



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PAREDES DE ALVENARIA COM BLOCOS DE BETÃO LEVE



João P. Gouveia
Aluno de Doutoramento
Universidade do Minho
Guimarães
jopamago@isec.pt



Paulo B. Lourenço
Professor Associado
Universidade do Minho
Guimarães
pbl@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

Neste artigo, apresenta-se uma campanha de ensaios laboratoriais realizados em paredes de alvenaria, sendo referidos procedimentos de ensaios de compressão e de tracção nos materiais constituintes e ensaios de caracterização mecânica à compressão de paredes. Apresentam-se resultados de ensaios de corte em paredes de alvenaria simples, com e sem junta vertical preenchida, de alvenaria confinada, e de alvenaria reforçada com armadura de junta sujeitas a carregamento cíclico no plano.

Palavras-chave: Paredes; Alvenaria Simples; Alvenaria Confinada; Ensaios experimentais; Caracterização mecânica.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de realizar estudos experimentais de caracterização do comportamento de paredes de alvenaria e de materiais que as constituem parece ser evidente tendo em conta diversos aspectos. Alguns de maior relevo podem ser referidos: (a) vantagens económicas inerentes ao processo construtivo, (b) sugestão de novas soluções com menor índice de gerarem patologias na construção (c) nova regulamentação para o dimensionamento de estruturas, (d) inovação tecnológica quer no processo de construção e da industria subjacente, entre outras.

Diversos estudos apontam que soluções em alvenaria, confinada ou armada, apresentam uma redução de custos 10% a 25% relativamente a soluções tradicionais em estrutura reticulada de betão armado, [1] [2]. Tendo em conta os trabalhos em alvenaria representam cerca 13 a 17 %

do custo total da construção [3], verifica-se a necessidade de avaliar novos processos construtivos.

Cerca de 25% de anomalias da construção relacionam-se com o actual desempenho das paredes de alvenaria [4], basicamente com a função destinada de paredes de preenchimento. Verifica-se a necessidade de aprofundar conhecimentos no dimensionamento destas soluções e de responsabilizar a comunidade técnica por patologias resultantes de má concepção e construção, de forma a minimizar futuros custos de manutenção ou de recuperação de edifícios.

Com a entrada em vigor dos Eurocódigos para o dimensionamento de edifícios, o desenvolvimento de novos materiais para a construção e a implementação de novas soluções parece ser inquestionável. Soluções em alvenaria simples e confinada, e até mesmo armada, serão opções a ter em conta para a construção em Portugal. O desenvolvimento e a inovação associada requerem o conhecimento de características físicas e mecânicas de qualidade controlada de novos processos tecnológicos e de novos materiais sendo associado a uma evolução da indústria.

Com o objectivo de avaliar o comportamento de paredes de alvenaria, apresenta-se a campanha de ensaios experimentais que têm vindo a ser realizados. Refira-se que a definição geométrica e a caracterização mecânica dos provetes de ensaio, é regida com base nas especificações apresentadas no documento de dimensionamento de estruturas de alvenaria, EC6 [5] bem como das normas e projectos de norma que lhe estão associados.

2. CAMPANHA DE ENSAIOS

A campanha de ensaios a que se refere este artigo tem vindo a ser realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho no âmbito da tese de doutoramento do autor e integrada no Projecto SINALES financiado pela Agência de Inovação.

2.1 Caracterização dos materiais e de juntas de assentamento

- Blocos de alvenaria

Na realização da campanha foi utilizado um bloco de betão leve, designado B1, e com dimensões nominais 200mm×143mm×100mm, resultante do corte do bloco "Isobloco meio comprimento, meia altura" de dimensões nominais 200mm×320mm×100mm, conforme a Figura 1.

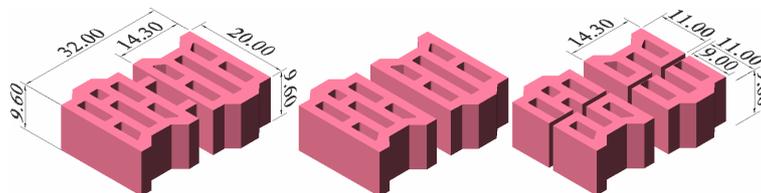


Figura 1 – Bloco e meio bloco em escala 1:2.

