistência à compressão	Média	(N/mm ²)	17,1
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	2,3
		Coeficiente de variação	(%)	13,3
Ensaio de resistência à flexão segundo um plano de rotura paralelo às juntas horizontais	Resistência à flexão	Média	(N/mm ²)	5,1
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	1,0
		Coeficiente de variação	(%)	18,9
	Resistência à compressão	Média	(N/mm ²)	15,5
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	3,1
		Coeficiente de variação	(%)	20,1
Ensaio de resistência à flexão segundo um plano de rotura perpendicular às juntas horizontais	Resistência à flexão	Média	(N/mm ²)	4,6
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	0,4
		Coeficiente de variação	(%)	8,2
	Resistência à compressão	Média	(N/mm ²)	12,9
		Desvio Padrão	(N/mm ²)	0,7
		Coeficiente de variação	(%)	5,4

este atuador utilizou-se um sistema rotulado sob a célula de carga para acomodar possíveis desnivelamentos espúrios do provete, resultantes de irregularidades na construção. A carga vertical foi distribuída no topo do provete através de um perfil metálico rígido (HEB300) conforme ilustrado na Figura 2 (b).

2.2.2 Instrumentação

No ensaio de compressão simples foram usados transdutores do tipo LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) para registar a evolução dos deslocamentos verticais nos provetes (neste caso, de encurtamento) e relacioná-la com a carga aplicada ao longo no tempo. Seguindo a norma de ensaio EN NP 1052-1 [6], foram

colocados quatro LVDT's nas faces frontal e traseira (próximos dos bordos laterais), acrescentando-se um LVDT vertical central em cada face como mostra a Figura 2 (a), para se ter redundância de resultados face aos previstos na norma. A posição dos transdutores manteve-se inalterada em todos os ensaios.

2.2.3 Análise de resultados

De acordo com a norma NP EN 1052-1, a resistência à compressão, f_{cj} , e o módulo de elasticidade, E_c , de cada provete, são determinados pelas seguintes equações:

$$f_{cj} = F_{i,max} / A_c \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

$$E_i = \frac{F_{i,max}}{3\varepsilon_i A_i} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^4 \varepsilon_j / 4 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4) / 4 \quad (3)$$

$$\varepsilon_j = d_j / h_{d_j} \quad (4)$$

em que $F_{i,max}$ representa a carga máxima aplicada, A_i a área carregada do provete i , d_j o deslocamento medido pelo transdutor de deslocamento j (dos quatro colocados nas posições laterais) para um terço da tensão máxima, h_{d_j} o comprimento entre os dois pontos de fixação do mesmo transdutor e ε_i a média aritmética das extensões ε_j obtidas nos referidos transdutores. Para cada provete calcularam-se as tensões e as extensões de compressão medidas ao longo do ensaio, permitindo traçar a curva tensão-extensão, a partir da qual se obteve o módulo de elasticidade (secante) E_i de cada provete, para uma tensão igual a 1/3 da tensão máxima atingida e correspondente extensão média obtida das quatro medidas dos LVDTs laterais.

Determinou-se igualmente a resistência característica à compressão, f_k , dos provetes de alvenaria através da equação (5):

$$f_k \leq f / 1,2 \Delta f_k \leq f_{i,min} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (5)$$

onde f é a resistência média de todos os provetes de alvenaria e $f_{i,min}$ o valor mínimo da resistência à compressão de um provete de alvenaria. No Quadro V apresentam-se os valores obtidos para a resistência à compressão de 3 provetes, ilustrando-se na Figura 3 (a) a curva tensão-deformação de compressão obtida ao longo do ensaio.

Para a resistência à compressão dos três provetes ensaiados regista-se um valor médio de 2,4 N/mm² com um coeficiente de variação de 15,5%, que é aceitável e consentâneo com o intervalo de valores obtido (2,01 a 2,74 N/mm²), decorrente de inevitáveis e ligeiras diferenças de execução dos provetes; o correspondente valor característico é 2,0 N/mm².

O Quadro VI inclui os valores do módulo de elasticidade à compressão, E_i , calculado para cada um dos 3 provetes pelo procedimento da norma deste ensaio (NP EN 1052-1), variando entre 3375,8 e 6810,2 N/mm², bem como o respetivo valor médio (5432,1 N/mm²) e coeficiente de variação de 34,4%. A maior dispersão associada ao módulo de elasticidade está certamente

Quadro V Resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão de alvenarias

Provete	F_{max}				f_i			
	F_{max} (N)	Média (N)	Desvio Padrão (N)	C.V. (%)	f_i (N/mm ²)	Média (N)	Desvio Padrão (N)	C. V. (%)
C ₁	324853,52				2,01			
C ₂	387500,00	385656,7	59902,9	15,5	2,39	2,4	0,4	15,5
C ₃	444616,70				2,74			

Quadro VI Valores dos módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de resistência à compressão de alvenarias

Provete	E				$E_{regressão\ linear}$			
	E (N/mm ²)	Média (N)	Desvio Padrão (N)	C.V. (%)	$E_{regressão\ linear}$ (N/mm ²)	Média (N)	Desvio Padrão (N)	C. V. (%)
C ₁	6810,2				5349,0			
C ₂	3375,8	5432,1	1814,9	33,4	3062,9	3855,6	1294,1	33,6
C ₃	6110,4				3155,0			

Provete	$E_{central}$				$E_{central, regressão\ linear}$			
	$E_{central}$ (N/mm ²)	Média (N)	Desvio Padrão (N)	C.V. (%)	$E_{regressão\ linear}$ (N/mm ²)	Média (N)	Desvio Padrão (N)	C. V. (%)
C ₁	3724,4				2822,9			
C ₂	4523,5	4138,2	400,3	9,7	3629,5	3610,5	426,7	11,8
C ₃	4166,6				3155,0			

relacionada com a menor precisão com que se obtêm as leituras de deslocamento e, em especial, das extensões (a partir de diferenças de deslocamentos).

