

COMPORTAMENTO DE PAINÉIS DE ALVENARIA REFORÇADOS COM FRCM SUJEITOS A AÇÕES NO PLANO: ESTUDO DA INTERFACE

**J. ALMEIDA**

Aluno de doutoramento Eng.^a Civil
Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
e-mail: j.almeida@civil.uminho.pt

**E. PEREIRA**

Prof. Aux. Eng.^a Civil
Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
e-mail: epereira@civil.uminho.pt

**J. BARROS**

Prof. Eng.^a Civil
Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
e-mail: barros@civil.uminho.pt

RESUMO

O presente trabalho dedica-se à caracterização do comportamento de modelos de alvenaria reforçada com FRCM (fiber reinforced cementitious matrix) quando sujeitos a ações que atuam no plano da parede. O sistema de reforço, composto por uma camada de argamassa cimentícia reforçada com uma malha de CFRP (carbon fiber reinforced polymer), foi aplicado a modelos de alvenaria de tijolo furado. Considerando a importância da interface entre a camada de reforço e o substrato para a eficiência do sistema de reforço, procedeu-se à caracterização do comportamento mecânico da interface por intermédio de ensaios de corte direto, com os quais foi possível definir as superfícies de cedência e de rotura da interface. Os resultados obtidos permitiram a quantificação dos parâmetros que caracterizam a interface entre o material cerâmico e uma argamassa do tipo PFRM (polypropylene fibre reinforced mortar) quando sujeita a cargas de corte combinadas com cargas normais à interface. Através de expressões analíticas e do critério de rotura de Mohr-Coloumb foi analisada a adequação de um critério baseado numa aproximação linear, aos dados obtidos experimentalmente.

1. INTRODUÇÃO

As construções em alvenaria são compostas de materiais com comportamento frágil ou quase frágil, apresentando geralmente baixa resistência a eventos sísmicos. Os requisitos de desempenho exigidos pela regulamentação em vigor dificilmente são cumpridos pelos elementos em alvenaria, quer porque os requisitos se tornaram mais exigentes, quer pelos efeitos negativos da degradação dos materiais. A importância e abundância destes elementos nas construções acentua o interesse no desenvolvimento de procedimentos eficazes para o reforço sísmico, com a finalidade de aumentar a sua capacidade de carga e a ductilidade do seu comportamento.

A quantificação da contribuição de um sistema de reforço do tipo FRCM aplicado a elementos de alvenaria de tijolo cerâmico foi apresentado por Almeida et al [1]. Neste trabalho, modelos de alvenaria reforçados foram sujeitos a ensaios de corte por tração diagonal, tal como indicado na ASTM-E519-02. Adicionalmente, foi estudado um procedimento de ensaio alternativo com o objetivo de permitir a avaliação do comportamento cíclico e da evolução dos mecanismos de dano nos modelos estudados. Foi verificada a existência de um modo de rotura predominante, que consistiu na delaminação da camada de reforço, quando os elementos eram sujeitos a cargas no plano. Tendo em atenção esses resultados foi desenvolvido um programa experimental com o intuito de caracterizar a interface de um sistema de reforço do tipo FRCM composto por uma camada de argamassa do tipo PFRM aplicado em alvenaria de tijolo cerâmico. Além disso, foi investigada a adequação da aplicação de um procedimento de ensaio utilizando provetes do tipo “couplet” que apresentam a vantagem de permitir a caracterização objetiva do comportamento mecânico de apenas uma superfície de interface.

1.1. Sistemas de reforço por adição de camadas de argamassa

A aplicação de camadas de revestimento adicionais em elementos de alvenaria existentes é uma técnica de reforço bastante comum, especialmente em regiões de considerável atividade sísmica. Estes tratamentos superficiais, como designados por Elgaway et al. [2], incorporam em geral uma argamassa aplicada manualmente ou através de meios

mecânicos sendo o comportamento à tração e a ductilidade destes materiais melhorados através da adição de fibras e de malhas, as quais podem ser de aço, polímeros, fibras de carbono ou fibras de vidro [3]–[6]. A aplicação destes sistemas resultam na melhoria do comportamento dos elementos de alvenaria para solicitações tanto no plano como para fora do plano [7]. Um conceito diferente de reforço foi desenvolvido através da utilização de materiais com comportamento de endurecimento em tração, evitando o uso de malhas de reforço. Estes materiais, com a designação em inglês “strain hardening cementitious composites” (SHCC), têm uma resistência à tração maior do que a tensão no início da fissuração da matriz, e uma deformação para o valor da tração máxima superior a 1%. Apresentam também a capacidade de desenvolver padrões de fissuração difusos com uma largura de fissura não superior a 0,1 milímetros na fase de endurecimento. O SHCC pode ser aplicada utilizando a técnica manual ou de projeção mecânica [8], [9]. Esta técnica pode conduzir ao aumento da resistência de corte da alvenaria, à melhoria da sua capacidade de deformação e ao aumento capacidade de dissipação de energia sob solicitações cíclicas [10].

1.2. Caracterização da interface Tijolo/PFRM

O estudo do comportamento de juntas de alvenaria e da interface entre dois materiais é realizada através da adoção de detalhes específicos sobre a geometria, condições de fronteira e configurações de carga durante o ensaio. Diferentes geometrias adotadas para os ensaios de corte direto são apresentadas por Van Der Pluijm [11] e Montazerolghaem et al [12]. Embora distintos tipos de geometrias de provetes e formas de aplicar as cargas tenham sido estudadas, alcançar uma distribuição uniforme da tensão tangencial e da tensão normal ao longo da interface é de elevada complexidade [11].