Em séries de blocos, foram realizados estudos de caracterização mecânica e físicas. Nos ensaios de caracterização física foi feita a determinação da percentagem de furação e o levantamento das dimensões exteriores e dos septos internos para classificação quanto ao grupo em que se inserem [5]. Assim, os blocos são classificados como unidades de alvenaria de furação vertical pertencentes ao grupo 2 com percentagem de furação de 32%.



Figura 2 – Ensaios de compressão e de tracção directa e por flexão em blocos.

Para determinação da resistência à compressão foram inicialmente feitos ensaios em diversos conjuntos de amostras, sendo posteriormente realizados ensaios em séries de blocos com datas equivalentes às datas de ensaios de paredes. Para a resistência à compressão normalizada e módulo de elasticidade, foram obtidos valores de 5,7MPa e 4,75GPa, respectivamente.

Para a determinação da resistência à tracção foram retiradas amostras por corte do bloco e feitos ensaios de tracção directa em e ensaios de flexão.

- Argamassa de assentamento

Para a construção das paredes de ensaio foi usada uma argamassa pré-doseada tipo MAXIT.AM10[®] produzida pela MAXIT Group. Para a sua caracterização foram realizados ensaios de cubos de 40mm e 50mm de face e prismas 160mm×40mm×40mm. A realização de ensaios foi feita paralelamente às séries de ensaios de compressão em blocos. Para a resistência à compressão normalizada foram obtidos valores médios de 9,8MPa sendo classificada como argamassa M10.

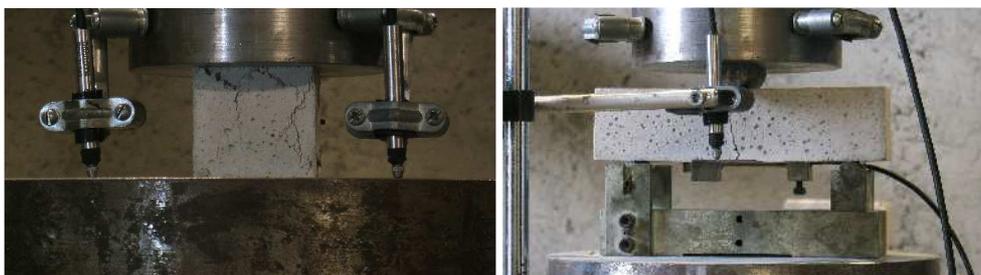


Figura 3 – Ensaios de compressão e de tracção por flexão em argamassa.

- Betão dos elementos de confinamento

Na execução de paredes confinadas foi utilizado um betão autocompactável para fácil preenchimento dos elementos de confinamento de dimensões médias de 143mm×75mm. Foram feitos provetes cúbicos de 150mm de face para avaliação da resistência característica à compressão. Os ensaios foram feitos às datas de ensaio ao corte nas paredes, tendo sido obtidos resultados médios de 31,5MPa.

- Armaduras de junta e dos elementos de confinamento

Para o reforço de juntas horizontais foram usadas armaduras prefabricadas tipo Murfor[®] produzidas pela Bekaert, com 5mm de diâmetro por varão e 100mm largura e específicas para o efeito, com valores de 550MPa de tensão nominal de tracção, f_{yk} .

Na montagem de armaduras dos elementos de confinamento, Figura 4, foram utilizados varões $\phi 6$ para armaduras longitudinais e $\phi 4$ para armaduras transversais, com 400MPa de tensão nominal de tracção.



Figura 4 – Armaduras de confinamento e de junta horizontal.

