

Efeito da temperatura elevada na aderência entre betão e varões de GFRP com acabamento em areia – Ensaios de arrancamento e determinação de leis bond-slip

Inês C. Rosa¹ João P. Firmo² João R. Correia³ Joaquim A. Barros⁴

RESUMO

O uso de varões de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) como armaduras de estruturas (novas ou requerendo reforço estrutural) de betão armado tem vindo a crescer, dadas as várias vantagens que estes varões apresentam comparativamente aos varões de aço, nomeadamente o baixo peso próprio e sua não suscetibilidade à corrosão. Contudo, a temperaturas moderadamente elevadas, especialmente na proximidade da temperatura de transição vítrea (T_g) da matriz polimérica (geralmente entre 65-150 °C), a resistência, a rigidez e as propriedades de aderência destes varões podem ser nefastamente afetadas. A primeira parte deste artigo apresenta um estudo experimental focado na aderência entre betão e varões com acabamento de areia expostos a temperaturas moderadamente elevadas. Ensaios de arrancamento foram realizados em varões de GFRP embebidos em cilindros de betão a 20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C, 100 °C e 140 °C. Dois comprimentos aderentes foram considerados, correspondendo a 5 e 9 vezes o seu diâmetro. Os provetes foram primeiramente aquecidos até uma temperatura objectivo (medida na interface betão-GFRP) e depois traccionados até à rotura. A carga aplicada e o deslizamento dos varões nas extremidades livre e carregada foram medidos durante o ensaio. Os resultados obtidos confirmaram que a rigidez e a resistência na interface betão-GFRP são significativamente reduzidas com a temperatura, especialmente na proximidade e após a T_g dos varões. Na segunda parte do artigo, relações bond-slip para a interface betão-GFRP são propostas para cada uma das temperaturas testadas. Estas relações foram obtidas através de uma metodologia numérica na qual os dados experimentais provenientes dos ensaios de arrancamento foram utilizados para calibrar os parâmetros das leis bond-slip locais.

Palavras-chave: varões de GFRP com acabamento em areia; aderência betão-GFRP; temperatura elevada; ensaios de arrancamento.

1. INTRODUÇÃO

Os varões de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) têm vindo a emergir como uma alternativa aos varões correntes de aço, especialmente em ambientes onde a durabilidade das construções pode ser comprometida devido a fenómenos de corrosão. Os varões de GFRP apresentam outras vantagens, tais como a leveza, a elevada resistência à tracção e a transparência electromagnética, tornando-os indicados para aplicações em construção nova e na reabilitação de estruturas de betão armado degradadas (por exemplo, como substituição de varões de aço corroídos).

¹CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. ines.rosa@tecnico.ulisboa.pt

²CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. joao.firmo@tecnico.ulisboa.pt

³CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt

⁴ISISE, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt

Apesar do seu potencial, existem sérias preocupações acerca do comportamento dos varões de GFRP a temperatura elevada e em contexto de incêndio, dado que as suas propriedades mecânicas (nomeadamente a resistência à tracção e o módulo de elasticidade) sofrem reduções significativas, especialmente na aproximação à transição vítrea (T_g) da matriz polimérica (geralmente entre os 65 e os 150 °C). Apesar da sua relevância, o desempenho em contexto de incêndio de materiais GFRP e especialmente de estruturas de betão armadas com varões de GFRP ainda não está devidamente compreendido na literatura, o que explica, em parte, o motivo pelo qual a grande maioria dos regulamentos existentes não recomenda a utilização de varões de GFRP em estruturas onde a acção do fogo tem de ser considerada no dimensionamento (*i.e.*, em edifícios).