A resistência de um material quando sujeito a um estado de tensão multiaxial pode ser considerada como uma função do campo de tensões, não podendo ser determinada apenas por uma das componentes, tração, compressão ou corte, de forma independente. Um número considerável de funções ou critérios de rotura é apresentado por Chen [13], no entanto, um dos mais utilizados para o caso de materiais isotrópicos é o Critério de Mohr, governado pela seguinte equação (1):

$$|\tau| = f(\sigma) \quad (1)$$

onde τ representa a tensão de corte considerando um plano específico, dependente da tensão normal, σ , no mesmo plano.

A equação (1) representa a região na qual se dá a rotura de acordo com os círculos de Mohr correspondentes, considerando todos os possíveis estados de tensão. A região é uma função que pode ser determinada experimentalmente, podendo assumir a forma da envolvente, Mohr-Coulomb, que é representada por duas linhas retas, Figura 1, e traduzida na seguinte equação:

$$f(\sigma) = c - \sigma \times \tan \phi \quad (2)$$

onde c é a coesão e ϕ o ângulo de atrito (ver Figura 1).

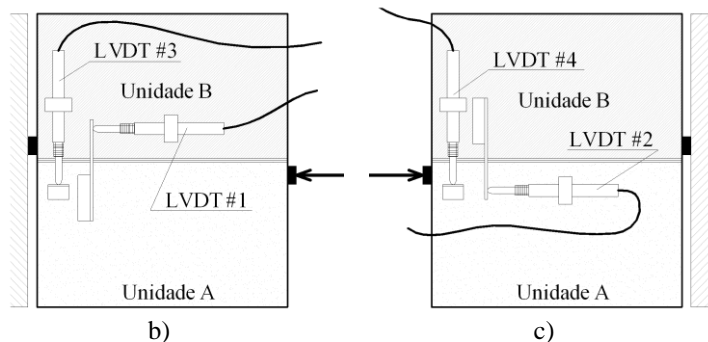
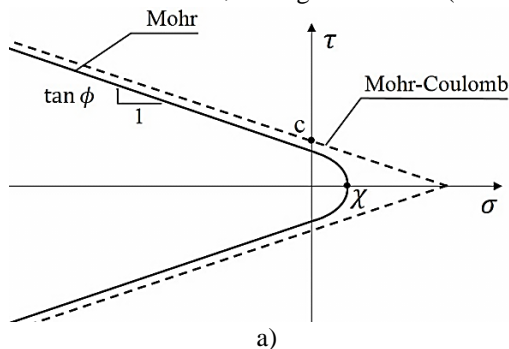


Figura 1: a) Representação do critério de Mohr; b) Posição dos transdutores de monitorização, LVDT, #1 e #3; Posição dos transdutores de monitorização, LVDT#2 e #4

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

2.1. Montagem dos provetes e caracterização dos materiais utilizados

As etapas realizadas durante a preparação dos provetes foram as seguintes: montagem de um pequeno molde contendo uma metade de tijolo e enchimento com argamassa a fim de criar uma unidade compacta e regular com uma altura de 80 mm; remoção do molde após uma semana e virar a superfície de tijolo para cima; colocação num molde e enchimento com argamassa PFRM sobre a unidade existente; corte das amostras, obtendo-se três ou quatro amostras de cada prisma, ver Figura 2a); execução de dois entalhes em ambas as faces longitudinais para formação e propagação da superfície de rotura ao longo da interface entre os dois materiais, reduzindo a área de contacto entre as duas unidades em 60%; medição das dimensões reais das amostras.

O tipo de tijolo cerâmico selecionado é utilizado em Portugal, com dimensões de 30x20x11 cm³, com 8 células ocas. A resistência à compressão do tijolo cerâmico foi obtida seguindo a norma EN 772- 1, [14]. Os tijolos foram ensaiados em

controlo de força na direção da menor espessura perpendicular aos furos e direção paralela aos furos, sob 1,10 e 1,65 kN/s, respetivamente. A resistência à compressão e o coeficiente de variação obtidos foram de 2,21 MPa, 9% na direção perpendicular aos furos e de 6,55 MPa, 8% na direção paralela.

A caracterização do comportamento da argamassa PFRM, composta por cimento Portland, fibras, agregados com granulometria inferior a 2 mm e aditivos, foi efetuada aos 28 dias, sendo que os 12 provetes ensaiados em flexão e os 24 provetes ensaiados em compressão foram mantidos a temperatura aproximadamente constante de 20° e humidade relativa de 90%. O comportamento em flexão foi avaliado em provetes com dimensões de 160x40x40 mm³ e segundo o procedimento descrito na norma EN 1015-11, [15]. O comportamento à compressão foi obtido seguindo as diretrizes da norma anterior, de acordo com as quais se ensaiam à compressão as duas metades resultantes do ensaio em flexão, com dimensões de 40x40x70 mm². O valor médio da resistência à tração em flexão obtido foi de 6 MPa, enquanto o valor médio da resistência à compressão foi de 40 MPa. O valor da resistência média à compressão da argamassa é bastante elevado quando comparado com os valores que caracterizam as alvenarias de tijolo cerâmico.