Adicionalmente, no Quadro VI apresentam-se também os módulos de elasticidade calculados a partir das extensões medidas ao longo do eixo central dos provetes (pese embora tal não seja previsto na norma), a que corresponde um intervalo de 3724,4 a 4523,5 N/mm², com valor médio de 4138,2 N/mm² e coeficiente de variação de 9,7%.

Realça-se que foram obtidos valores muito elevados dos módulos de elasticidade secantes dos provetes 1 e 3, usando os LVDTs laterais (segundo a norma), facto que foi estudado mais detalhadamente em [3] e que permitiu concluir terem existido deficiências nas leituras iniciais dos LVDTs laterais nestes ensaios. Os resultados obtidos pelos LVDTs colocados no eixo de simetria vertical do provete apresentam-se mais coerentes, conforme se observa no gráfico da Figura 3 (b).

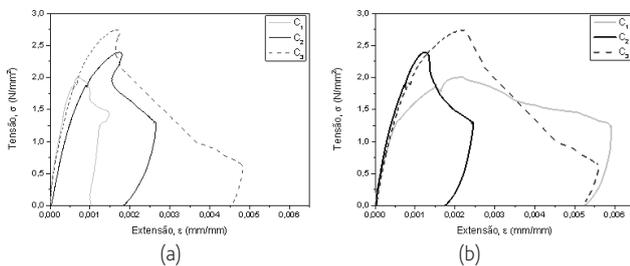


Figura 3 Resistência à compressão: (a) Segundo a disposição dos LVDTs da norma; (b) Para os LVDTs colocados no centro

Na Figura 4 pode-se observar o dano no provete ao longo do ensaio, cuja evolução foi semelhante para os três provetes, variando sobretudo o instante e tempo de aparecimento das fendas, existindo alguns provetes com rotura quase instantânea e outros com rotura lenta e abertura gradual de fendas. É de referir que a fissuração apresentada na face da frente e na de trás do provete foi semelhante entre si e que as fendas nos lados dos provetes eram visíveis, e principalmente verticais e ao longo da altura.

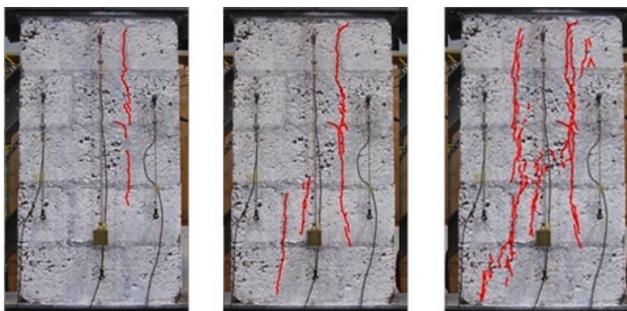


Figura 4 Evolução do dano nos provetes de alvenaria ensaiados à compressão

Analisando todas as figuras dos danos finais pôde-se concluir que grande parte das fendas ocorrem nas zonas dos blocos onde há combinação de duas ou três aberturas na mesma direcção como pode-se ver na Figura 5 (a). A nível lateral ocorrem fissuras

principalmente na zona em que as unidades de alvenaria possuem menor comprimento, como mostra a Figura 5 (b).

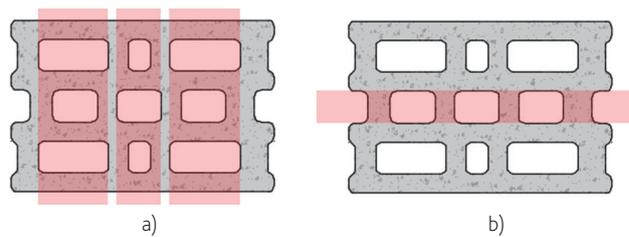


Figura 5 (a) e (b) Planos a vermelho representam as zonas mais suscetíveis à ocorrência de fendas nos blocos, dos provetes de alvenaria sujeitos a compressão simples

2.3 Resistência à tração por compressão diagonal de muretes de blocos de betão

2.3.1 Provetes e sistema de ensaio

Os ensaios de tração por compressão diagonal seguiram a norma ASTM E 519-02 [7], em muretes com as dimensões 1200 × 1200 × 270 mm³ (comprimento x largura x espessura), como ilustra a Figura 6 (a).

O princípio do ensaio consiste na aplicação de uma força de compressão crescente em vértices opostos do provete, ao longo de uma das diagonais centrada nos cabeçotes metálicos de encosto ao atuador e à base de reacção. Como mostra a Figura 6 (b), no sistema adotado, a diagonal comprimida ficou na vertical, aplicando-se a força de compressão por um atuador hidráulico controlado por deslocamento imposto a uma taxa de 0,02 mm/s.

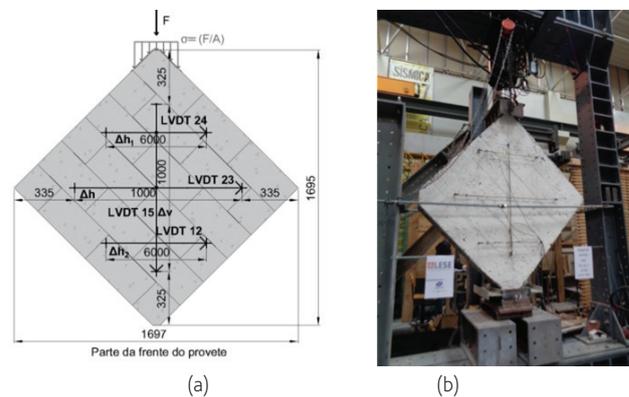


Figura 6 Configuração do ensaio de compressão diagonal dos provetes de alvenaria: (a) Disposição da instrumentação (dimensões em mm); (b) Setup de ensaio

Com esta configuração de ensaio, a secção transversal alinhada com a diagonal horizontal fica submetida a uma tensão de compressão, “teoricamente” uniforme, na qual é nula a tensão de corte (compressão pura). Com base na teoria clássica do círculo de Mohr, a secção transversal segundo a diagonal vertical fica submetida a

um estado de tração pura (com intensidade igual à de compressão vertical e sem tensão de corte) que aí provoca rotura por tração; por esta razão, também por vezes se designa essa tensão de rotura como resistência à tração diagonal.

