

Argamassa de ultra elevada ductilidade para reabilitação: comportamento mecânico e durabilidade

Tiago Valente	Delfina Gonçalves	Cristina Frazão	Joaquim Barros
Eng.º Civil CiviTest V. N. Famalicão tiagovalente@civitest.co m	Eng.ª Civil CiviTest V. N. Famalicão delfinagoncalves@civitest.co m	Eng.ª Civil ISISE Guimarães frazao_cristina@hotmail.co m	Professor ISISE Guimarães barros@civil.uminho.p t

SUMÁRIO

Foi desenvolvida uma argamassa de ultra elevada ductilidade reforçada com fibras (FRCC) para uma nova técnica de reforço de estruturas existentes. São apresentados os estudos de caracterização do material, do ponto de vista mecânico (compressão e flexão), durabilidade (absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao ar e à água, retração por secagem) e aderência ao suporte. É ainda apresentado um estudo da aplicação de diferentes tipos de conetores a empregar na técnica de reforço proposta, cujo desempenho foi determinado pela realização de ensaios de push-out.

Palavras-chave: Argamassa, Fibras, Reforço, Reabilitação, Durabilidade.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do projeto de investigação “InoTec - Material inovador de ultra elevada ductilidade para a reabilitação do património construído”, o qual envolve a CiviTest e a Universidade do Minho, está a ser desenvolvido um novo material para uma nova técnica de reforço de estruturas. Trata-se de um material de matriz cimentícia reforçado com relativa elevada percentagem de fibras de forma a desenvolver elevada ductilidade em tração, atribuindo-se neste trabalho a designação genérica de “FRCC-fiber reinforced cement composite”.

O FRCC tem a particularidade de apresentar resistência última à tração superior à tensão de início da fendilhação da sua matriz, e rotura por tração para níveis de extensão muito elevados, superior a 2%, com formação de padrões de fendilhação difuso, o que para além da extraordinária capacidade de absorção de energia, protege eficazmente os materiais que envolve de efeitos nefastos de agentes de agressividade ambiental.

O FRCC foi desenvolvido para ter propriedades reológicas, mecânicas, de durabilidade e de aderência aos materiais do substrato, de modo a ser aplicável pela técnica de projeção de

argamassas para a reabilitação de estruturas de materiais frágeis, com preenchimento completo dos espaços existentes entre os elementos que constituem a estrutura a reforçar e sem ocorrer escorrimto do FRCC, nem ressalto dos elementos que o constituem.

Por sua vez, a técnica de reabilitação de estruturas baseia-se na aplicação, por projeção, de finas camadas de FRCC nas faces externas de paredes de alvenaria, sendo estas camadas ligadas por conetores em material polimérico reforçadas com fibras sintéticas (FRP) imunes a fenómenos de corrosão. Assim, o elemento reforçado passa a funcionar como uma estrutura sandwich com camadas externas em FRCC de elevada resistência à tração pós-micro-fissuração, ductilidade e durabilidade. Esta técnica aumenta significativamente a resistência do elemento a esforços de membrana no seu plano e a esforços de flexão para fora do seu plano, bem como a sua capacidade de dissipação de energia quando sujeito a solicitações cíclicas representativas de eventos sísmicos.

O presente trabalho engloba os estudos efetuados no âmbito da caracterização do comportamento mecânico (compressão e flexão), avaliação de indicadores de durabilidade (absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao ar e à água, retração por secagem) e aderência ao suporte do FRCC. Os resultados obtidos nos ensaios realizados com o FRCC, são analisados por comparação com os resultados homólogos, obtidos com uma argamassa comercial, apresentados em Frazão *et al.* [1]. São ainda apresentados os resultados dos ensaios de push-out realizados com o intuito de avaliar o desempenho de diferentes tipos de conetores aplicados em paredes de alvenaria de tijolo cerâmico reforçada com a técnica proposta.

2. COMPOSIÇÕES E PROPRIEDADES EM ESTADO FRESCO DO FRCC

2.1 Composição FRCC

Na composição para o FRCC foi adotado cimento (CEM) do tipo I 42.5R, cinzas volantes (CV), areia fina (AF), superplastificante (SP) (SIKA Viscocrete 3002), controlador de viscosidade (VMA), fibras de vidro de 12mm de comprimento (GF) e fibras de polipropileno de 12mm de comprimento (PPF) (ver Quadro 1).

Quadro 1. Composição adotada para o FRCC (por m³ de argamassa).

CEM [kg]	CV [kg]	Água [kg]	AF [kg]	SP 3002 [kg]	VMA [kg]	GF [%]	PPF [%]
546,5	669,0	318,0	437,0	21,0	3,42	4	1

2.2 Propriedades em estado fresco

De modo a caracterizar a argamassa no estado fresco efetuaram-se ensaios de espalhamento, segundo a norma EN 1015-3 [2] e ensaios de determinação do teor em ar e da massa volúmica de acordo com as normas EN 1015-7 [3] e EN 1015-6 [4], respetivamente.

No Quadro 2 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de espalhamento, o teor em ar e a massa volúmica da argamassa reforçada com fibras.

Quadro 2. Resultados dos ensaios de espalhamento, teor em ar e massa volúmica.

FRCC	Espalhamento [mm]	Teor em ar [%]	Massa Volúmica [kg/m ³]
	185	6.5	1828.82

Comparando os resultados obtidos com os homólogos numa argamassa comercial [1], verificou-se que o FRCC apresentou um diâmetro de espalhamento próximo da argamassa comercial (194 mm). No entanto, as fibras de vidro provocaram um aumento do teor de ar do FRCC e conseqüentemente, uma diminuição da massa volúmica (teor em ar de 3.7% e massa volúmica de 2190.73 kg/m³ na argamassa comercial) [1].

3. COMPORTAMENTO MECÂNICO

A caracterização mecânica da argamassa reforçada com fibras foi realizada através de ensaios de determinação do módulo de elasticidade com base na norma NP EN 12390-13 [5], resistência à compressão segundo a norma NP EN 12390-3 [6] e ensaios de flexão de acordo com a norma EN 1015-11 [7].