A tensão de aderência entre a argamassa e o tijolo cerâmico foi avaliada por meio de ensaios de *pull-off* de acordo com a norma EN 1015-12, [16]. Os provetes com uma dimensão de 30x20x14 cm³ foram montados e a cura realizada a temperatura constante de 20° e humidade relativa de 90%. A preparação das amostras para o ensaio iniciou-se com a execução de uma ranhura circular com uma caroteadora. Após a limpeza da superfície foi colada uma placa metálica à área de ensaio utilizando uma resina epóxi. A placa metálica foi depois acoplada à máquina de *pull-off*, tendo-se aplicado uma força de tração com um incremento de 40 N/s. A tensão de aderência entre a argamassa e o tijolo cerâmico foi estimada utilizando a área de contato de cada ensaio. Realizaram-se 16 ensaios, obtendo-se uma tensão de aderência média de 0,57 MPa e um coeficiente de variação de 14 %.

2.2. Equipamentos e metodologias utilizadas nos ensaios de corte direto

A configuração de ensaio desenvolvida para a caracterização experimental é apresentada na Figura 2b), onde a “Unidade A” representa a parte do provete composto por PFRM exclusivamente, e a “Unidade B” representa a parte do provete que contém o elemento de tijolo cerâmico. O procedimento de ensaio consistiu na aplicação de uma força vertical que se manteve constante durante o ensaio (controlo de força) seguida da aplicação de um deslocamento no sentido horizontal (controlo de deslocamentos) a uma velocidade pré-definida. Foi utilizado um atuador para aplicar uma carga vertical constante através de uma rótula e uma placa de aço rígida para distribuir a carga sobre a parte superior da amostra. O deslocamento horizontal foi aplicado na unidade A por intermédio de um atuador utilizando um elemento de aço rígido ligado à sua extremidade. O incremento do deslocamento horizontal foi controlado por um LVDT externo posicionado sobre o atuador, sendo de 0.001 mm/s para os primeiros 0.6 mm de deslocamento e 0.002 mm/s após esse deslocamento e até ao final do ensaio. O deslocamento horizontal da unidade B foi restringido por meio de um suporte rígido no lado oposto, garantindo-se assim as condições para determinar o deslizamento relativo entre as duas unidades.

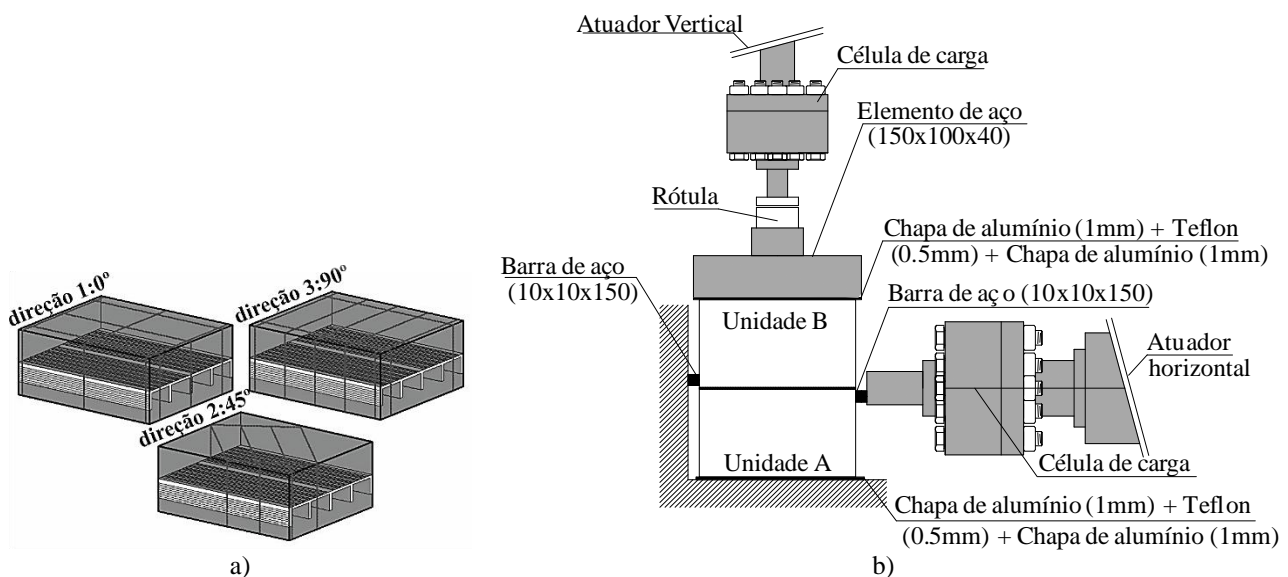


Figura 2: Ensaios de corte direto: a) orientação dos provetes; b) configuração de ensaio desenvolvida.

3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

3.1. Curvas de resposta

As respostas dos provetes ensaiados são apresentadas em termos de valores nominais das tensões na superfície de rotura, tanto no caso da tensão vertical, σ , como da tensão tangencial, τ , as quais foram calculadas de acordo com as equações 3 e 4:

$$\sigma = \frac{N}{A_{eff}} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{T}{A_{eff}} \quad (4)$$

onde T é o valor da força horizontal, N é a carga vertical e A_{eff} é a área efetiva de contacto entre as duas unidades.