Ainda com base nas propriedades do círculo de Mohr, as secções transversais inclinadas a 45° com a vertical/horizontal, ficam sujeitas a um estado de tensão de corte puro, em que a intensidade da tensão tangencial é igual à das tensões de compressão e de tração nas secções diagonais horizontal e vertical, respetivamente. Daqui resulta que, nas secções paralelas às juntas de assentamento e de topo, se mobiliza tensão de corte puro, com limite idêntico à resistência à tração diagonal e também designada resistência de corte diagonal.

Face ao acima exposto, os dados obtidos por este ensaio permitem determinar a resistência à tração diagonal bem como a resistência ao corte (por serem idênticas) e o correspondente módulo de distorção do provete. Combinando o valor médio do módulo de elasticidade obtido no ensaio de compressão (E), com o valor médio do módulo de distorção calculado no ensaio de compressão diagonal, G , para os provetes construídos da mesma forma, é ainda possível estimar o coeficiente de Poisson, ν , deste tipo de alvenaria de blocos açorianos.

2.3.2 Instrumentação

Neste ensaio foram utilizados seis LVDTs para medir os deslocamentos horizontais e um LVDT para medir o deslocamento vertical do painel, nas faces frontal (três LVDTs) e traseira (três LVDTs). A posição dos transdutores pode ser observada na Figura 6 (a) e (b), tendo-se mantido em todos os ensaios.

2.3.3 Análise de resultados e representação do dano

Embora a bibliografia reporte duas formas de interpretar e processar os resultados deste ensaio, neste trabalho adotou-se o processo descrito na norma ASTM 519-02 [7], segundo o qual é possível calcular a resistência à tração e ao corte diagonal, bem como o módulo de distorção dos provetes usando as seguintes equações:

$$f_i = 0,707F_{max} / A_n \quad (6)$$

$$A_n = ((l_s + h_s) / 2) \times t_s \times n \quad (7)$$

$$n = (100 - \%_{\text{juntura}}) / 100 \quad (8)$$

$$\gamma = (\Delta v + \Delta h) / L \quad (9)$$

$$G_i = f_i / \gamma \quad (10)$$

onde f_i representa a resistência de tração/corte diagonal do provete i , F_{max} a carga máxima aplicada, A_n a área útil obtida do comprimento (l_s), altura (h_s) e espessura (t_s) do provete e da fração (n) de área útil dos blocos, γ a distorção do provete obtida dos deslocamentos verticais Δv (encurtamento) e horizontais Δh (alongamento), para 1/3 da força máxima, L a distância vertical entre pontos de medição de Δv e Δh e G_i o módulo de distorção.

De forma idêntica ao adotado no cálculo do módulo de elasticidade longitudinal, assumiu-se o valor de G_i obtido em regime elástico

com base nos valores de distorção para um terço da tensão de corte máxima ou de rotura.

Na Figura 7 (a) apresentam-se os gráficos da resistência diagonal dos provetes em função da distorção registada nos ensaios, dos quais foi possível obter os valores de características mecânicas incluídos no Quadro VII e Quadro VIII, i.e., a resistência f_i e o módulo de distorção G_i . A Figura 7 (b) representa a resistência à compressão diagonal dos provetes em função das extensões verticais e horizontais.

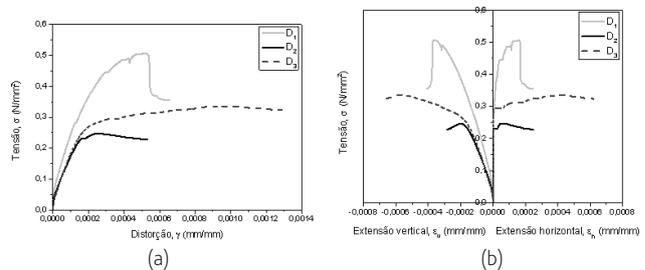


Figura 7 (a) Resistência ao corte em função da distorção sofrida pelos provetes; (b) Resistência ao corte em função da deformação vertical e horizontal

Quadro VII Resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão diagonal (corte) de alvenarias

Provete	f_i			
	f_i (N/mm²)	Média (N/mm²)	Desvio Padrão (N/mm²)	C. V. (%)
D ₁	0,51	0,4	0,1	33,0
D ₂	0,25			
D ₃	0,34			

Analisando os resultados obtidos, regista-se uma resistência de corte diagonal média, f_i , de 0,4N/mm², com um coeficiente de variação de 33%, associado ao facto de o primeiro provete exibir uma resistência bastante superior aos restantes dois. Para o módulo de distorção, G , obteve-se um valor médio de 2511,6 N/mm², com C.V. de 16%, bem mais baixo do que o associado à resistência ao corte, o que é consentâneo com a maior proximidade das 3 curvas tensão-distorção até cerca de 2/3 da resistência máxima.

Através da combinação do valor de G , determinado, e do módulo de elasticidade, E , obtido do ensaio de compressão simples em muretes, calculou-se o coeficiente de Poisson, ν , através da equação (11), tendo-se obtido o valor de 0,08, portanto bastante inferior ao valor geralmente admitido para betão corrente ($\nu_{\text{betão}} \approx 0,2$).

$$\frac{E}{2G} - 1 = (5432,1 / (2 \times 2511,6)) - 1 = 0,08 \quad (11)$$

Na Figura 8 ilustra-se o traçado do dano no provete D₁ no ensaio de compressão diagonal, onde a fissuração arranca pela junta vertical mais próxima da zona de aplicação da carga no vértice inferior, seguindo depois para cima pelas juntas verticais e horizontais.