2.2 Caracterização de paredes à sujeitas a acções de compressão e flexão

- Ensaios de paredes à compressão

Os ensaios de paredes sujeitas a acções de compressão, com dimensões foram feitos em duas fases temporais distintas (1 e 2). Para possibilitar uma correlação de valores entre estas fases e também com a fase de ensaios de paredes sujeitas a acções de corte, fase 3, foram executados prismas de três blocos em altura. Com o objectivo de obter valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson e da tensão de rotura foram concebidos 16 paredes, com dimensões de 600mm×525mm×143mm de acordo com o EC6, e 52 prismas 300mm×315mm×143mm. No Quadro 1 apresentam-se os tipos de paredes ensaiadas.

Os ensaios nas paredes foram realizados em pórtico de ensaios preparado para o efeito, sendo a determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson feita com controlo de força com velocidade de 0,15kN/s e os ensaios de rotura com controlo de deslocamentos com velocidade de 2µmm/s. Para aplicação de cargas foi utilizado uma célula de carga de 500kN acoplado a um actuador com capacidade de 500kN, Figura 5.

Quadro 1 – Tipo de paredes submetidas a ensaios de compressão.

Esquema	Tipo de parede	N.º	Bloco	Argamassa		Armadura J. Horiz.	Equivalência de ensaios	
				J.Horiz.	J.Vert.			
	Alvenaria com junta vertical preenchida	D0.1.1	3	B1	✓	✓	-	(1)-(a)
		D0.1.2						
		D0.1.3						
	Alvenaria com junta vertical preenchida	D0.1.4	4	B1	✓	✓	-	(2)-(a)(b)
		D0.1.5						
		D0.1.6						
		D0.1.7						
		D0.1.8						
	Alvenaria sem junta vertical	D0.2.1	2	B1	✓	-	-	(1)-(a)
		D0.2.2						
		D0.2.3						
	Alvenaria sem junta vertical	D0.2.4	3	B1	✓	-	-	(1)-(a)
		D0.2.5						
	Alvenaria com junta vertical preenchida	D0.2.6	2	B1	✓	-	✓	(1)-(a)
		D0.3.1						
	Prismas de correlação de valores	D1.x	48	B1	✓	-	-	(a)-(1)(2)(3)
		D2.x						



Figura 5: Esquema de rotura e ensaios à compressão em paredes e de prismas.

De acordo com o EC6, a resistência à compressão da alvenaria pode ser estimada pela expressão:

$$f_k = K \times f_b^{0,7} \times f_m^{0,3} \quad (1)$$

em que: f_k - valor de cálculo da resistência característica à compressão da alvenaria, em MPa.

K - constante que depende do tipo de unidade e respectivo grupo e do tipo de argamassa. Para as aplicações mais correntes em Portugal, o seu valor varia entre 0,4 a 0,6.

f_b - valor da resistência normalizada à compressão das unidades de alvenaria, em MPa, na direcção do efeito da acção aplicada, com o valor máximo de 75MPa para unidades assentes com argamassa convencional.

f_m - valor da resistência à compressão da argamassa convencional, em MPa, com o limite máximo definido pelo menor de valor entre 20MPa e $2 \times f_b$.

Assim, estima-se um valor para a resistência característica da alvenaria de 3,3MPa. Pelos resultados para já avaliados obtém-se um valor médio correspondente de 2,8MPa.

- Flexão no plano de rotura paralelo às juntas de assentamento

Encontra-se em fase de avaliação uma série de ensaios em paredes de dois tipos de dimensões para avaliação da resistência à flexão da parede no plano paralelo às juntas de assentamento, f_{xk1} . Na Figura 6 documenta-se os ensaios realizados em paredes 200mm×600mm×143mm, estando previstos a realização de ensaios em paredes de dimensão 400mm×700mm×143mm.



Figura 6 – Realização de ensaio de flexão.