Os gráficos obtidos para os diferentes níveis de tensão vertical são apresentados nas Figuras 3, 4 e 5. Para cada amostra ensaiada, o deslizamento relativo foi obtido a partir da média dos valores dos LVDT's horizontais instalados nas duas faces laterais dos provetes, Figura 2 a) e b).

Os resultados obtidos para as três orientações mostram que, em geral, a força máxima de corte e a força tangencial residual aumentam com o aumento da tensão normal. A dispersão de resultados obtida para as respostas tensão tangencial *versus* deslizamento foi inferior no caso dos provetes com orientação 0° . Em alguns provetes com orientação de 90° podem-se observar vários picos locais na fase de amolecimento. Estes resultados são explicados pelo facto de, para esta série, a propagação da fissura ao longo da interface foi mais frágil devido à rotura sequencial das nervuras de tijolo.

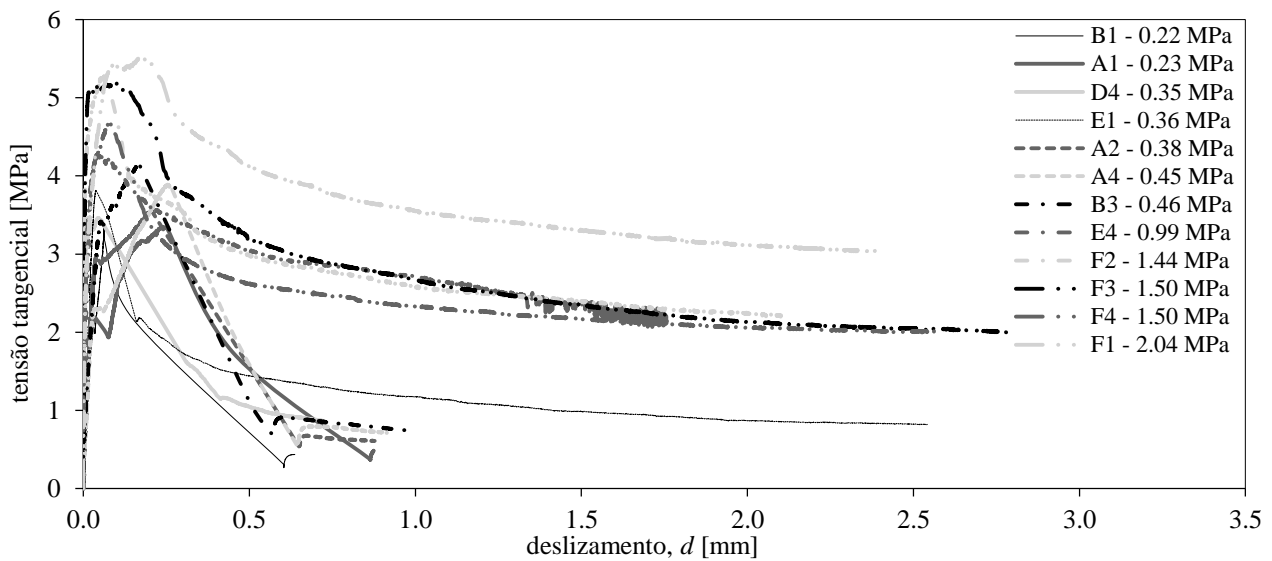


Figura 3: Resultados experimentais para a direção de carregamento 0° .

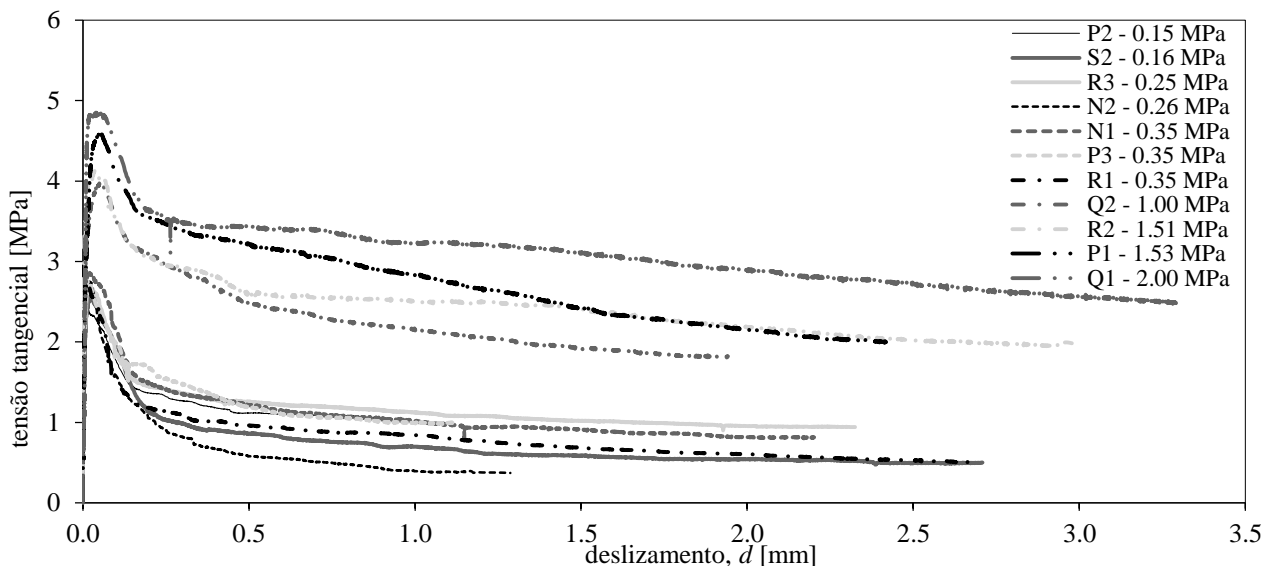


Figura 4: Resultados experimentais para a direção de carregamento 45° .