3.1 Módulo de elasticidade secante em compressão

No Quadro 3 são apresentados os valores médios obtidos do módulo de elasticidade do FRCC às diferentes idades.

Quadro 3. Valores médios do módulo de elasticidade.

FRCC	Idade (dias)	14	28
	E_{cm} (GPa)	8.74	14.11

Verificou-se pelos resultados obtidos, que o módulo de elasticidade é menor no FRCC comparativamente com a argamassa comercial (E_{cm} (14 dias) = 32.43 GPa e E_{cm} (28 dias) = 38.24 GPa) [1].

3.2 Comportamento em compressão

O comportamento em compressão das argamassas foi avaliado através de ensaios de compressão em provetes cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

Na figura 1 apresentam-se as curvas médias tensão-extensão de compressão para quatro provetes de FRCC.

O FRCC apresentou uma resistência à compressão menor que a argamassa comercial [1], cujos valores obtidos da resistência à compressão máxima foram de 30 MPa aos 14 dias e de 36.46 MPa aos 28 dias.

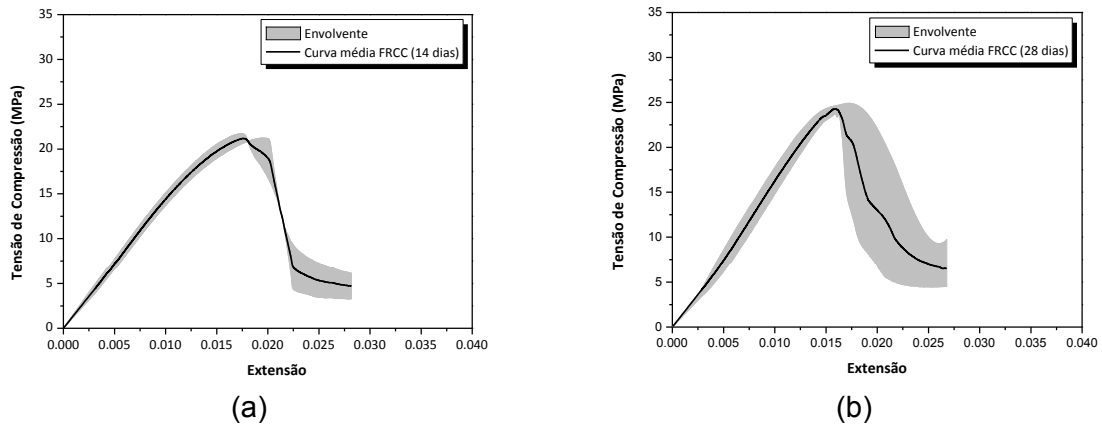


Figura 1. Relação tensão-extensão do FRCC – a) 14 dias; b) 28 dias de idade.

3.3 Comportamento em flexão

Os ensaios de flexão foram efetuados em provetes de dimensões $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, com um entalhe a meio-vão de 0.4 mm de espessura e 8 mm de profundidade, numa prensa servo-controlada de elevada precisão, em controlo de deslocamento através de um transdutor (LVDT) posicionado a meio vão, com uma velocidade de deformação de 0.2 mm/min. A carga aplicada foi medida com recurso a uma célula de carga de 10 kN de capacidade, e o deslocamento vertical a meio vão foi medido por intermédio de um LVDT (ver Figura 2a). Foi também medida a abertura de fissura na boca do entalhe (*CTOD – Crack Tip Opening Displacement*) através de um outro transdutor posicionado perpendicularmente à boca do entalhe (Figura 2b).

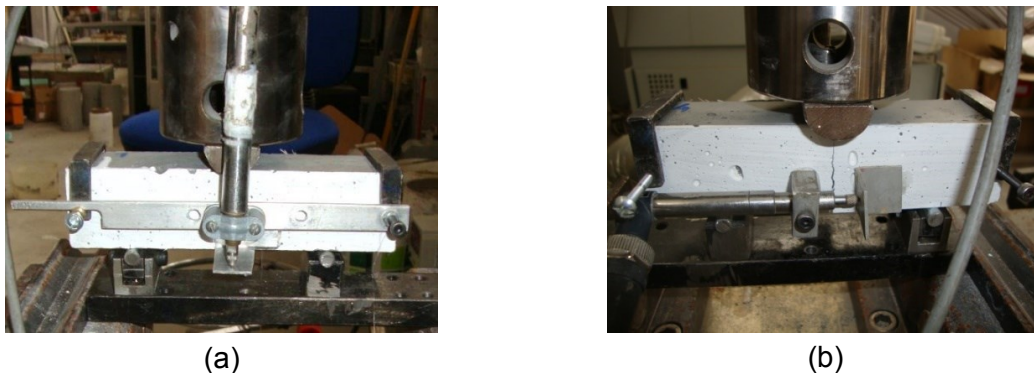


Figura 2. Ensaio de resistência à flexão dos provetes prismáticos – Aplicação e posicionamento dos transdutores.

Na Figura 3 apresentam-se as curvas médias força-flecha registadas nos ensaios de flexão com provetes de FRCC.

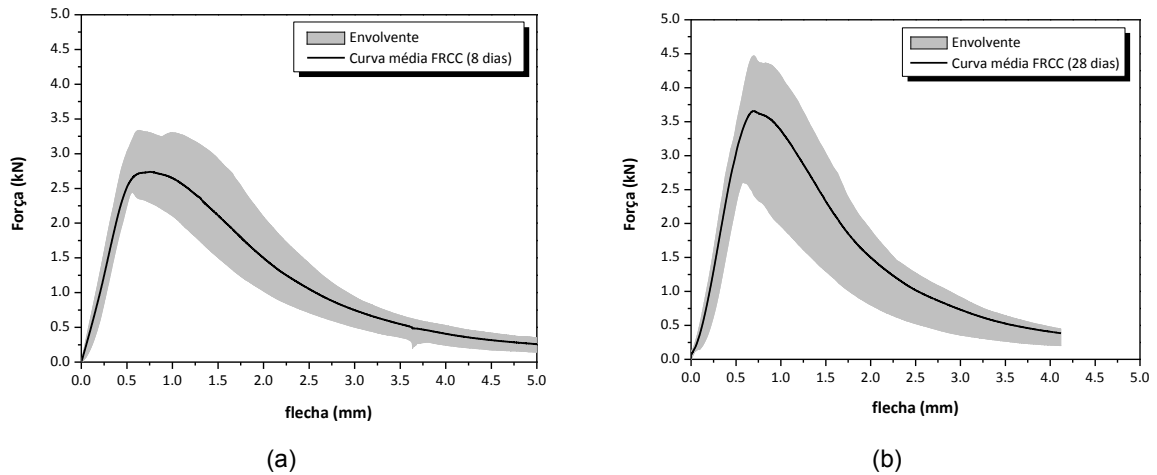


Figura 3. Relação força-flecha do ensaio de flexão do FRCC – a) 8 dias; b) 28 dias de idade.