Quadro VIII Módulo de distorção, G , obtido nos ensaios de resistência à compressão diagonal (corte) de alvenarias

Provete	G				$G_{\text{regressão linear}}$			
	G (N/mm ²)	Média (N/mm ²)	Desvio Padrão (N/mm ²)	C.V. (%)	$G_{\text{regressão linear}}$ (N/mm ²)	Média (N/mm ²)	Desvio Padrão (N/mm ²)	C. V. (%)
D ₁	2901,1				2167,8			
D ₂	2535,2	2511,6	401,9	16,0	1736,9	1867,7	260,6	14,0
D ₃	2098,4				1698,4			

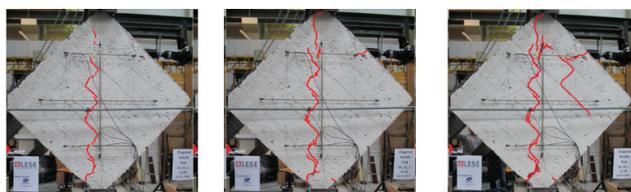


Figura 8 Evolução do dano sofrido pelo provete D₁ ensaiado ao corte

Pode-se concluir, portanto, que neste tipo de ensaio, a rotura dá-se, principalmente, pelas juntas verticais e horizontais, sendo o caminho desta fissuração seguido pela junta vertical ou horizontal superior mais próxima da zona de aplicação da carga como se pode ver nas Figura 9 (a) e (b).

Como se pode ver na Figura 9 (a), como a junta de assentamento está mais próxima (0,20 m) da zona de aplicação da carga do que a junta vertical (0,40 m), a rotura do provete dá-se pela junta de assentamento. Por outro lado, quando se colocou o terceiro provete com a disposição da Figura 9 (b) ou seja, simétrica em relação ao eixo horizontal do provete, em relação à disposição anterior, como a distância da zona de aplicação da carga é a mesma em relação à junta de assentamento (0,20 m) e à junta vertical (0,20 m) a rotura poderia ocorrer em qualquer um dos dois lados. No ensaio à rotura do terceiro provete ocorreu pela junta vertical, isto é, pelo lado direito, dispondo a mesma estrutura de fissuração em escada ao longo das juntas verticais e horizontais.

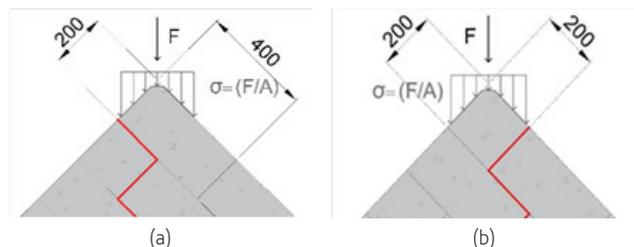


Figura 9 Esquema representativo das distâncias das juntas mais próximas da zona de aplicação da carga, no caso da disposição de ensaio dos provetes: (a) D₁ e D₂; (b) D₃ (dimensões em mm)

Assim conclui-se que por a argamassa ser menos resistente às cargas de corte aplicadas do que os blocos de betão, a rotura do provete

dá-se pelo lado em que a argamassa está mais próxima do ponto de aplicação da carga. Observando as curvas tensão-distorção (Figura 7a), pode-se entender que existe uma resposta conjunta dos provetes (bloco e argamassa) numa fase inicial até que a interface entre a junta e a argamassa atinge uma extensão correspondente ao momento em que atinge a força máxima e de seguida dá-se a propagação da fissuração até suceder a rotura do provete (observado na Figura 8).

Há que salientar também o facto de a rotura dos provetes ocorrer maioritariamente no limite entre a argamassa e a unidade de alvenaria, pois a aderência entre os dois materiais não tem atrito suficiente para suportar as tensões de corte.

2.4 Resistência à flexão de muretes de blocos segundo uma direção de rotura paralela às juntas de assentamento

2.4.1 Provetes e sistema de ensaio

O ensaio de determinação da resistência à flexão segundo um plano de rotura paralelo às juntas horizontais foi conduzido de acordo com a norma NP EN 1052-2 2002 [8]. Este ensaio tem por objetivo determinar a resistência à flexão de pequenos provetes de alvenaria segundo os dois eixos principais de aplicação da carga, para tal aplica-se uma carga na maior face do provete, perpendicularmente a esta, segundo um plano de rotura paralelo às juntas horizontais, registando-se a carga máxima resistida. Os provetes construídos para ensaio de flexão segundo uma direção de rotura paralela às juntas horizontais possuíam dimensões de 600 × 1000 × 270 mm³ (comprimento x altura x espessura).

2.4.2 Instrumentação

O atuador hidráulico, utilizado neste ensaio, possuía uma capacidade máxima de 100 kN. A este atuador encontrava-se acoplado um sistema rotulado sob a célula de carga para acomodar possíveis deslocamentos do provete, resultantes, como já foi referido em 2.2.1, por irregularidades de construção. O controlo do atuador neste ensaio foi por deslocamento, a uma velocidade de 0,02 mm/s.

Usou-se um conjunto de 4 LVDTs, colocados na face do provete sujeita à ação da carga, perpendicularmente a esta, como mostra a Figura 10 (a), apesar de não serem exigidos pela norma, mas para

Quadro IX Resistência à flexão segundo um plano paralelo às juntas

Provete	$F_{m\acute{a}x}$				f_{xi}			
	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	Média (N)	Desvio Padrão (N)	C.V. (%)	f_{xi} (N/mm ²)	Média (N/mm ²)	Desvio Padrão (N/mm ²)	C. V. (%)
FPL ₁	9712				0,18			
FPL ₂	10077				0,19			
FPL ₃	21356	13853,4	4685,0	33,8	0,39	0,25	0,09	33,8
FPL ₄	14101				0,26			
FPL ₅	14021				0,26			

facilitar o traçado da curva força-deslocamento. Usaram-se esferas na base dos perfis metálicos, como se pode ver no canto inferior esquerdo da Figura 10 (a) para que o pórtico de aplicação da carga conseguisse acompanhar o movimento do atuador.