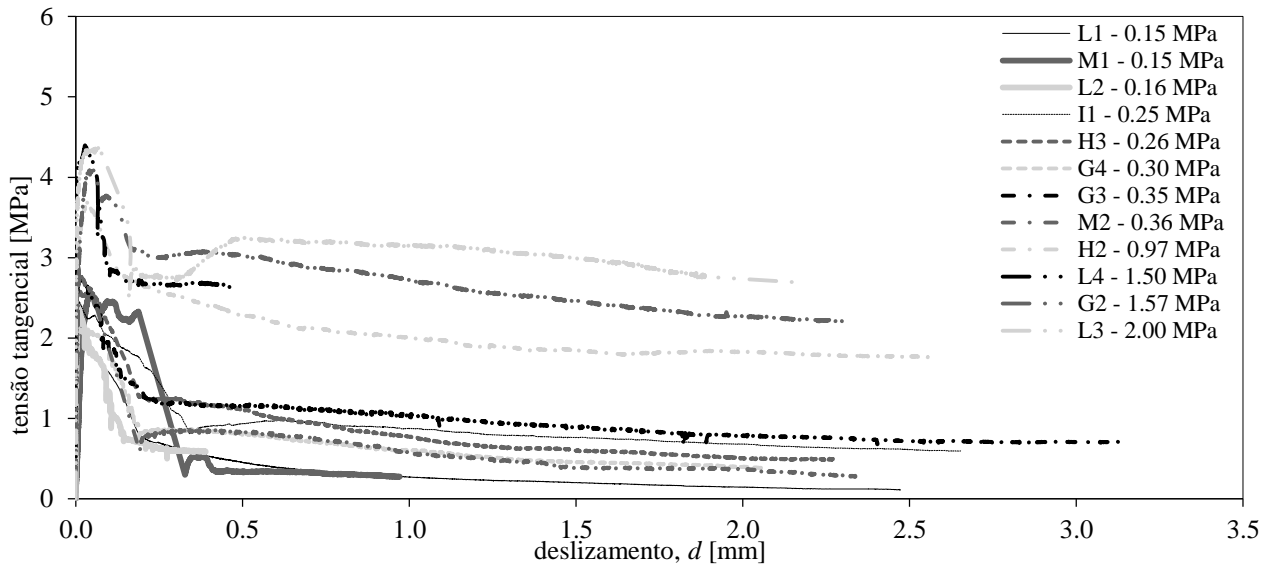


Figura 5: Resultados experimentais para a direção de carregamento 90°.

3.2. Modos de rotura

Na Figura 6 apresentam-se exemplos de superfícies de rotura obtidas para as diferentes orientações ensaiadas. No caso dos provetes ensaiados para uma orientação 0° a rotura ocorre sobretudo pelo deslizamento na interface entre o tijolo cerâmico e argamassa, PFRM, enquanto que para provetes com uma orientação de 90° a rotura é mais condicionada pela fratura das nervuras do tijolo, resultando numa maior influência do material cerâmico na resistência ao corte. Finalmente, para a série de provetes com uma orientação de 45°, observou-se um mecanismo de rotura que apresenta características comuns a ambas as séries anteriores (0° e 90°).

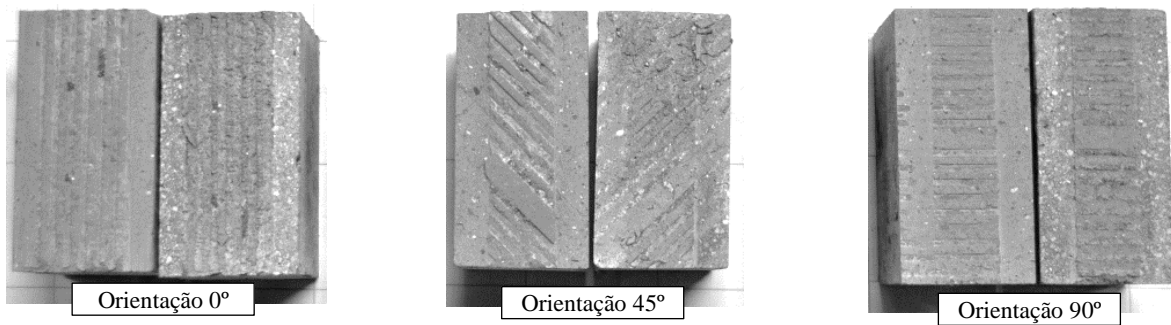


Figura 6: Superfície dos provetes após rotura.

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os provetes foram ensaiados ao corte enquanto sujeitos a diferentes níveis de carga vertical de modo a permitir a identificação dos parâmetros do critério de Mohr-Coulomb que descreve o comportamento da interface tijolo/PFRM. Uma primeira avaliação dos resultados foi efetuada em termos de tensões de corte máximas e residuais calculadas por intermédio das equações 5 e 6:

$$\tau_p = \frac{T_p}{A_{eff}} \quad (5)$$

$$\tau_r = \frac{T_r}{A_{eff}} \quad (6)$$

onde T_p e T_r são, respetivamente, o valor máximo e residual da força horizontal, e A_{eff} é a área efetiva de contacto.