No Quadro 4 apresentam-se os resultados de resistências residuais $f_{R,i}$ obtidos segundo as recomendações adaptadas (a geometria do provete é diferente) do CEB-FIP MODEL CODE [8]. É também indicada a energia absorvida durante o processo de fratura até uma abertura de fenda de 4 mm, G_f , determinada segundo a expressão proposta pela RILEM TC 50-FMC [9] e a resistência máxima à tração por flexão f_m , valor médio de 4 provetes.

Pelo Quadro 4 é identificável a ductilidade conferida pela adição das fibras. Nestes provetes desenvolveu-se uma única macrofenda até atingir a rotura, devido à execução do entalhe (Figura 4).

Quadro 4. Resistências residuais médias, energia de fratura, abertura de fissuração CMOD e resistência máxima à tração por flexão de acordo com o CEB-FIP MODEL CODE [6].

	$f_{R,1m}$	$f_{R,2m}$	$f_{R,3m}$	$f_{R,4m}$	G_{fm}	f_m
					[N/mm]	[MPa]
CMOD [mm]	0.5	1.5	2.5	3.5		
FRCC (8d) [MPa]	9.00	6.03	3.72	2.44	5.26	9.56
Coef. de variação (%)	15.82	18.90	19.10	18.27	17.38	12.67
FRCC (28d) [MPa]	11.37	6.43	3.64	2.21	5.26	12.55
Coef. de variação (%)	21.73	25.63	25.37	26.04	22.85	18.04



(a)



(b)

Figura 4. Modo de rotura em flexão dos provetes de FRCC.

Pelo Quadro 4 é identificável a ductilidade conferida pela adição das fibras no FRCC, no entanto, os valores de resistências residuais permaneceram praticamente invariáveis dos 8 para os 28 dias de idade. Comparando com a argamassa comercial [1], cujos valores da resistência à tração por flexão são de 5.56 MPa aos 8 dias e 6.19 MPa aos 28 dias, verifica-se que o FRCC apresenta melhor comportamento à flexão. Além disso, na argamassa comercial [1], após ser atingido o ponto de carga máximo, esta apresentou uma diminuição abrupta da capacidade de carga, devido ao seu comportamento frágil.

4. DURABILIDADE

A presente secção apresenta a campanha experimental realizada para caracterização do FRCC em termos da sua durabilidade, nomeadamente, ensaios de determinação de absorção por capilaridade (EN 1015-18 [10]), permeabilidade ao ar e água, variação dimensional (retração por secagem) (ASTM C490-07 [11]).

4.1 Absorção de água por capilaridade

O procedimento de ensaio de absorção por capilaridade consistiu em colocar os provetes numa estufa ventilada a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante, M_0 . Após as operações de secagem e posterior arrefecimento até atingir a temperatura ambiente, as quatro faces de cada provete, adjacentes à face inferior através da qual ocorrerá a absorção de água, foram sujeitas a uma pintura de impermeabilização com tinta epoxídica ao longo de 30 mm da sua altura. Colocaram-se os provetes num recipiente e introduziu-se água até que o nível da mesma atingisse 5 ± 1 mm de altura, acima da face inferior do provete e tapou-se o recipiente. A quantificação da água absorvida foi feita através da realização de sucessivas pesagens dos provetes, M_i . Os resultados obtidos nos ensaios realizados permitiram determinar, para cada instante de tempo, a respetiva absorção capilar A_c , expressa em kg/m^2 , calculada através da divisão do aumento da massa registado ($M_i - M_0$) pela área da superfície inferior do provete que esteve em contacto com a água. Este procedimento permitiu elaborar diagramas representativos da cinética de absorção capilar, expressando a absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo (Figura 5).

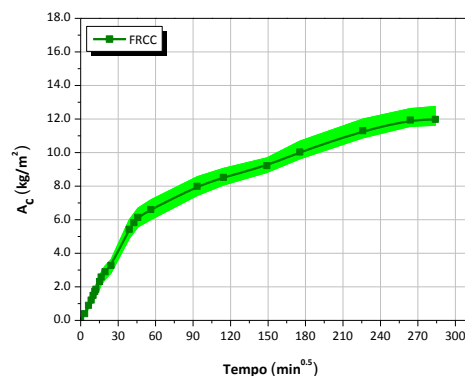


Figura 5. Absorção capilar dos provetes de FRCC.

De acordo com a norma EN 1015:18 [10], o valor do coeficiente de absorção capilar obtido para o FRCC é de $1.09 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$, superior ao mesmo valor obtido na argamassa comercial [1], $0.26 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$.

4.2 Permeabilidade ao ar e à água

A permeabilidade ao ar e à água das argamassas em estudo foi medida numa célula de permeabilidade de Leeds. Este permeâmetro permite submeter provetes a uma determinada pressão durante um determinado período, garantindo que o fluxo do fluido que atravessa o provete é estável e uniaxial.

No Quadro 5 apresentam-se os resultados da porosidade aberta, δ , obtida nos provetes de FRCC.

Quadro 5. Resultados da porosidade aberta.