Para além disso, é sabido que a temperatura elevada tem um papel importante na deterioração da aderência dos varões de GFRP ao betão [1]. Esta questão é particularmente preocupante, mesmo para temperaturas moderadamente elevadas, visto que vários autores (*e.g.*, [2]) têm vindo a reportar colapsos prematuros de lajes armadas com varões de GFRP expostas ao fogo, devido ao deslizamento dos varões nas zonas de emenda. Apesar da sua relevância, poucos estudos foram desenvolvidos em relação a este tópico e, neste sentido, investigações mais aprofundadas são necessárias para compreender os mecanismos de degradação que ocorrem na interface GFRP-betão e a sua influência no desempenho estrutural de estruturas de betão armadas com varões de GFRP expostas a temperatura elevada e ao fogo. Para além disso, estudos adicionais são necessários para avaliar a dependência da temperatura de um conjunto de parâmetros, expectáveis de afectar as propriedades de aderência dos varões a temperatura elevada, nomeadamente: o acabamento superficial do varão, o seu diâmetro, a sua geometria e o comprimento aderente ao betão. Por último, não existem presentemente na literatura modelos que descrevam a relação constitutiva GFRP-betão em função da temperatura; por este motivo, a aderência é frequentemente assumida como perfeita em modelos numéricos, conduzindo a previsões pouco precisas do comportamento estrutural dos elementos de betão armados com varões de FRP.

Este artigo apresenta um estudo experimental acerca dos efeitos de temperaturas moderadamente elevadas na aderência entre varões de GFRP e betão. Neste sentido, ensaios de arrancamento foram realizados em varões de GFRP com acabamento em areia, embebidos em cilindros de betão, desde a temperatura ambiente (20 °C) até aos 140 °C. A influência de dois comprimentos aderentes (5 e 9 vezes o diâmetro do varão) nas propriedades de aderência a temperatura elevada foi investigada. Na parte final do artigo são propostas, para cada uma das temperaturas testadas, relações bond-slip para a interface GFRP-betão; estas relações foram obtidas através de uma metodologia numérica na qual os resultados experimentalmente obtidos foram utilizados para calibrar os parâmetros das leis bond-slip locais.

2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Programa de ensaio

O programa experimental consistiu em ensaios de arrancamento (*pull-out*) realizados em varões de GFRP com acabamento em areia embebidos em cilindros de betão, às seguintes temperaturas: 20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C, 100 °C e 140 °C. Duas séries de ensaios de arrancamento foram realizadas, correspondendo a dois comprimentos aderentes (L_b) dos varões de GFRP ao betão: 5 e 9 vezes o diâmetro (d_b) dos varões – 50 e 90 mm, respectivamente.

2.2 Materiais

No presente estudo foram utilizados varões de GFRP (matriz de viniléster) com acabamento superficial em areia e fibras externas enroladas em forma de helicóide (Fig. 1). Os varões possuíam 10 mm em diâmetro e foram fornecidos pela empresa *Hughes Brothers* (modelo *Aslan 100*). Análises dinâmicas mecânicas (DMA) foram realizadas aos varões, conforme definido na norma ASTM E1640 [3], permitindo determinar 98 °C para a T_g com base na temperatura *onset* da curva do módulo de armazenamento. Ensaios de tracção foram realizados previamente pelos autores aos referidos varões, desde a temperatura ambiente (20 °C) até aos 300 °C. Os resultados (*cf.*, Fig. 2a) mostraram que a

resistência à tracção reduziu significativamente quando a T_g dos varões foi excedida, apresentando reduções médias de 40% e 43%, a 150 °C e 300 °C, respectivamente, quando comparando com o valor de resistência à temperatura ambiente. O módulo de elasticidade foi significativamente menos afectado a 300 °C, exibindo uma redução média de 13% relativamente ao valor obtido a temperatura ambiente.

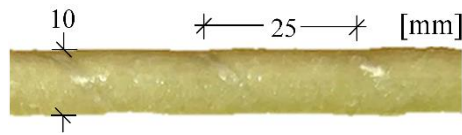


Figura 1. Varão de GFRP com acabamento em areia.