Os valores residuais da tensão tangencial foram obtidos linearizando as curvas experimentais $\tau-d$, considerando incrementos de deslizamento, Δd , constante igual a 0.01 mm, tendo-se determinado o módulo de amolecimento em deslizamento para um dado registo i , S_i , por meio da equação 7. A média móvel para 30 valores de $S_{0.1mm}$, $\bar{S}_{0.3mm}$, foi calculada para as curvas linearizadas, equação 8, e o valor mínimo observado simultaneamente em todas as respostas, -0.331 MPa/mm, foi considerado como o valor referência para a avaliação da tensão tangencial residual, τ_r .

$$S_i = \left(\frac{\Delta\tau}{\Delta d} \right) i \quad (7) \quad \bar{S}_{0.3mm} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (8)$$

Os resultados obtidos para as três séries de resultados são apresentados na Tabela 1, onde se mostram valores da área efetiva da interface de cada provete, A_{ef} , e os valores da tensão de confinamento, σ , da tensão tangencial máxima, τ_p , e da tensão tangencial residual, τ_r , e respectivos valores de deslizamento, $d_{\text{máximo}}$ e d_{residual} .

Tabela 1: Resultados experimentais.

Orientação	Provete	A_{ef} [mm ²]	σ [MPa]	τ_p [MPa]	$d_{\text{máximo}}$ [mm]	τ_r [MPa]	d_{residual} [mm]	
0°	A1	7342	0.23	3.35	0.237	0.48	0.96	
	A2	5054	0.38	3.55	0.206	0.63	0.79	
	A4	4847	0.45	3.89	0.254	0.73	0.86	
	B1	6926	0.22	3.38	0.064	0.43	0.71	
	B3	4992	0.46	4.16	0.166	0.78	0.89	
	D4	5123	0.35	3.47	0.009	0.86	0.76	
	E1	6028	0.36	3.82	0.038	1.04	1.33	
	E4	5719	0.99	4.27	0.042	-	-	
	F1	5764	2.04	5.52	0.172	3.13	1.90	
	F2	4420	1.44	5.29	0.056	2.29	1.77	
	F3	5940	1.50	5.19	0.098	2.17	1.89	
	F4	5852	1.50	4.68	0.077	2.24	1.25	
	45°	N1	5109	0.35	2.86	0.020	0.75	0.95
		N2	5016	0.26	2.94	0.003	0.40	0.94
P1		4454	1.53	4.61	0.051	2.03	2.28	
P2		5412	0.15	2.50	0.010	0.80	0.55	
P3		4454	0.35	2.76	0.012	0.85	0.75	
Q1		4620	2.00	4.85	0.051	2.49	3.27	
Q2		4323	1.00	3.97	0.050	1.89	1.59	
R1		5320	0.35	3.05	0.006	0.80	1.09	
R2		5148	1.51	4.15	0.045	2.07	2.33	
R3		5280	0.25	2.74	0.022	1.01	0.51	
S2		4978	0.16	2.57	0.023	0.74	0.79	
90°		G2	5254	1.57	4.10	0.051	2.28	2.28
	G3	5720	0.35	2.76	0.009	1.06	1.06	
	G4	5325	0.30	2.81	0.008	0.64	0.64	
	H2	6580	0.97	3.69	0.034	1.89	1.89	
	H3	5040	0.26	2.60	0.009	0.65	0.65	
	I1	6248	0.25	2.47	0.006	0.85	0.85	
	L1	4935	0.15	2.49	0.006	0.33	0.33	
	L2	5076	0.16	2.39	0.010	-	-	
	L3	4970	2.00	4.38	0.158	2.74	2.74	
	L4	5396	1.50	4.40	0.027	2.66	2.66	
	M1	4512	0.15	2.55	0.048	0.33	0.33	
	M2	4230	0.36	2.91	0.006	0.41	0.41	

A resposta tensão tangencial *versus* deslizamento ao nível da interface é composta por três etapas. A fase pré-pico é caracterizada por um comportamento linear para deslizamentos muito baixos, associada a um estado da interface praticamente intacto, e por um ramo não-linear até ser atingido o pico da tensão tangencial. A fase pós-pico é caracterizada pelo amolecimento gradual da resposta, correspondente a uma redução progressiva da coesão, resultando numa diminuição não-linear da carga para aumentos consideráveis do deslizamento. A fase pós-amolecimento, durante a qual o atrito é aproximadamente constante, é caracterizada pelo desenvolvimento de grandes deslizamentos e por uma resposta que é sobretudo influenciada pelo atrito e pelo nível de carregamento vertical. Na Figura 7 apresenta-se esquematicamente a curva típica obtida para as respostas experimentais. Os valores que definem as três fases descritas anteriormente estão representados no eixo horizontal. A fase pré-pico tem como limite superior o valor d_{pico} , a fase pós-pico governada pela degradação da coesão verifica-se para valores entre d_{pico} e d_{residual} , e regida pelo atrito entre o valor d_{residual} e o final da curva.