	Provete	M_1 (g)	M_2 (g)	M_3 (g)	δ (%)	δ_{im} (%)	S_d (%)	CoV (%)
FRCC	P1	99.70	52.30	117.90	27.74	28.36	0.40	1.41%
	P2	98.10	51.50	116.30	28.09			
	P3	95.90	51.00	113.80	28.50			
	P4	97.40	52.40	115.50	28.68			
	P5	95.00	50.80	112.90	28.82			
	P6	97.80	52.00	115.90	28.33			

No Quadro 6 apresentam-se as características dos provetes de FRCC utilizados nos ensaios e os principais resultados dos parâmetros para a determinação do coeficiente de permeabilidade ao ar, K_G , nomeadamente, o tempo médio de percurso de uma bolha de sabão para uma distância de 10 cm (T_{10}) e o fluxo de ar (ν).

Quadro 6. Coeficiente de permeabilidade ao ar no FRCC.

FRCC								
Provete	ϕ (mm)	L (mm)	T_{10} (s)	νe^{-08} (m^3/s)	$K_G e^{-16}$ (m^2)	$K_{Gm} e^{-16}$ (m^2)	$S_d e^{-16}$ (m^2)	CoV (%)
P1	44.34	41.83	57.84	13.579	1.858	1.638	0.289	17.67
P2	44.21	41.95	51.56	15.233	2.102			
P3	44.20	40.60	78.92	9.952	1.330			
P4	44.24	41.07	74.47	10.546	1.423			
P5	44.24	40.11	67.17	11.693	1.541			
P6	44.16	41.34	68.09	11.534	1.572			

No Quadro 7 apresenta-se os resultados obtidos da profundidade média de penetração de água em cada provete de FRCC, d_{pm} , e o coeficiente de permeabilidade à água, K_W .

Quadro 7. Coeficiente de permeabilidade à água no FRCC.

Provete	FRCC							
	d_p (mm)	d_{pm} (mm)	S_d (mm)	CoV (%)	$K_G e^{-18}$ (m ²)	$K_{Wm} e^{-18}$ (m ²)	$S_d e^{-18}$ (m ²)	CoV (%)
P1	11.15				6.78			
P2	14.28				11.26			
P3	9.81	12.38	2.31	18.66	5.40	8.81	3.41	38.71
P4	12.23				8.43			
P5	15.94				14.40			
P6	10.87				6.58			

Analisando os resultados obtidos da porosidade aberta e da permeabilidade ao ar e à água do FRCC, verificou-se um aumento muito significativo destes valores comparativamente com a argamassa comercial [1] ($\delta_{im} = 8.42\%$, $K_{Gm} = 0.331 e^{-16} m^2$ e $K_{Wm} = 0.68 e^{-18} m^2$).

4.3 Variação Dimensional (Retração por Secagem)

Os valores da retração por secagem, obtidos nos provetes das argamassas em estudo, apresentam-se na Figura 6(a). Na Figura 6(b) apresentam-se os resultados da perda de massa em percentagem ao longo do tempo.

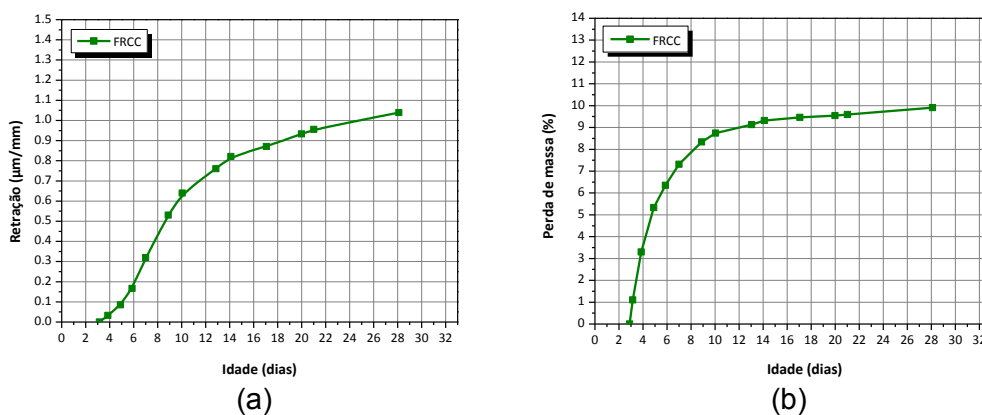


Figura 6. Resultados dos ensaios de retração (a) e perda de massa dos provetes (b)

Analisando a Figura 6(a) pode verificar-se que a maior parte da retração por secagem ocorreu nas primeiras idades, o que era expectável, já que a retração por secagem está intimamente ligada à perda de humidade para o exterior, e é nas primeiras idades que se verificou uma maior perda de água, conforme constatado na Figura 6(b), relativo à perda de massa dos provetes ensaiados Comparando com os mesmos valores obtidos com a argamassa comercial [1], verifica-se que a retração é semelhante em ambas as argamassas, apesar de na argamassa comercial se verificar uma menor perda de massa (cerca de 50% da obtida no FRCC).

5. ADERÊNCIA DO FRCC

O método adotado segue o disposto na norma europeia EN 1015-12 [12] e consiste em avaliar a resistência de aderência a partir da máxima tensão aplicada por tração direta perpendicular à superfície de argamassa.



Figura 7. Realização dos ensaios de Pull-off com equipamento de arrancamento.



Figura 8. Modos de rotura dos provetes tijolo rebocado/FRCC.

Na Figura 8 apresentam-se os modos de rotura ocorridos para cada carote de argamassa aplicada sobre tijolo cerâmico rebocado com argamassa de reboco, de traço 1:5.

Os resultados dos ensaios efetuados apresentam-se no Quadro 8, nomeadamente os valores relativos à geometria dos provetes, força última F_u e à tensão de aderência, f_u .

Quadro 8. Resultados dos ensaios Pull-off sobre provetes de tijolo cerâmico rebocado e camada de FRCC

Nº	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	F_u (kN)	f_u (MPa)	Tipo de fratura
1	44.21	1535.08	1.63	1.06	coesão
2	44.24	1537.16	1.47	0.96	coesão
3	44.19	1533.69	0.50	0.33	coesão
4	44.28	1539.94	2.24	1.45	coesão
5	44.50	1555.28	2.00	1.29	coesão
6	44.45	1551.79	1.18	0.76	coesão
f_{um} (MPa)			1.50	0.97	
Desvio Padrão			0.62	0.40	
Coeficiente de variação (%)			41.20%	41.11%	

No ensaio de pull-off foi evidente a fratura por coesão, através da fratura interna do reboco convencional.