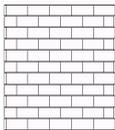
2.3 Caracterização de paredes à sujeitas ao corte

- Programa de ensaios

Para avaliação do comportamento de paredes de alvenaria a acções simulação sísmica, foram construídas 16 paredes, à escala 1:2, de diferentes tipos, conforme se apresentada no Quadro 2. O dimensionamento das paredes foi feito de forma a garantir uma rotura por corte. Foram executados três tipos de parede simples (junta vertical não preenchida, junta vertical preenchida e com armadura de junta horizontal) e três tipos de paredes confinadas de junta vertical não preenchida (sem armaduras de junta horizontal, com armadura de junta horizontal e com armadura de junta horizontal ancorada na armadura dos elementos de confinamento). A colocação de armadura horizontal nas juntas de assentamento foi feita a cada três fiadas.

Os ensaios foram realizados num sistema de ensaio (ver Figura 7) adaptado para o efeito. A acção vertical foi imposta através de um actuador hidráulico de 350kN, programado para manter a tensão vertical de compressão constante a níveis de 0,90MPa. A acção cíclica horizontal foi imposta através de um actuador hidráulico de 250kN, com controlo de deslocamento de velocidade constante (0,60µmm/s). Para cada incremento de amplitude de deslocamentos horizontais foram programados dois ciclos de deslocamento por amplitude para avaliação da resistência e do nível de degradação de rigidez [6], [7], [8].

Quadro 2 – Tipo de paredes submetidas a ensaios de corte.

Esquema	Tipo	N.º	Bloco	Argamassa		Armadura de Junta horizontal	Elementos de confinamento
				J.Horiz.	J.Vert.		
	Simples	W2.1	4	B1	✓	-	-
		W2.2	3	B1	✓	✓	-
	W2.3	2	B1	✓	-	✓ (1)	-
	Reforçada	W2.5	3	B1	✓	-	✓ (1) ✓ (2)
		W2.6	2	B1	✓	-	✓ (3) ✓ (2)
	Confinada	W2.4	2	B1	✓	-	- ✓ (2)

(1) A_{sh} : $\phi 5\text{mm}$ ($f_y=500\text{MPa}$), $\rho_{tr}=0,087\%$.

(2) A_{sh} : $\phi 6\text{mm}$ ($f_y=400\text{MPa}$), $\rho_{tr}=0,151\%$; $A_{st}=\phi 4\text{mm} // 75\text{mm}$ ($f_y=400\text{MPa}$), $\rho_{tr}=0,293\%$

(3) A_{sh} : $\phi 5\text{mm}$ ($f_y=500\text{MPa}$), $\rho_{tr}=0,087\%$ ancorada na armadura dos elementos de confinamento.

- Análise de valores experimentais

O comportamento de paredes de alvenaria sujeita a acções de simulação sísmica é feito pela determinação de parâmetros e valores de características mecânicas: resistência máxima ao corte, deslocamentos horizontais, ductilidade e degradação da energia de deformação [9][10].