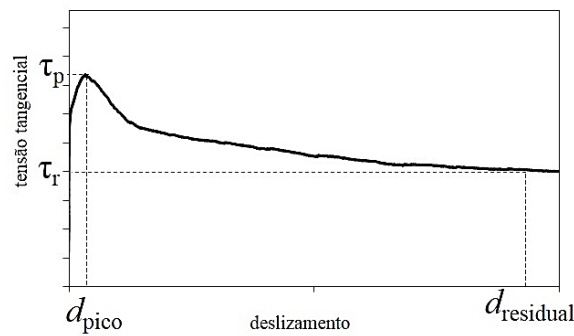


Figura 7: Representação esquemática da curva de resposta tensão tangencial vs. deslizamento.

Os valores que caracterizam o comportamento da interface segundo o critério de Mohr-Coloumb foram estimados realizando regressões lineares dos diferentes conjuntos de dados. Na Figura 8 apresentam-se as equações obtidas para as retas de regressão linear que melhor se aproximam dos resultados experimentais, bem com os valores dos coeficientes de determinação, R^2 , obtidos. De uma forma geral pode-se afirmar que as retas de regressão linear são representativas de todos os grupos de dados, pois todos os valores obtidos para R^2 superaram 0.90. De salientar, no entanto, que a interseção das retas de regressão com o eixo horizontal τ (σ)=0, que representa a tensão de aderência em tração, se obtém para valores de 2.74, 1.95 e 2.05 MPa considerando a superfície de rotura definida pelos valores das tensões tangenciais de pico para as orientações de 0° , 45° e 90° , respetivamente. Existe uma discrepância significativa entre estes valores e o valor da tensão de aderência obtida através dos ensaios *pull-off*, de 0.57 MPa. Fazendo o mesmo tipo de análise para os valores de tensão tangencial residual obtêm-se valores de 0.16, 0.51 e 0.21 MPa para as orientações de 0° , 45° e 90° , respetivamente. Neste caso, e uma vez que nesta fase a interface entre os dois materiais já se encontra totalmente danificada, os valores deveriam ser aproximadamente zero.

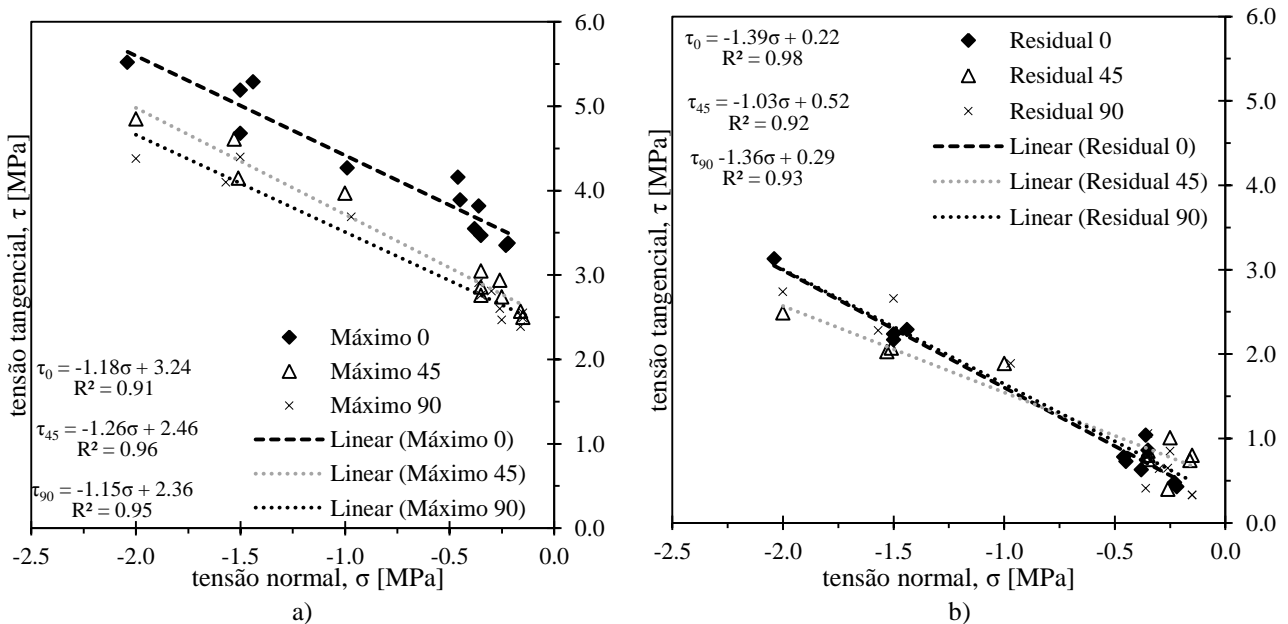


Figura 8: Regressão linear dos dados experimentais: a) valores máximos da tensão tangencial vs. tensão normal; b) valores residuais da tensão tangencial vs. tensão normal.

5. CONCLUSÕES

A configuração de ensaio desenvolvida para a caracterização do comportamento da interface possibilitou a caracterização de provetes com apenas uma superfície de rotura. Este tipo de ensaio apresenta vantagens quando comparado com outros utilizados na caracterização da interface, pois a informação obtida é inerente a apenas uma superfície de rotura, ao contrário do que acontece em outros esquemas de ensaio que implicam a progressão de dano em mais do que um plano de rotura em simultâneo, como por exemplo no caso do *triplet*.