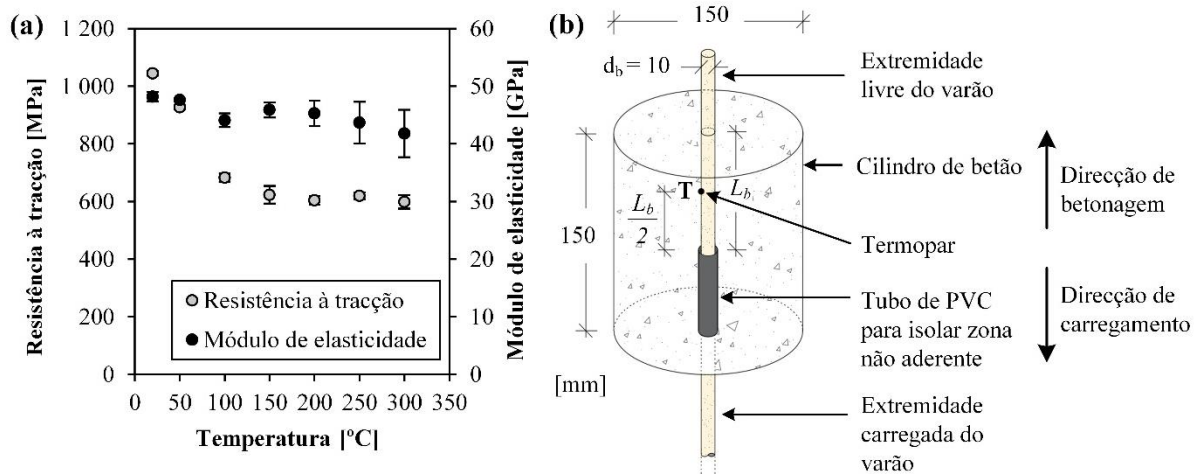


Figura 2. a) Propriedades em tracção dos varões de GFRP em função da temperatura; b) Geometria dos provetes de arrancamento e localização do termopar.

Os provetes para os ensaios de arrancamento foram produzidos utilizando um betão de classe C25/30 com cimento tipo CEM II/A-L 42.5R e agregados calcários. As propriedades em compressão e tracção do betão foram determinadas à idade dos ensaios de arrancamento (111 dias). Durante esse período, os provetes de arrancamento, assim como os cubos e cilindros utilizados para caracterizar as propriedades do betão, foram curados nas instalações do laboratório a temperatura ambiente e humidade relativa (interior, mas não controlado). Os valores de resistência à compressão e tracção do betão obtidos foram de 43.3 MPa e 3.1 MPa, respectivamente.

2.3 Descrição dos provetes, instrumentação e procedimento de ensaio

Os provetes consistiram em cilindros de betão (150 mm em altura e diâmetro) com um varão de GFRP embebido verticalmente ao longo do eixo central do cilindro (*cf.* Fig 2b). O comprimento não aderente do varão foi assegurado utilizando um tubo de PVC, conforme ilustrado na Fig. 2b. Na extremidade livre (superior), o varão encontrava-se exterior ao cilindro de betão, permitindo a leitura do deslizamento entre essa extremidade do varão e a face superior do cilindro (através de um vídeo extensómetro, conforme detalhado na secção seguinte). A extremidade carregada (inferior) do varão foi protegida utilizando um tubo de aço inoxidável (diâmetro de 22 mm, 0.7 mm de espessura, *cf.* Fig. 3a) por forma a evitar roturas prematuras na zona de aperto da amarra da máquina universal de ensaio.

O esquema de ensaio utilizado encontra-se ilustrado na Fig. 3. Os provetes de betão foram posicionados numa estrutura de reacção composta por duas chapas de aço, conectadas por varões roscados de aço. A estrutura foi instalada no interior de uma câmara térmica *Tinius Olsen* (Fig. 3b) e acoplada a uma máquina universal de ensaios *Instron* (máxima capacidade de carga de 250 kN). A temperatura dos provetes foi medida na interface varão de GFRP-betão (a meia altura do comprimento aderente, conforme ilustrado na Fig. 2b) através de termopares do tipo K (diâmetro externo de 1 mm). Um termopar adicional foi utilizado

para controlar a temperatura no interior da câmara térmica. O deslizamento do varão foi medido nas extremidades livre e carregada do mesmo através de um vídeo extensómetro (Fig. 3c); o equipamento consistiu numa câmara de vídeo de alta definição (*Sony*, modelo *XCG 5005E*, lente *Fujinon* – modelo *Fujifilm HF50SA 1*), posicionada num tripé. Tal como a Fig. 3a ilustra, foram marcados alvos na superfície do varão de GFRP (em ambas as extremidades) e em cantoneiras metálicas (fixas na face superior do cilindro de betão e na chapa metálica inferior, respectivamente), permitindo medir o deslocamento relativo (*i.e.*, o deslizamento) entre o varão e o betão nas pontas livre e carregada.