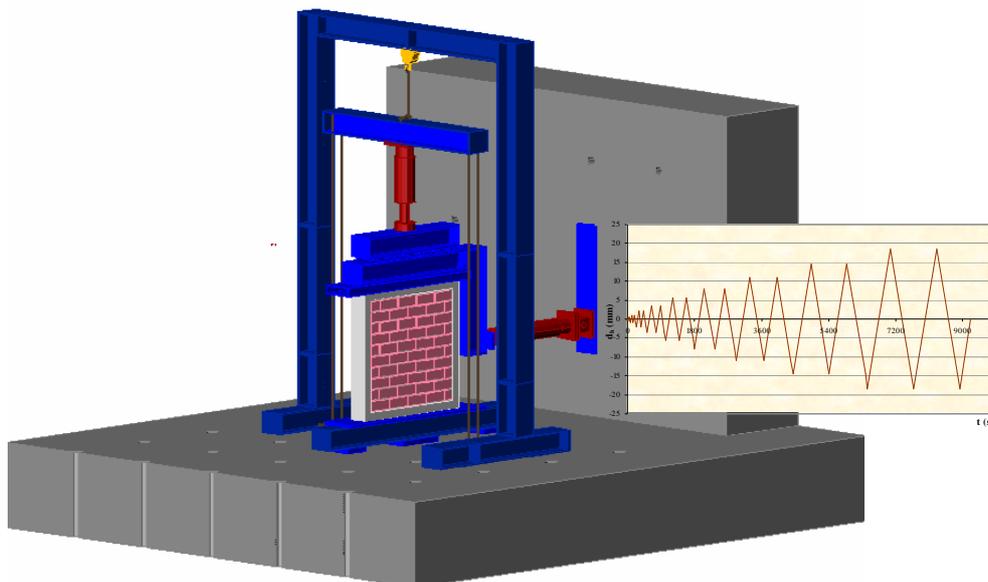


Figura 7 – Aspecto gráfico do Sistema de ensaio e Procedimento de carga utilizados.

Para cada parede foi feito o traçado da envolvente do diagrama $H-d$ experimental posteriormente tendo sido feito uma análise para cada grupo de paredes. A envolvente é definida para o conjunto de valores entre a Força de corte, H , e do deslocamento horizontal da parede correspondente, d , em pontos característicos (ocorrência da primeira fissura

significativa d_{cr} , força de corte máxima H_{max} e deslocamento lateral máximo d_{max} , valores H e d do ponto de inversão do sentido da acção).

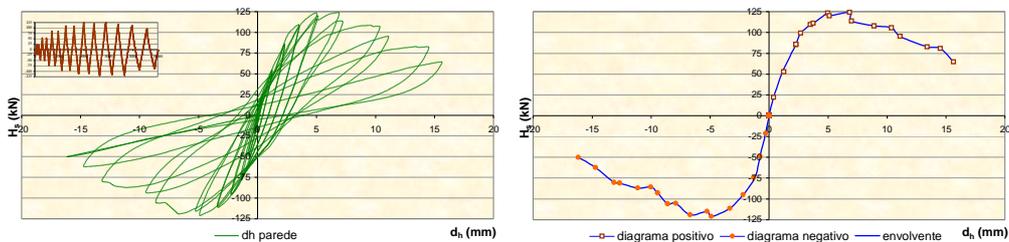


Figura 8 – Exemplo de diagrama experimental obtido e da respectiva envolvente.

Para cada grupo de parede foi feita a determinação do diagrama bi-linear sendo definido pela igualdade da sua área com a área do diagrama envolvente (energia de deformação). Com base nos valores representativos do deslocamento máximo teórico, d_u , e o deslocamento elástico linear, d_e , foi feita determinada a ductilidade de cada tipo de parede permitindo avaliar a capacidade de deformação.