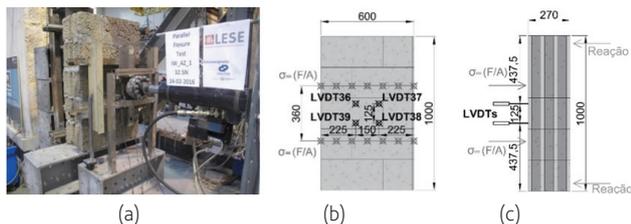


Figura 10 Ensaio de flexão segundo uma direção paralela às juntas: (a) Setup; (b) Disposição dos LVDTs na face frontal do provete; (c) Disposição dos LVDTs na face lateral direita do provete (todas as dimensões em mm)

2.4.3 Análise de resultados e representação do dano

Para cada provete e para a direção do plano de rotura considerada neste ensaio, foi calculada a resistência à flexão de cada provete, f_{xi} , de acordo com a equação (12), sendo o valor da resistência média à flexão arredondada a 0,01 N/mm².

$$f_{xi} = \frac{3F_{i,m\acute{a}x}(l_1 - l_2)}{2bt_u^2} \quad (12)$$

onde $F_{i,m\acute{a}x}$ corresponde à carga máxima aplicada ao provete, l_1 à distância entre apoios, l_2 à distância entre zonas de aplicação de carga, b à largura do provete perpendicular à direção do vão e t_u à espessura do provete.

A resistência característica à flexão, f_k , com arredondamento a 0,01 N/mm², pode ser calculada, para o caso de ensaio em cinco provetes, segundo a equação (13).

$$f_k = \frac{f_{m\acute{e}dia}}{1,5} \quad (13)$$

em que $f_{m\acute{e}dia}$ corresponde à resistência média à flexão segundo um plano de rotura paralelo às juntas verticais.

No Quadro IX apresenta-se um resumo da análise estatística efetuada para os resultados obtidos para os diferentes provetes ensaiados, por forma a aferir a validade dos resultados obtidos. A resistência média à flexão segundo um plano de rotura paralelo às juntas horizontais é de 0,25 N/mm², com um coeficiente de variação de 33,8%. O valor elevado do coeficiente de variação tem como causa a elevada resistência à rotura oferecida pelo provete FPL₃, visível também no gráfico da Figura 11. Como a rotura dos provetes de alvenaria se deu geralmente pelas juntas de assentamento, a resistência à flexão destes depende essencialmente da resistência à flexão das argamassas. Observando os resultados da resistência à flexão das argamassas utilizadas na construção dos muretes usados neste ensaio há também um coeficiente de variação ligeiramente elevado, pelo elevado valor da resistência dos provetes 4 e 5. Assim pode-se concluir que o murete FPL₃ deve ter sido construído com as argamassas mais resistentes à flexão (provetes 4 e 5).

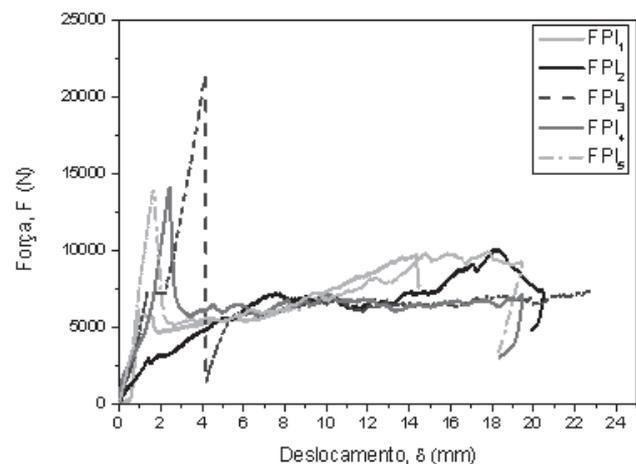


Figura 11 Força em função do deslocamento para ensaio de flexão segundo um plano paralelo às juntas horizontais

Assim os valores altos do coeficiente de variação devem-se ao facto de o modo de rotura envolver a aderência entre o bloco e a argamassa e esta zona apresentar elevada variabilidade, pois a ligação dos blocos à argamassa é muito variável e depende da

qualidade dos materiais e da mão de obra. As forças de atrito entre os blocos e a argamassa são as condicionantes para a rotura dos provetes.

Calculou-se também a resistência característica à flexão, a partir da equação (14), obtendo-se o valor de 0,17 N/mm².

$$f_k = \frac{0,25}{1,5} = 0,17 \text{ N/mm}^2 \quad (14)$$

O terceiro provete FPL₃ (Figura 12) sofreu rotura pela terceira junta a contar da base do provete, ocorrendo rotação do provete segundo a linha de interseção do plano que passa na superfície de aplicação da carga e o plano onde surgem as fendas.