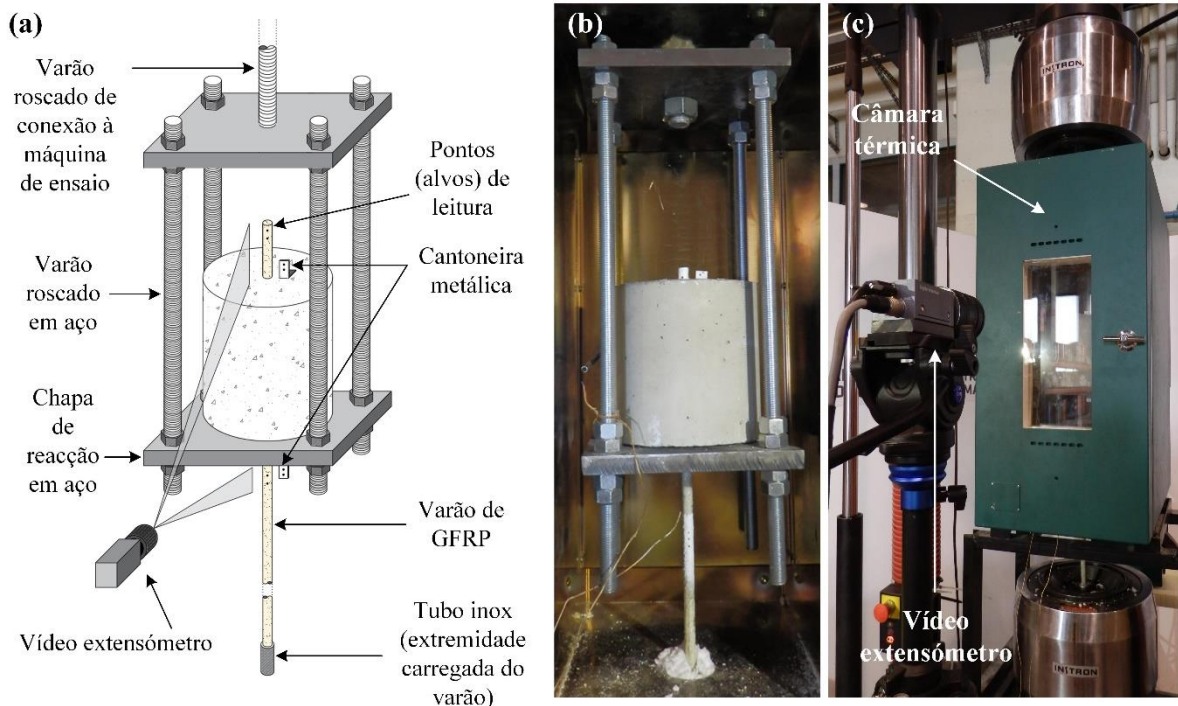


Figura 3. a) Esquema de ensaios de arrancamento; b) vista do provete no interior da câmara térmica; c) vista exterior da câmara térmica e do vídeo extensómetro.

O procedimento de ensaio consistiu em duas fases distintas; na primeira fase, os provetes foram aquecidos até uma determinada temperatura objectivo, a uma taxa média de aquecimento do ar no interior da câmara térmica de $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. A segunda fase, durante a qual a temperatura dos provetes foi mantida constante na temperatura objectivo, consistiu em traccionar o varão de GFRP até à rotura; o carregamento foi aplicado sob controlo de deslocamentos, a uma velocidade aproximada de $1\text{ mm}/\text{min}$ (valor definido de acordo com os limites estabelecidos na norma ASTM D7913 [4]). Durante esta fase, a carga aplicada, o deslocamento da máquina de ensaio e a posição dos alvos foi monitorizada. Os ensaios foram realizados até os alvos deixarem de ser rastreáveis (devido à altura limitada da janela da câmara térmica). Para cada temperatura e comprimento aderente, pelo menos três provetes foram testados.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