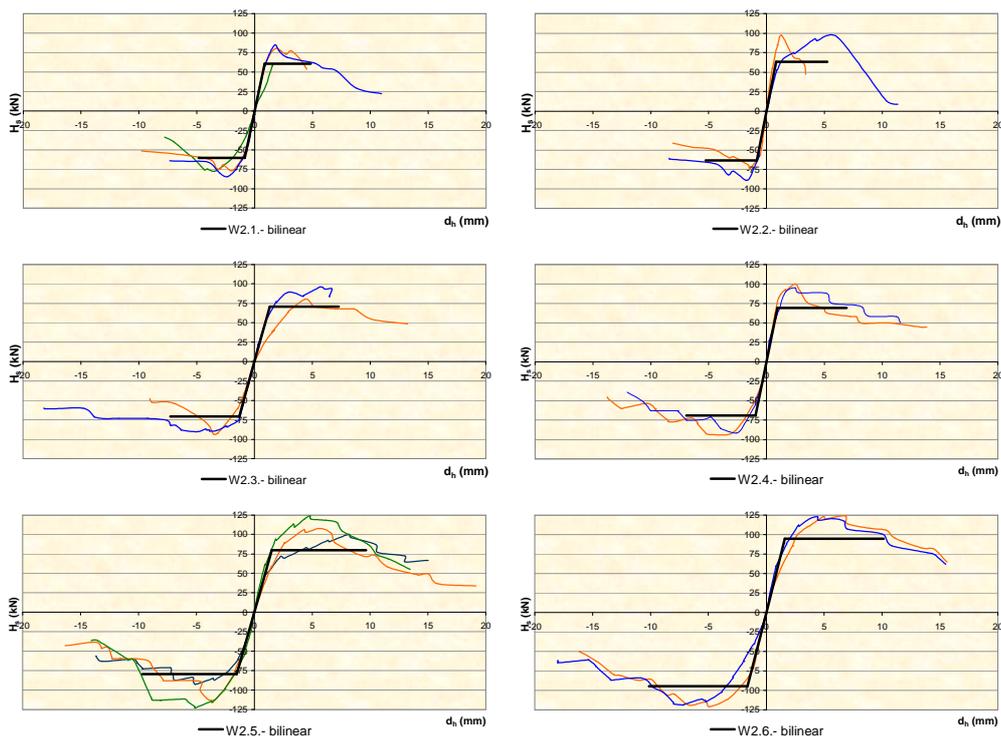


Figura 9 – Envolvente de diagramas $H - d$ e respectivo diagrama bilinear por tipo de paredes.

A rigidez da parede foi definida como a inclinação do diagrama $H - d$ para uma dada amplitude de deslocamento. A rigidez elástica da parede, K_e , é determinada para os valores

representativos da ocorrência da primeira fissura significativa e a rigidez equivalente, K_{Hmax} , correspondente à ocorrência da carga máxima horizontal.

$$K = \frac{H}{d} \quad (2)$$

Um outro parâmetro de previsão do comportamento de paredes sujeitas a acções horizontais é relação entre a deformação lateral e a altura da parede, designado de *drift* lateral. Para paredes de alvenaria de blocos de betão corrente, este valor é considerado igual a 0,15%. Neste trabalho apresenta-se também a sua determinação, quer para o ponto de força de corte máxima, quer para o ponto correspondente à ocorrência de primeira fissura significativa.

$$drift_{1s\ crack} = \frac{d_{cr}}{h}; \quad drift_{H_{max}} = \frac{d_{H_{max}}}{h} \quad (3)$$

Após a observação cuidada do comportamento da parede no decorrer do ensaio, e do tratamento de dados por grupos de parede apresentam-se os resultados no Quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros de resistência e de deformação por tipo de paredes ensaiadas.

Tipos de parede	H_{cr}	d_{cr}	K_e	H_{max}	$d_{H_{max}}$	$K_{H_{max}}$	d_{max}	d_e	H_u	d_u	μ	drift lateral	
	(kN)	(mm)	(kN/mm)	(kN)	(mm)	(kN/mm)	(mm)	(mm)	(kN)	(mm)		1 ^a fiss.	H_{max}
W2.1	50.41	0.72	70.43	80.94	2.28	35.58	8.08	0.86	60.49	4.83	5.62	0.06%	0.20%
W2.2	63.78	0.82	77.42	88.85	2.63	33.73	9.28	0.82	63.31	5.26	6.43	0.07%	0.23%
W2.3	46.02	0.86	53.60	93.11	4.71	19.78	11.79	1.32	70.75	7.26	5.50	0.07%	0.41%
W2.4	57.68	0.79	72.58	95.02	3.09	30.74	12.80	0.95	69.12	6.93	7.27	0.07%	0.26%
W2.5	54.80	1.04	52.53	113.73	5.43	20.93	15.62	1.51	79.53	9.68	6.39	0.09%	0.45%
W2.6	62.14	1.06	58.64	121.75	5.84	20.86	16.32	1.61	94.54	10.12	6.28	0.09%	0.48%

- Resultados de ensaio

De acordo com os resultados médios obtidos por grupo de paredes, apresenta-se no Quadro 4 uma análise comparativa dos parâmetros de comportamento.

Quadro 4 – Comparação de resultados dos Parâmetros de resistência e de deformação.