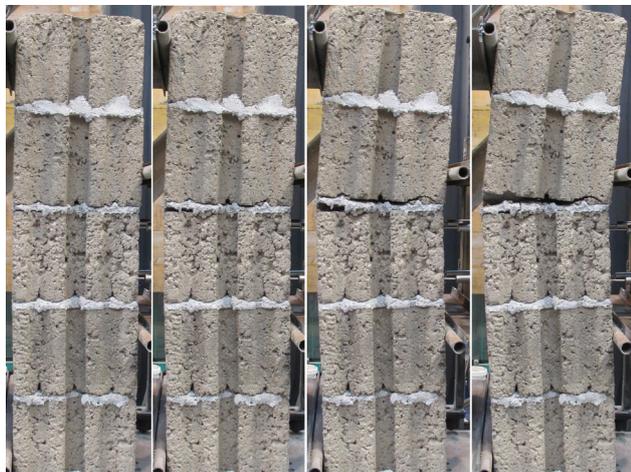


Figura 12 Evolução temporal do dano do provete FPL₃

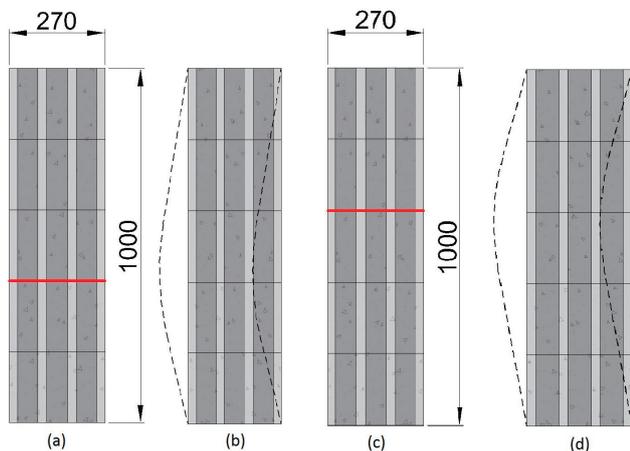


Figura 13 Esquemas representativos da rotura dos provetes (segundo a direção de carga aplicada nos ensaios, da direita para a esquerda): (a) e (c) Linha a vermelho representa as juntas horizontais ao longo das quais se deu a rotura dos provetes; (b) e (d) Deformada (linha a traço interrompido) observada no ensaio conforme a junta onde se deu a rotura

Após a análise das evoluções da rotura dos provetes pode-se concluir que a rotura se deu essencialmente pelos descolamentos da argamassa e das unidades de alvenaria, como era esperado. Três dos cinco provetes abriram uma fenda na terceira junta horizontal a contar da base (Figura 13 (a)) e dois a partir da segunda junta (Figura 13 (c)). As respectivas deformadas para a primeira situação (Figura 13 (b)) e para a segunda (Figura 13 (d)) mostram o que se pôde verificar durante a rotura dos provetes, que a rotação dos elementos ocorria em torno da linha resultante da interseção do plano que passa pela superfície de aplicação da carga e o plano da junta onde ocorreu a fissura.

Como a fissuração se deu pelo limite da argamassa e do bloco, as forças de atrito entre estes dois materiais são as principais responsáveis pelo desenvolvimento de resistência face à ação de solicitação do provete segundo um plano de rotura paralelo às juntas.

2.5 Resistência à flexão de muretes de blocos segundo uma direção de rotura perpendicular às juntas de assentamento

2.5.1 Provetes e sistema de ensaio

O ensaio de determinação da resistência à flexão segundo um plano de rotura perpendicular às juntas horizontais seguiu a mesma norma do ensaio anterior (NP EN 1052-2 2002 [8]). Este ensaio permite determinar a resistência à flexão de pequenos provetes de alvenaria segundo um plano de rotura perpendicular às juntas de assentamento, aplicando-se, para tal, uma carga na maior face do provete, perpendicularmente a esta, segundo um plano de rotura perpendicular às juntas horizontais, registando-se a carga máxima resistida. Construíram-se os muretes para ensaio com as dimensões de 1200 × 800 × 270 mm³ (comprimento x altura x espessura).

2.5.2 Instrumentação

Utilizou-se a mesma instrumentação que no ensaio anterior, referida em 2.4.2 (flexão segundo um plano de rotura paralelo às juntas) porém com um *setup* diferente e representado na Figura 14 (a).

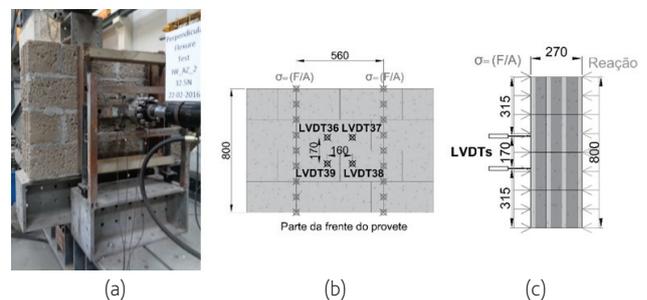


Figura 14 Esquema funcional do ensaio de caracterização mecânica à flexão segundo um plano de rotura perpendicular às juntas horizontais (a) *Setup* de ensaio; (b) Disposição da instrumentação adotada na face frontal do provete; (c) na face lateral do provete (dimensões em mm)

Quadro X Resistência à flexão segundo um plano perpendicular às juntas

Provete	$F_{m\acute{a}x}$				f_{xi}			
	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	Média (N)	Desvio Padrão (N)	C.V. (%)	f_{xi} (N/mm ²)	Média (N/mm ²)	Desvio Padrão (N/mm ²)	C. V. (%)
FPr ₁	21383				0,29			
FPr ₂	26467				0,36			
FPr ₃	23748	23944,5	3369,4	14,1	0,32	0,32	0,05	14,1
FPr ₄	20036				0,27			
FPr ₅	28088				0,38			

2.5.3 Análise de resultados e representação do dano

Aplicando a norma deste ensaio obteve-se a resistência à flexão segundo um plano de rotura perpendicular às juntas horizontais, a envolvente força *versus* deslocamento, a resistência característica à flexão e sendo ainda possível observar a abertura de fissuras no gráfico obtido (Figura 15), através de pequenas quebras de força antes de se atingir a rotura dos provetes.

O gráfico resultante do ensaio de flexão, segundo a direção adotada neste ensaio, está representado na Figura 15. Neste é possível ver a força máxima que cada provete é capaz de suportar, assim como os deslocamentos sofridos.