3.1 Curvas tensão de aderência média-deslizamento

Apresentam-se na Fig. 4 as curvas tensão de aderência média-deslizamento, na extremidade carregada (Fig. 4a) e na extremidade livre (Fig. 4b) do varão (curvas médias). Para simplificar a análise, as curvas encontram-se representadas apenas até aos 20 mm. A Fig. 4a mostra que independentemente do comprimento aderente, as curvas apresentam um comportamento aproximadamente linear até ao valor máximo da tensão de aderência média ser atingida, ao qual se seguiu uma queda da tensão (com excepção dos provetes testados a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, onde esta queda não ocorreu); esta queda foi seguida de uma redução progressiva da tensão, apresentando uma espécie de patamar para valores de deslizamento

elevados. Esta fase final das curvas estendeu-se até os ensaios serem interrompidos, o que ocorreu antes do deslizamento completo dos varões (devido à perda dos alvos de leitura, conforme referido na secção 2.3). Os provetes testados a 100 °C apresentaram um comportamento pós-pico distinto comparativamente com os restantes provetes: (i) após o valor máximo da tensão de aderência média ter sido atingido, os valores de tensão apresentaram uma redução muito mais suave, e (ii) o valor máximo da tensão de aderência média foi atingida para valores consideravelmente maiores de deslizamento do varão em relação ao cilindro de betão. Uma possível explicação para esta diferença poderá estar relacionada com o facto desta temperatura corresponder virtualmente à T_g dos varões (98 °C), para a qual se sabe ser máxima a viscosidade do material.

As curvas ilustradas na Fig. 4a mostram ainda que: (i) para uma determinada temperatura, conforme esperado, os provetes com maior comprimento aderente ao betão (série $9d_b$) atingiram valores de tensão de aderência média inferiores, e (ii) os valores máximos da tensão de aderência média foram progressivamente reduzidos com o aumento da temperatura de ensaio. O efeito da temperatura elevada foi também notório na redução da rigidez na interface GFRP-betão (correspondente ao declive do troço inicial linear); este resultado era também esperado, visto que a rigidez e a resistência dos materiais constituintes, e especialmente da interface GFRP-betão, diminuem com o aumento da temperatura.

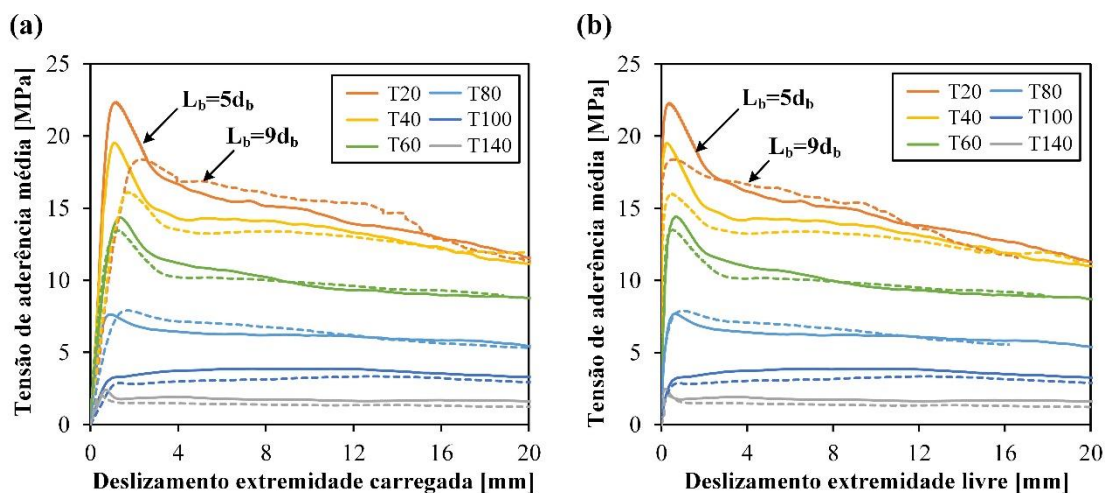


Figura 4. Curvas tensão de aderência média-deslizamento na extremidade a) carregada e b) livre do varão, para todas as temperaturas (curvas médias).