6. ENSAIOS PUSH-OUT

6.1 Amostras e configuração do ensaio

Com o intuito de avaliar o desempenho da técnica de reforço estrutural descrita na secção 1 em paredes de alvenaria de tijolo cerâmico, foi proposta a realização de ensaios de push-out

de modo a permitir a avaliação do comportamento da interface entre o material de reforço estrutural (FRCC) e o material de base (argamassa de reboco). Para tal, foram realizados protótipos de paredes de alvenaria reforçadas com camadas externas de FRCC, sendo aplicados conectores de diferentes tipos, de modo a avaliar o seu contributo no sistema estrutural.

As paredes de alvenaria foram realizadas com métodos construtivos correntes, sendo constituídas por tijolos cerâmicos (11cm, 15cm e 22cm de espessura), revestidas com 1.5cm de argamassa de reboco (traço 1:5) em cada uma das faces, sendo sobre este material aplicada a camada de reforço em FRCC com 2.5cm de espessura. Ao centro da amostra é aplicado um conector que intersecta todas as camadas dos protótipos, com as extremidades ancoradas nas camadas de FRCC. Na Figura 9 é ilustrada a constituição e configuração dos protótipos de parede. Foram ainda realizadas e testadas amostras sem conectores.

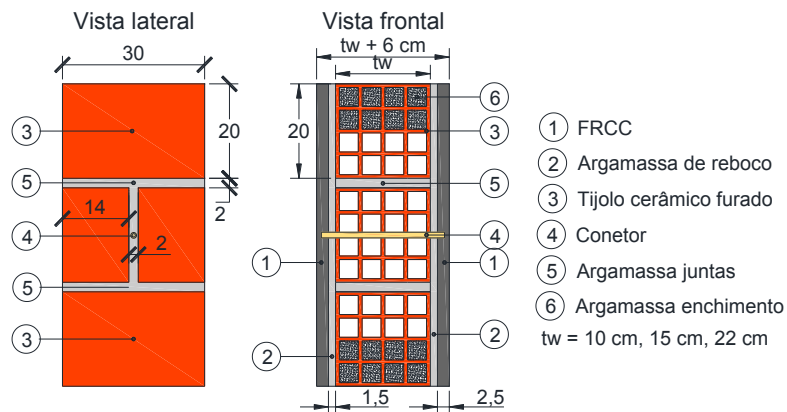


Figura 9. Constituição e configuração das amostras.

Os conectores utilizados são constituídos por diferentes tipos de materiais: varões de aço nervurado ($\varnothing 12$), varões de fibras de vidro – GFRP ($\varnothing 12$) e conector híbrido constituído por filamentos de fibras E-glass (30 filamentos) e resina de poliéster (Figura 10a)). Realça-se que o conector híbrido foi desenvolvido especificamente para este estudo, sendo o seu processo construtivo apresentado em [11].

A ancoragem do conector híbrido na camada de FRCC é melhorada através da inclusão de barras $\varnothing 8\text{mm}$ de GFRP nas extremidades do conector, com um comprimento de embebimento de 60mm (Figura 10a)). Nos restantes conectores as extremidades são retas (Figura 10c)).

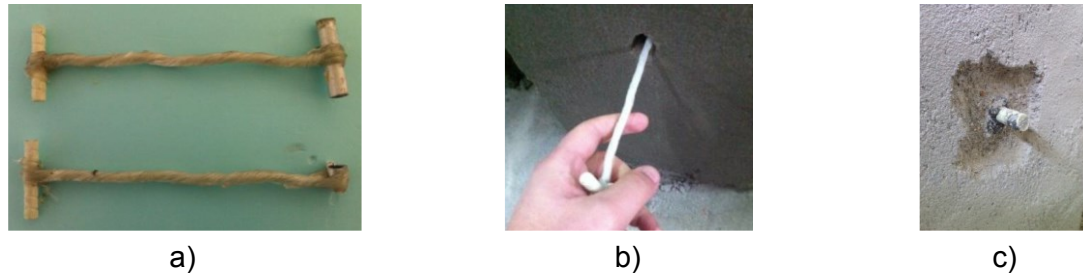


Figura 10. a) Conetor híbrido. b) Introdução do conetor híbrido na parede. c) Pormenor da extremidade do conetor de GFRP.

O ensaio de push-out realizado foi baseado no ensaio de push-out padrão indicado no anexo B do Eurocódigo 4 [12], com as devidas adaptações ao ensaio de paredes de alvenaria de tijolo. O ensaio consiste na aplicação de uma carga axial no núcleo interior constituído pela parede de alvenaria e camadas de argamassa de reboco, que através da resistência ao corte dos conetores e da aderência entre as camadas dos diferentes materiais transmitem os esforços para as camadas exteriores de FRCC, cujo deslocamento é restringido na base.

A configuração do ensaio é apresentada na Figura 11. Tal como é possível verificar, foram utilizadas duas configurações (A e B), cujas diferenças passam pelo modo de aplicação da carga na amostra. A configuração A foi utilizada com sucesso nas amostras sem conetores, contudo com o aumento da ductilidade nas amostras com conetores, verificou-se o esmagamento da argamassa de reboco na zona junto das barras de aplicação de carga utilizadas na configuração A, o que precipitava a conclusão dos ensaios nas amostras com conetores. Deste modo, optou-se por aumentar a área de aplicação de carga de acordo com a configuração B.