Comparação por grupos	H_{cr}	H_{max}	H_u	$H_{média}$	d_{cr}	$d_{H_{max}}$	d_u	$d_{média}$	μ	drift lateral		
	()	()	()	()	()	()	()	()		1 ^a fiss.	H_{max}	
Efeito de preenchimento de junta vertical com argamassa												
W2.2/W2.1	1.27	1.10	1.05	1.14	1.15	1.16	1.09	1.13	1.14	1.15	1.16	
Relação entre parede confinada vs parede simples												
W2.4/W2.1	1.14	1.17	1.14	1.15	1.11	1.36	1.43	1.30	1.29	1.06	1.29	
W2.5/W2.3	1.19	1.22	1.12	1.18	1.22	1.15	1.33	1.23	1.16	1.15	1.10	
Valores médios	1.17	1.20	1.13	1.17	1.16	1.26	1.38	1.27	1.23	1.11	1.19	
Efeito de colocação de armadura de junta horizontal. A_{sh}												
W2.3/W2.1	0.91	1.15	1.17	1.08	1.20	2.07	1.50	1.59	0.98	1.20	2.07	
W2.5/W2.4	0.95	1.20	1.15	1.10	1.31	1.76	1.40	1.49	0.88	1.31	1.76	
W2.6/W2.4	1.08	1.28	1.37	1.24	1.33	1.89	1.46	1.56	0.86	1.33	1.89	
Valores médios	0.98	1.21	1.23	1.14	1.28	1.90	1.45	1.55	0.91	1.28	1.90	

Por observação dos valores apresentados no Quadro 3 e no Quadro 4, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- Em alvenaria simples, o efeito do preenchimento de junta vertical proporciona um acréscimo da força de corte efectiva de 10%. Em termos médios, os deslocamentos horizontais nas paredes de junta preenchida são superiores em 13% aos deslocamentos horizontais nas paredes de junta não preenchida. Em ambos tipos de parede, o *drift* lateral é estimado na ordem dos 0,21%.
- As paredes de alvenaria confinadas têm uma melhoria de comportamento quando solicitadas a acções de corte de cerca de 20% relativamente a paredes de alvenaria simples.
- Em valores médios, a ductilidade das paredes confinadas é superior em cerca de 23% relativamente a paredes de alvenaria simples.
- O *drift* lateral médio entre paredes de alvenaria simples e paredes de alvenaria confinada é de 0,23% e de 0,45%, respectivamente.
- A colocação de armadura horizontal de junta permite um ganho médio de resistência ao corte de 21% (15% em paredes de alvenaria simples e cerca de 24% e paredes de alvenaria confinada).
- A capacidade de deformação de paredes com armadura de junta horizontal aumenta, no entanto verifica-se uma diminuição de ductilidade relativamente a paredes de alvenaria simples.
- O *drift* lateral das paredes com armadura de junta horizontal duplica relativamente a paredes do mesmo género sem armadura de junta horizontal.
- O preenchimento das junta vertical com argamassa, origina uma rigidez inicial, K_e , superior entrando em rotura mais cedo do que as paredes de junta vertical não preenchida, K_{Hmax} .

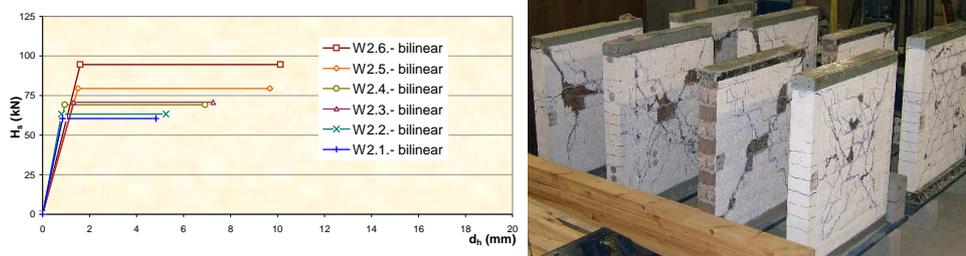


Figura 10 – Análise comparativa dos diagramas bi-lineares e imagem de paredes ensaiadas.