A partir de uma análise do Quadro X pode-se extrair o valor médio da resistência à flexão segundo a direção considerada neste ensaio, de 0,32 N/mm², com um coeficiente de variação de 14,1%. O valor do coeficiente de variação é aceitável, havendo apenas uma ligeira variação das resistências à flexão de cada provete. Com a realização dos ensaios verificou-se que a rotura do provete, quando sujeito ao esforço de flexão segundo um plano de rotura perpendicular às juntas horizontais, se deu pelas juntas verticais e pelos blocos, podendo assim afirmar-se que as unidades de alvenaria contribuem para a resistência à flexão para além do atrito entre os blocos e as argamassas.

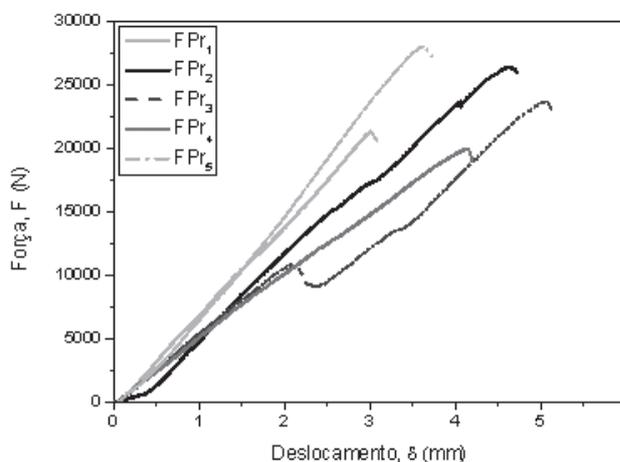


Figura 15 Força em função do deslocamento para ensaio de flexão segundo um plano perpendicular às juntas horizontais

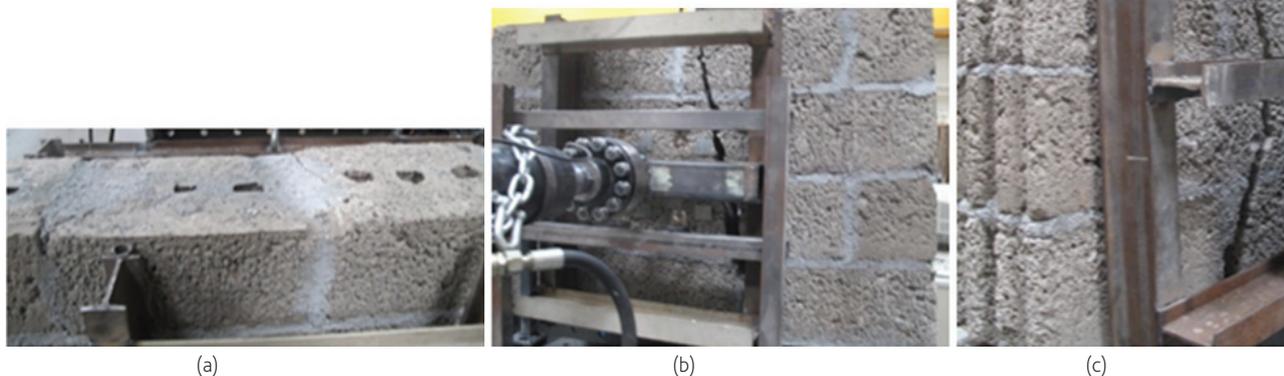


Figura 16 Dano final do provete FPr₂: (a) Parte de cima; (b) Frente do provete; (c) Parte de trás do provete

A resistência característica à flexão foi obtida pela equação (15).

$$f_k = \frac{0,32}{1,5} = 0,21 \text{ N/mm}^2 \quad (15)$$

A resistência à flexão segundo um plano de rotura perpendicular às juntas horizontais é 1,28 vezes superior à resistência média à flexão segundo um plano de rotura paralelo às juntas de assentamento, o que seria de esperar, pois no caso do ensaio segundo um plano paralelo o provete oferece menos resistência pelo facto de a aplicação da carga ser paralela à junta horizontal. No caso do ensaio de flexão segundo uma direção perpendicular às juntas de assentamento, tanto os blocos como a interface argamassa/bloco oferecem resistência às cargas que solicitam o provete (Figura 16).

Na Figura 17 representou-se a deformada que os provetes sujeitos à flexão segundo a direção definida neste ensaio sofreram. A rotação dos provetes deu-se em torno da linha de interseção do plano que passa na face de aplicação da carga e no plano que passa pela zona de fendilhação, obtendo-se uma deformada aproximadamente simétrica.

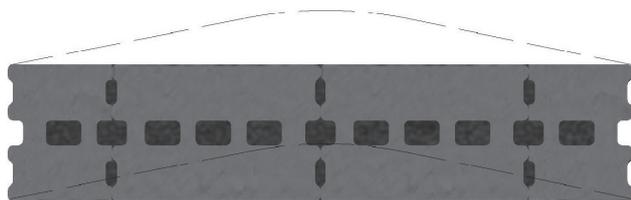


Figura 17 Deformada (linha a traço interrompido) do provete quando sujeito a flexão segundo um plano de rotura perpendicular às juntas horizontais.

Verificou-se que a rotura dos provetes se deu principalmente pelo eixo de simetria vertical, havendo pequenas inclinações a tender para a direita ou esquerda, ao fazer-se uma análise de cima para baixo dos provetes, como mostra a Figura 18.