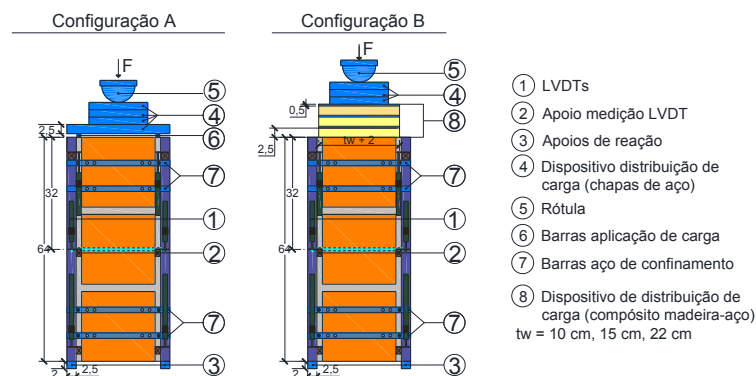


Figura 11. Configuração do ensaio de push-out.

O sistema de aplicação de carga para a realização dos ensaios propostos foi constituído por um grupo hidráulico, um servo-atuador e uma célula de carga com capacidade máxima de 300kN. O ensaio é realizado em controlo de deslocamento do atuador, com uma velocidade de 0.01mm/s.

Durante o ensaio, o deslizamento e a abertura da interface entre as camadas de FRCC e da argamassa de reboco foram monitorizados através de LVDT's. O posicionamento dos LVDT's nos protótipos é indicado na Figura 12a).

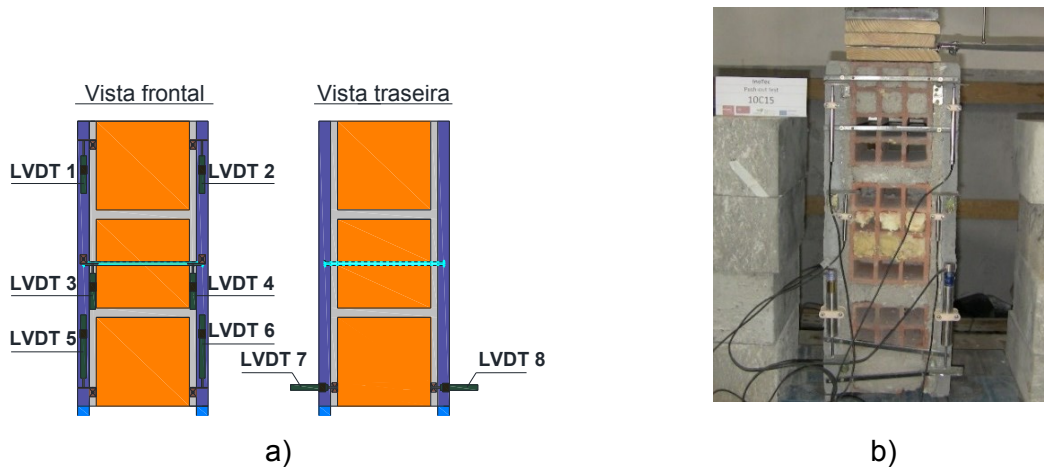


Figura 12. a) Posicionamento dos LVDT's. b) Amostra preparada para ensaio push-out.

6.2 Resultados

De seguida são apresentados os resultados dos ensaios realizados a 40 amostras, das quais 10 com conetores de aço, 8 com conetores de GFRP, 16 com conetores híbridos e 6 sem conetores.

Dos ensaios realizados verificou-se a existência de três tipos de roturas dominantes: Tipo I: rotura na interface entre materiais; Tipo II: rotura dos tijolos. A rotura do tipo I pode ainda ser dividida em duas categorias: Tipo I-A: rotura na interface entre os tijolos e a argamassa de reboco; Tipo I-B: rotura na interface entre a argamassa de reboco e a camada de FRCC. Foi também identificado 1 caso de rotura pelo esmagamento da argamassa de reboco junto às barras de aplicação de carga (configuração de ensaio A).

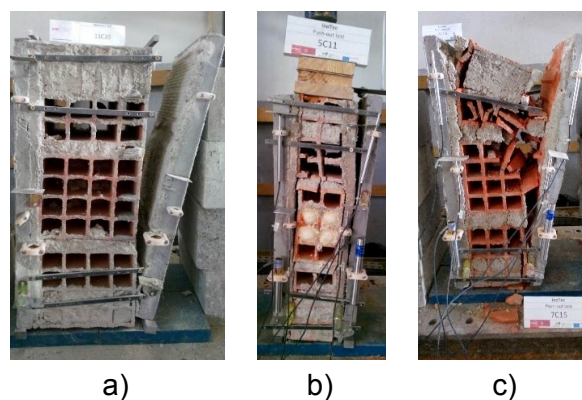


Figura 13. Tipos de rotura identificados: a) Tipo I-A; b) Tipo I-B; c) Tipo II.

No Quadro 9 é apresentado o registo dos tipos de rotura das amostras. Destaca-se que a rara incidência da rotura da interface entre a camada de FRCC e a argamassa de reboco (Tipo I-

B), mesmo nas amostras sem conetores, o que evidencia que a aderência entre o FRCC e a argamassa de reboco é bastante satisfatória.

Quadro 9. Incidência dos tipos de rotura identificados.

Tipo de Rotura	Sem conetores	Conetores Aço	Conetores GFRP	Conetores Híbridos	Total
Tipo I-A	4	7	5	6	22
Tipo I-B	1	0	1	0	2
Tipo II	1	2	2	10	15

No Quadro 10 são apresentados os valores da carga máxima registada durante a realização dos ensaios de push-out. Verifica-se a inexistência de qualquer tendência para a influência da espessura da parede de alvenaria.

Quadro 10. Carga máxima registada durante o ensaio de push-out.

	Sem conetores		Conetores Aço		Conetores GFRP		Conetores Híbridos	
	μ [kN]	C.V.	μ [kN]	C.V.	μ [kN]	C.V.	μ [kN]	C.V.
Tijolo 11cm	60.94	47%	75.16	57%	91.46	30%	73.93	20%
Tijolo 15cm	84.60	-	94.93	21%	72.92	50%	75.91	23%
Tijolo 22cm	83.17	43%	73.57	29%	82.42	25%	61.89	8%

μ – média ; C.V. – coeficiente de variação

Do Quadro 10 pode ainda verificar-se que a dispersão dos resultados é significativa. Tal pode ser explicado pelo sistema estrutural complexo das amostras ensaiadas, bem como pela heterogeneidade dos materiais constituintes.