Na Figura 10 apresenta-se o diagrama bi-linear para cada tipo de parede, de onde se verifica a evolução qualitativa de melhoria do seu comportamento de paredes com a seguinte sequência:

1. Simples, com junta vertical não preenchida;
2. Simples, com junta vertical preenchida;
3. Confinada com pano de alvenaria não armado e junta vertical não preenchida;
4. Simples reforçada com armadura de junta horizontal e junta vertical não preenchida;
5. Confinada com armadura de junta horizontal no pano de alvenaria de junta vertical não preenchida,

6. Confinada com armadura de junta horizontal ancorada nos elementos de confinamento e com pano de alvenaria de junta vertical não preenchida.

3. CONCLUSÕES

O conhecimento de características materiais e do comportamento de diferentes soluções construtivas em alvenaria resistente são objectivo do trabalho em curso e julga-se uma necessidade real de acordo com aspectos económicos e de inovação tecnológica, aspectos de redução de patologias na construção e como soluções viáveis tendo em conta as novas regras de dimensionamento.

Com base no trabalho experimental em curso e com os resultados para já obtidos, de forma global e qualitativa, distinguem-se três tipos de resposta de paredes sujeitas ao corte e com desempenho similar: (a) alvenaria simples com junta vertical preenchida ou não preenchida, (b) alvenaria simples reforçada e confinada sem reforço horizontal, e (c) alvenaria confinada com sem reforço horizontal. Estes três diferentes processos construtivos devem ter particular importância na adopção de soluções resistentes a acções sísmicas, e assim serem opções para o dimensionamento da resistência global de edifícios, de acordo com a nova regulamentação.

Espera-se com este artigo, poder ser dada uma contribuição para o conhecimento do comportamento de diferentes tipos paredes de alvenaria, e assim possibilitar à comunidade técnica a informação da viabilidade de conceber outro tipo soluções estruturais concorrentes com as tradicionalmente utilizadas.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento concedido pela Agencia de Inovação, bem como o apoio das empresas Maxit – Prefabricação em Betão Leve, S.A, Sika Portugal, S.A, Bekaert, S.A, e SOCITREL – Sociedade Industrial de Trefilaria, S.A. pelo fornecimento de materiais usados nesta campanha experimental.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Rei, J. – *Edifícios de pequeno porte em alvenaria resistente: Viabilidade técnico-económica*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1999.
- [2] Gouveia, J. P. – *Comportamento de estruturas de alvenaria por aplicação de acções de compressão*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de Estruturas. DEC/FCTUC, 2000.
- [3] Bezelga, A. – *Edifícios de habitação: Caracterização e estimação técnica-económica*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Nacional Casa da Moeda, Lisboa, 1984.
- [4] Bureau Securitas, “Étude statistique de 12200 cas de sinistres survenus en 1982”. *Annales de l’ITBTP. N° 426. Séries Questions Generales 162*. Paris, Juillet-Aôut 1984.

-
- [5] CEN – EN1996-1-1 – *Eurocode 6: Design of Masonry Structures – Part 1-1: Common rules for reinforced and unreinforced masonry structures*. CEN/TC 250, 2005.
 - [6] Calvi et al. – “Testing masonry structures for seismic assessment”. *Earthquake Spectra, Journal of Earthquake Engineering Research Institute*, 12 (1), 145-162, 1996.
 - [7] Tomaževic, M. et al.– “Seismic behavior of masonry walls: experimental simulation”. *Journal of Structural Engineering*, 122 (9), 1040-1047, 1996.
 - [8] Vasconcelos, G. – *Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: characterization of granites and behaviour of ancient masonry walls*. PhD Thesis, University of Minho, 2005. Disponível em www.civil.uminho.pt/masonry.
 - [9] Bosiljkov, V. et al. – “Performance based studies of in-plane loaded unreinforced masonry walls”. *Masonry International*, 16 (2), 39-50, 2003.
 - [10] Magenes, G. – *Seismic behavior of brick masonry: strength and failure mechanisms*. PhD Thesis, Department of Structural Mechanics, University of Pavia, 1992 (in Italian).