A Fig. 4b mostra que, em geral, as curvas tensão de aderência média-deslizamento na extremidade livre exibiram um comportamento similar ao apresentado na Fig. 4a (relativo à extremidade carregada). Contudo, conforme esperado, para os provetes testados a temperaturas mais reduzidas (*i.e.* 20 e 40 °C), o troço inicial da curva é praticamente vertical (*i.e.*, o deslizamento na extremidade livre é praticamente nulo); conforme o aumento da temperatura de ensaio, o declive inicial das curvas decresceu, devido sobretudo à degradação da interface varão-betão.

3.2 Modos de rotura

Para todas as temperaturas testadas a rotura dos provetes ocorreu devido ao deslizamento dos varões de GFRP ao longo do comprimento aderente ao betão. Os resultados experimentais (descritos na secção anterior) e as observações visuais dos provetes durante os ensaios (Figs 5a e b) validaram o referido modo de rotura.

Após os ensaios, os cilindros foram cortados a meio para apoio à inspeção do modo de rotura e avaliar o dano sofrido pelos materiais e pela interface GFRP-betão. Como se mostra na Fig. 5c, a camada superficial dos varões nos provetes testados a temperaturas elevadas foi significativamente desgastada; em particular, as fibras enroladas foram arrancadas e a camada superficial de areia foi removida;

resíduos de resina esmagada e fibras de vidro rompidas encontravam-se agarradas ao betão ao longo do comprimento aderente. Não foi observado qualquer dano no núcleo do varão. Contudo, em alguns provetes testados a temperatura ambiente (Fig. 5d) a abrasão sofrida pelo varão foi mais severa: a camada superficial de areia e as fibras enroladas foram completamente removidas, expondo o núcleo do varão, e uma quantidade significativa de fibras longitudinais encontravam-se rompidas e arrancadas do núcleo.

As inspeções visuais mostraram ainda que a aderência entre este varão de areia e o betão, a temperatura ambiente e a temperatura elevada, foi influenciada pela adesão (e fricção) entre o acabamento superficial (camada de areia e fibras enroladas) e o núcleo do varão, tendo-se observado, para além do deslizamento entre o varão e o cilindro de betão, também o deslizamento entre a camada superficial do varão e o seu núcleo.

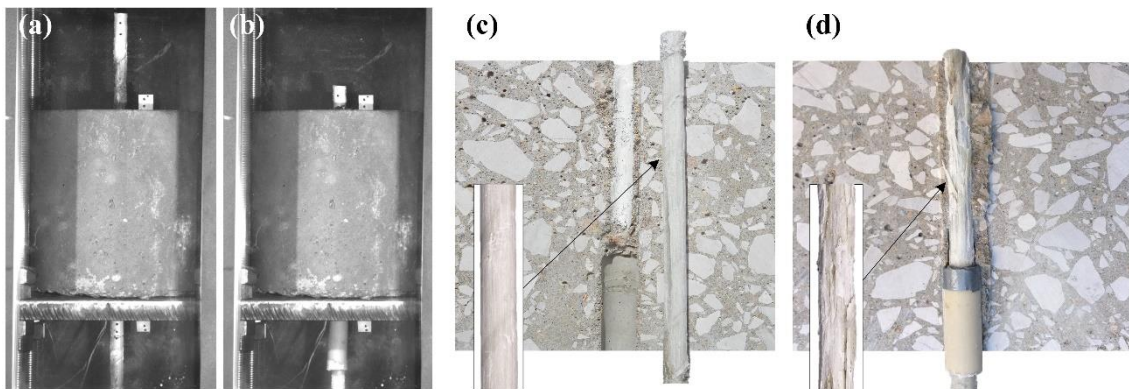


Figura 5. Deslizamento do varão (extremidade livre) no a) início e b) fim do ensaio; provetes de betão-GFRP testados a c) temperatura elevada e d) temperatura ambiente.

Uma possível explicação para o patamar descrito nas curvas tensão de aderência-deslizamento ilustradas na Fig. 4 estará possivelmente relacionada com a entrada do comprimento livre do varão no cilindro de betão. Quando em contacto com a superfície de betão, esta secção não danificada do varão providencia um aumento na fricção GFRP-betão, comparada com aquela dada pelo comprimento danificado (e inicialmente embebido) do varão, dando uma contribuição adicional para a resistência contra o deslizamento.