Na Figura 14 é apresentada uma comparação da carga máxima registada durante o ensaio de push-out das amostras com diferentes tipos de conetores, tendo em conta o tipo de rotura verificado.

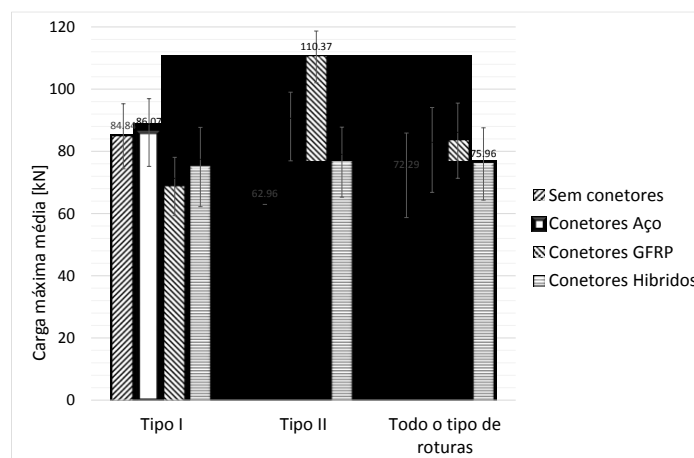


Figura 14. Comparação da carga máxima nos ensaios de push-out vs tipo de rotura.

Da análise da Figura 14 é possível afirmar que, para o conjunto de todos os protótipos, a utilização dos conetores permitiu um ligeiro aumento da carga máxima relativamente aos protótipos sem conetores. Neste contexto, os conetores de GFRP apresentaram a maior eficácia, dado que estes protótipos apresentaram em média uma carga máxima 15% superior aos protótipos sem conetores, enquanto os protótipos com conetores de aço (11%) e os conetores híbridos (5%) apresentaram aumentos mais modestos.

Caso seja considerada na análise o tipo de fratura obtida, para as amostras com fratura nos tijolos (Tipo II) verifica-se uma concordância com a análise global executada, embora o incremento da carga máxima relativamente aos protótipos sem conetores seja muito mais significativo (GFRP=75%, Aço=40% e Híbridos=22%).

Contudo, no caso dos protótipos com rotura pela interface entre os distintos materiais das amostras não se verifica um aumento da carga máxima do ensaio de push-out pela utilização de conetores. Realça-se que seria expectável um aumento da carga máxima, dado o incremento da resistência ao corte proporcionado pelos conetores embebidos na seção do protótipo que deveria ter permitido um aumento da resistência das interfaces entre os materiais.

No Figura 15 é apresentada a comparação da relação entre a força e a deformação axial dos protótipos representativos de cada um dos tipos de conetores utilizados no programa experimental. A deformação axial foi registada através do transdutor de deslocamento interno do atuador. Como é possível observar, a utilização dos conetores permitiu um aumento muito significativo da ductilidade na fase pós-pico da resposta força-deformação. Tendo em conta o nível de dispersão dos resultados obtidos não é possível identificar claramente o tipo de conector que evidencia o maior aumento de ductilidade à solução estrutural, ainda que os protótipos com conetores de aço e GFRP aparentem apresentar uma maior ductilidade na fase pós-pico.

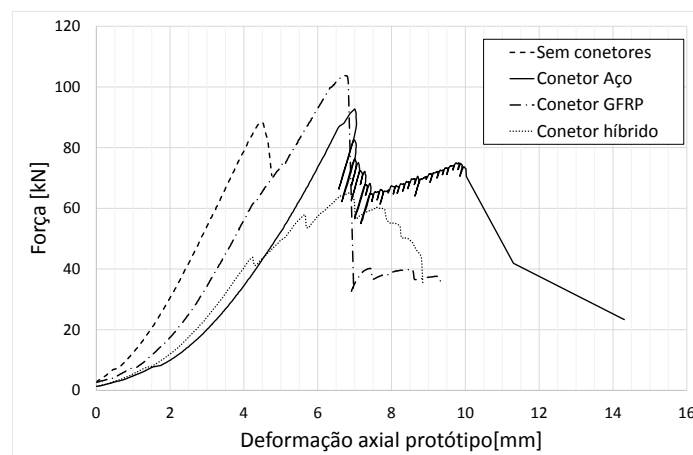


Figura 15. Relação força-deformação axial obtida em ensaios de push-out em protótipos representativos dos diferentes tipos de conetores.

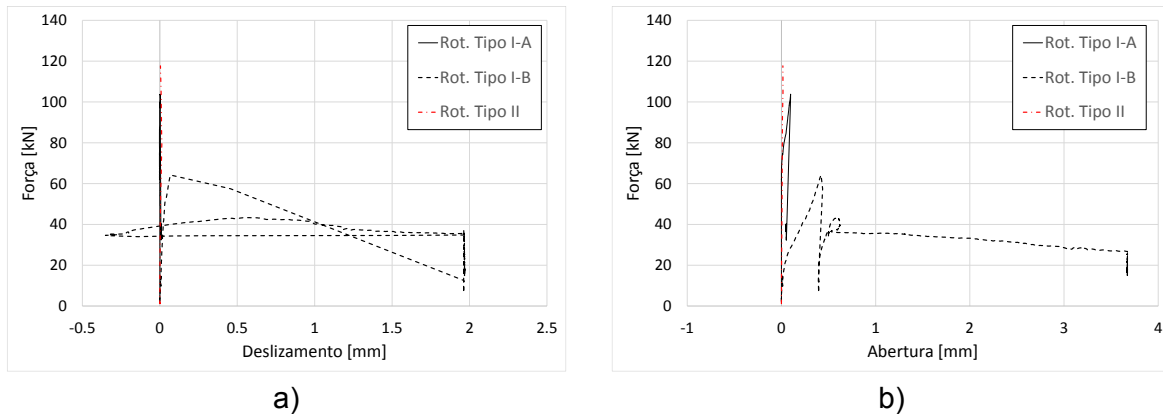


Figura 16. Monitorização do deslocamento relativo entre a interface FRCC e argamassa de reboco a) Deslizamento (LVDT's n.º3/4); b) Abertura (LVDT's n.º7/8).