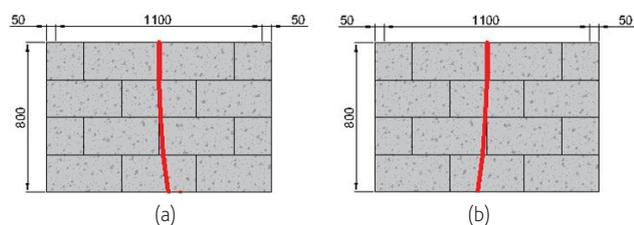


Figura 18 Principais mecanismos de rotura identificados (dimensões em mm)

Com a realização dos ensaios de flexão segundo a direção de rotura perpendicular às juntas de assentamento pôde-se concluir que a resistência dos muretes de alvenaria depende essencialmente das características de ligação entre a argamassa e os blocos e da resistência dos blocos.

3 Conclusões

A resistência mínima das unidades de alvenaria em zonas de alta sismicidade, $f_{b,min}$ (como é por exemplo a ilha do Faial onde as unidades de alvenaria ensaiadas são utilizadas e restantes ilhas do grupo Central e Oriental), é de 4 N/mm^2 segundo o Eurocódigo 8 [1]. Analisando os valores de resistência média à compressão obtidos, pode-se afirmar o que os blocos do lote 1 não satisfazem este critério ($f_{b,normalizado} = 3,5 \text{ N/mm}^2 < 4 \text{ N/mm}^2$) e os blocos do lote 2 satisfazem ($f_{b,normalizado} = 4,7 \text{ N/mm}^2 > 4 \text{ N/mm}^2$). Assim, pode-se afirmar que estas unidades de alvenaria devem ser melhoradas por forma a satisfazer os critérios mínimos impostos pelos Eurocódigos de dimensionamento e se evitarem colapsos de paredes e edifícios.

É requerida uma resistência mínima à compressão, $f_{m,min}$ para a argamassa de alvenaria simples ou confinada, segundo o Eurocódigo 8, de 5 N/mm^2 [1]. Analisando os valores das resistências médias à compressão obtidas para cada uma das argamassas utilizadas, pode-se ver que todos os valores satisfazem este critério sendo bastante superiores (o valor mais baixo é de $12,9 \text{ N/mm}^2$ e ainda assim é 2,58 vezes superior ao mínimo exigido).

Os provetes ensaiados, que traduzem o tipo de construção adotado nas ilhas açorianas, satisfazem as soluções construtivas referidas no Eurocódigo 8, sendo as juntas verticais preenchidas.

Os provetes de alvenaria ensaiados à compressão simples, possuem uma resistência média à compressão, f , de $2,4 \text{ N/mm}^2$ e um módulo de elasticidade, E , entre os 4100 N/mm^2 e os 5400 N/mm^2 , sendo o valor da resistência média à compressão cerca de seis vezes superior à resistência média ao corte (tração diagonal), f , de $0,4 \text{ N/mm}^2$. A rigidez é cerca de duas vezes superior nos provetes quando ensaiados à compressão comparativamente com os provetes ensaiados ao corte (módulo de distorção, G , médio é de 2500 N/mm^2).

O modo de rotura dos provetes de alvenaria sujeitos à compressão simples deu-se segundo os septos dos blocos de betão, já no caso dos provetes de alvenaria ensaiados ao corte, observou-se que a rotura se deu principalmente pela interface bloco/argamassa das juntas, seguindo o traçado das juntas de assentamento e de topo.

Relativamente aos provetes de alvenaria ensaiados à flexão segundo um plano de rotura perpendicular às juntas horizontais obteve-se uma resistência média à flexão, $f_{x'}$, de $0,32 \text{ N/mm}^2$, sendo 1,28 vezes superior à resistência média à compressão segundo um plano de rotura paralelo às juntas horizontais ($0,25 \text{ N/mm}^2$). Esta superioridade de valor tem a ver com o facto de no ensaio de resistência à flexão segundo um plano de rotura perpendicular às juntas de assentamento tanto as juntas verticais dos provetes como os blocos fazem face às cargas aplicadas, enquanto no caso dos ensaios à flexão segundo um plano paralelo, como as cargas são aplicadas paralelamente às juntas horizontais, são apenas as forças de interface argamassa/bloco, das juntas de assentamento, que resistem às forças a que o provete está sujeito.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Cimpor, empresa InterCement, à Cimentação, ao Sr. Francisco Araújo da Euromodal, aos Eng.º Pedro Medeiros, Dr. Nuno Pinto e Sr. Valdemar pelos meios, informações e apoio no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho. Os autores pretendem agradecer ainda o suporte financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia – FCT através do projeto “ASPASSI - Avaliação da Segurança e reforço de Paredes de Alvenaria de enchimento para Solicitações Sísmicas”, com a referência POCI-01-0145-FEDER-016898.

Referências

- [1] IPQ – “Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios” *in NP EN 1998-1* ed. Caparica, Portugal, 2010.
- [2] IPQ – “Eurocódigo 6: Projeto de estruturas de alvenaria. Parte 1-1: Regras gerais para estruturas de alvenaria armada e não armada” *in NP EN 1996-1-1 2005+A1 2015*, ed. Caparica, Portugal, 2015.
- [3] Raposo, P. – *Identificação de tipologias e caracterização de paredes de alvenaria de enchimento em edifícios de betão armado existentes no arquipélago dos Açores*, Dissertação, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.
- [4] IPQ – “Método de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 1: Determinação da resistência à compressão” *in NP EN 772-1*, ed. IPQ, Caparica, Portugal, 2002.
- [5] CEN – “Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”. EN 1015-11, ed. Brussels, 1999.
- [6] IPQ – “Método de ensaio para alvenaria. Parte 1: Determinação da resistência à compressão” *in NP EN 1052-1 2002*, ed. Caparica, Portugal, 2002.
- [7] A. International – “Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages” *in E 519 - 02*, ed. West Conshohocken, PA, United States, 2002.
- [8] IPQ – “Métodos de ensaio para alvenaria. Parte 2: Determinação da resistência à flexão” *in NP EN 1052-2*, ed. IPQ, Caparica, Portugal, 2002.