O programa experimental revelou, em geral, respostas tensão tangencial *versus* deslizamento caracterizadas por um comportamento pós-pico no qual é possível identificar uma fase de amolecimento, especialmente quando são aplicados

níveis de carga vertical mais elevados. Depois da fase de amolecimento verifica-se a existência de um patamar no qual a força de atrito residual depende da natureza das superfícies em contacto e do nível de carga vertical aplicada. Para provetes com uma orientação 0°, a rotura ocorreu ao longo das ranhuras da superfície do tijolo, verificando-se sobretudo o deslizamento entre os dois materiais. Em oposição, o comportamento observado na série com orientação 90° foi condicionado pelo facto de o deslocamento imposto ser perpendicular às ranhuras, o que provocou uma fratura progressiva nas nervuras do tijolo. A orientação intermédia apresentou um comportamento misto.

Aplicando o critério de Mohr-Coulomb determinaram-se valores de coesão de 3.24, 2.46 e 2.36 MPa e ângulos de atrito de 49.7, 51.6 e 49.0° para as orientações de ensaio relativamente às nervuras de 0, 45 e 90°, respetivamente. O critério de Mohr-Coulomb descreve os resultados obtidos experimentalmente de forma muito satisfatória. No entanto tem a desvantagem de apresentar divergências relativamente ao observado experimentalmente nos ensaios de *pull-off* para estados de tensão que se localizem no quadrante de tensões, ou seja, se a tensão normal for de tração.

Em trabalhos futuros serão efetuados ensaios de caracterização da interface entre o tijolo e uma argamassa tradicional bem como entre uma argamassa e a argamassa do tipo PFRM. Será também necessário verificar a adequação aos resultados experimentais de critérios de rotura que possuam mais parâmetros, tais como o critério de Mohr.

6. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi realizada no âmbito do projeto InoTec - Material inovador de ultra-alta ductilidade para a reabilitação do património construído, financiado pelo COMPETE / QREN / FEDER (NORTE-07-0202-FEDER-023024). O projeto InoTec é promovido pela empresa CiviTest e pela Universidade do Minho. Um especial agradecimento à empresa S&P Clever Reinforcement Ibérica pelo fornecimento dos materiais utilizados no reforço dos modelos de alvenaria.

7. REFERÊNCIAS

- [1] J. A. P. P. de Almeida, E. N. B. Pereira, and J. A. O. Barros, "Performance assessment of overlay strengthened masonry under cyclic loading using the diagonal tensile test," in *9th International Masonry Conference, July 7, 8, 9; Guimarães*, 2014.
- [2] M. A. Elgawady, P. Lestuzzi, and M. Badoux, "A review of conventional seismic retrofitting techniques for URM," in *13th International Brick and Block Masonry Conference*, 2004, pp. 1–10.
- [3] S. B. Kadam, Y. Singh, and B. Li, "Strengthening of unreinforced masonry using welded wire mesh and micro-concrete – Behaviour under in-plane action," *Constr. Build. Mater.*, vol. 54, pp. 247–257, 2014.
- [4] A. Figueiredo, H. Varum, A. Costa, D. Silveira, and C. Oliveira, "Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall," *Mater. Struct.*, vol. 46, no. 1–2, pp. 203–219, Jul. 2012.
- [5] C. G. Papanicolaou, T. C. Triantafyllou, K. Karlos, and M. Papathanasiou, "Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls : in-plane cyclic loading," *Mater. Struct.*, vol. 40, pp. 1081–1097, 2007.
- [6] M. Corradi, A. Borri, G. Castori, and R. Sisti, "Shear strengthening of wall panels through jacketing with cement mortar reinforced by GFRP grids," *Compos. Part B Eng.*, vol. 64, pp. 33–42, 2014.
- [7] Federal Emergency Management Agency, *Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings - FEMA 547*. Books Express Publishing, 2006, p. 572.
- [8] Y. Kim, H. Kong, and V. C. Li, "Design of engineered cementitious composite suitable for wet-mixture shotcreting," *ACI Mater. J.*, no. 100, 2003.
- [9] E. Esmaeeli, E. Manning, and J. A. O. Barros, "Strain hardening fibre reinforced cement composites for the flexural strengthening of masonry elements of ancient structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 1010–1021, Jan. 2013.
- [10] A. Dehghani, G. Fischer, and F. Alahi, "Strengthening masonry infill panels using engineered cementitious composites," *Mater. Struct.*, 2013.
- [11] R. van der Pluijm, *Out-of-Plane Bending of Masonry Behaviour and Strength*. R. van der Pluijm, 1999, p. 259.
- [12] M. Montazerolghaem and W. Jaeger, "A Comparative Numerical Evaluation of Masonry Initial Shear Test Methods and Modifications Proposed for EN 1052-3," in *9th International Masonry Conference, July 7, 8, 9; 2014; Guimarães*, 2014, pp. 1–10.
- [13] W.-F. Chen, *Plasticity in reinforced concrete*. J. Ross Publishing, 2007, p. 474.
- [14] Comité Européen de Normalisation, "EN 772-1:2000 Methods of test for masonry units. Determination of compressive strength." Comité Européen de Normalisation, Brussels, p. 14, 2000.
- [15] Comité Européen de Normalisation, "EN 1015-11:1999 Methods of test mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar." Brussels, 1999.
- [16] Comité Européen de Normalisation, "EN 1015-12:2000 Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened mortar." Brussels, 2000.