Relativamente aos resultados da monitorização do deslizamento e abertura entre as camadas de FRCC e da argamassa de reboco, verificou-se que na maioria dos protótipos o deslocamento relativo entre as camadas foi bastante reduzido, nomeadamente nas amostras com roturas do tipo I-A e II. Tal como é possível observar na Figura 16, as amostras com rotura do tipo I-B (rotura na interface FRCC-argamassa de reboco) apresentam um movimento relativo considerável, dado que este tipo de rotura induz exatamente o deslocamento relativo entre as camadas de material que os LVDT's estavam configurados para registar.

7. CONCLUSÕES

Foi realizada a caracterização reológica, mecânica e dos indicadores de durabilidade de uma argamassa de ultra elevada ductilidade, tendo em vista a sua aplicação numa nova técnica de reforço estrutural (FRCC).

Do ponto de vista da trabalhabilidade, verificou-se que a argamassa apresentou uma consistência por espalhamento próxima da consistência da argamassa comercial, no entanto, o teor de ar é mais elevado no FRCC.

Em relação ao comportamento mecânico, verificou-se que a argamassa não possui um módulo de elasticidade e uma resistência à compressão tão elevadas quando comparáveis com a argamassa comercial. No entanto, os ensaios de flexão revelaram que o FRCC desenvolvido tem uma resistência superior a 10 MPa para abertura de fissura de 0.5mm e uma elevada capacidade de absorção de energia até 4 mm de abertura de fissura. Estes resultados refletem que o FRCC tem propriedades elásticas e de resistência não muito superiores aos dos materiais que constituem um substrato de reboco de argamassa aplicado sobre parede de alvenaria cerâmica, pelo que asseguram uma boa ligação entre o material de reforço e reforçado, e introduz elevada ductilidade aos elementos reforçados com FRCC.

Do ponto de vista da durabilidade verificou-se que quanto maior os valores de teor de ar na argamassa fresca, maior é a porosidade aberta e a porosidade capilar. Deste modo, verificou-se uma elevada absorção capilar e uma elevada porosidade aberta na argamassa

comparativamente com a argamassa comercial. Este facto também foi verificado na avaliação da permeabilidade ao ar e à água, uma vez que a argamassa apresentou elevados valores destes parâmetros comparativamente com a argamassa comercial. Na avaliação da retração por secagem verificou-se que a argamassa em estudo e a argamassa comercial apresentam um comportamento semelhante. Através dos ensaios de pull-off, verificou-se que a tensão de aderência da argamassa em estudo/reboco convencional é superior 1 MPa, dado que o modo de rotura foi por fratura pela argamassa do reboco.

Foram realizados ensaios de push-out com protótipos de parede alvenaria cerâmica rebocada, reforçada com camadas de FRCC, tendo utilizado diversos tipos de conetores na ligação destas camadas. De uma forma geral, a utilização de conetores proporcionou um ligeiro aumento de resistência das amostras no ensaio de push-out, tendo no entanto assegurado um aumento muito significativo da ductilidade da resposta destes protótipos. Nestes ensaios ficou ainda confirmado que a aderência entre o FRCC e a argamassa de reboco é bastante satisfatória.

Tendo em conta o aumento de ductilidade e de resistência, os conetores em GFRP e aço apresentaram uma performance ligeiramente superior aos conetores híbridos desenvolvidos para esta aplicação.

AGRADECIMENTOS

A investigação realizada foi efetuada ao abrigo do projeto QREN nº 23024 InoTec - Material inovador de ultra elevada ductilidade para a reabilitação do património construído financiado pela ADI (FEDER - Programa Operacional do Norte). O terceiro autor agradece a bolsa ao abrigo deste projeto e o 1º autor agradece a bolsa FCT doutoramento em empresa nº. SFRH/BDE/93035/2013. À Owens Corning pelo fornecimento das fibras de vidro, à Exporplas pelas fibras de polipropileno, à Sika pelo superplastificante, à Secil pelo cimento e à CHRYSO pelo VMA.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Frazão, J. Barros, D. Gonçalves, M. Mastali, E. Esmaeeli (2014) – *Caracterização experimental das propriedades de durabilidade de argamassas de base cimentícia reforçadas com fibras sintéticas*", Relatório 14-DEC/E-24, ISISE - Publicações Pedagógicas;
- [2] EN 1015-3 (1999) – *Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of dry bulk density of hardened mortar*, norma europeia aprovada por CEN;
- [3] EN 1015-7 (1998) – *Methods of test for mortar for masonry – Part 7: Determination of air content of fresh mortar*, norma europeia aprovada por CEN;
- [4] EN 1015-6 (1998) – *Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*, norma europeia aprovada por CEN;

- [5] NP EN 12390-13 (2012) – *Testing hardened concrete – Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression*, Technical Committee CEN/TC 104;
- [6] NP EN 12390-3 (2011) – *Ensaio do betão endurecido, Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*, IPQ, Lisboa, pp. 21;
- [7] EN 1015-11 (1999) – *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, norma europeia aprovada por CEN;
- [8] *CEB FIB Model Code* (2010) – V.1, pp. 350;
- [9] RILEM TC 50-FMC (1985) – *Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of threepoint bend tests on notched beams*, *Materials and Structures*, 18(106), pp. 285-290;
- [10] EN 1015-18 (2002) - *Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, norma europeia aprovada por CEN;
- [11] ASTM C490-07 – *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*, ASTM International;
- [12] EN 1015-12 (2000) – *Methods of test for mortar for masonry – Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*, norma europeia aprovada por CEN;
- [13] D. Colarusso (2014) – *The Potentialities of ductile fiber reinforced mortar and ETS connectors for strengthening of masonry walls*, Università degli Stud del Sannio, Itália;
- [14] EN 1994-1-1 (2004) – *Design of composite steel and concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings*, norma europeia aprovada por CEN.