3.3 Resistência na aderência

A Fig. 6 apresenta a variação dos valores normalizados da resistência de aderência média, assim como das propriedades em tracção (resistência e módulo de elasticidade) e do módulo de armazenamento (obtido nos ensaios DMA) aos varões. Esta figura mostra que a resistência na aderência foi significativamente reduzida com a temperatura, mesmo para temperaturas muito abaixo da temperatura de transição vítrea dos varões de GFRP (98 °C). Conforme se mostra no Quadro 1, para uma temperatura tão baixa como 60 °C (que pode ser atingida em aplicações no exterior), os valores de resistência na aderência foram cerca de 60-70% dos obtidos a temperatura ambiente (20 °C), enquanto que para 100 °C e 140 °C, os valores foram apenas de 20% e 10%, respectivamente. Além disso, os resultados realçaram que: (i) a resistência na aderência exibiu uma redução similar com a temperatura para as duas séries de ensaios (*i.e.*, para os dois comprimentos aderentes); (ii) a redução da resistência na aderência ocorreu para temperaturas muito inferiores das registadas para a degradação mecânica ao nível do material (conforme medido nos ensaios de tracção e nos ensaios DMA).

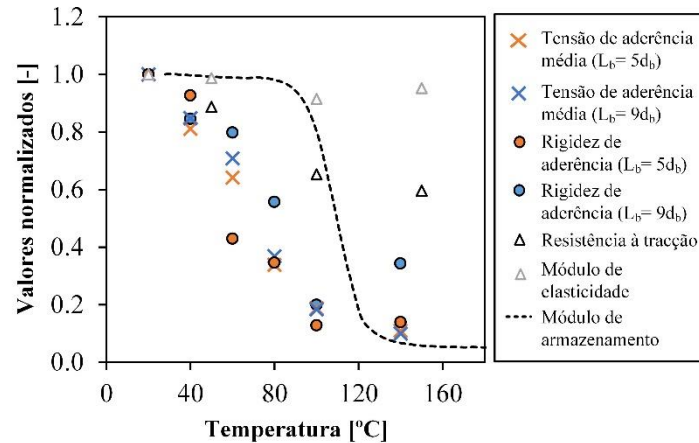


Figura 6. Valores normalizados da resistência e rigidez de aderência, resistência à tracção, módulo de elasticidade e módulo de armazenamento dos varões de GFRP, em função da temperatura.

Quadro 1. Resultados obtidos em termos de força máxima, resistência de aderência média e resistência de aderência normalizada (média ± desvio padrão).

Temperatura [°C]	Comprimento aderente ao betão = 5.d _b			Comprimento aderente ao betão = 9.d _b		
	Força máxima [kN]	Resistência de aderência média [MPa]	Resistência de aderência normalizada [-]	Força máxima [kN]	Resistência de aderência média [MPa]	Resistência de aderência normalizada [-]
20 ± 2	35.9 ± 3.4	22.8 ± 2.2	1.00 ± 0.09	54.6 ± 3.1	19.3 ± 1.1	1.00 ± 0.06
40 ± 2	29.4 ± 2.0	18.7 ± 1.3	0.82 ± 0.06	46.5 ± 2.0	16.4 ± 0.7	0.85 ± 0.04
60 ± 2	23.3 ± 1.3	14.8 ± 0.8	0.65 ± 0.04	38.8 ± 5.5	13.7 ± 2.0	0.71 ± 0.10
80 ± 2	12.3 ± 1.0	7.8 ± 0.6	0.34 ± 0.03	20.1 ± 3.2	7.1 ± 1.1	0.37 ± 0.06
100 ± 2	6.8 ± 1.3	4.3 ± 0.8	0.19 ± 0.04	10.1 ± 2.7	3.6 ± 1.0	0.18 ± 0.05
140 ± 2	4.0 ± 0.3	2.5 ± 0.2	0.11 ± 0.01	5.5 ± 0.4	1.9 ± 0.2	0.10 ± 0.01

4. CALIBRAÇÃO DE LEIS BOND-SLIP EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

A aderência entre varões e betão é geralmente descrita através de modelos que reproduzem a relação entre a tensão de aderência e o deslizamento do varão no betão (*i.e.*, modelos bond-slip). Conforme referido na secção 1, presentemente ainda não existem na literatura modelos bond-slip que descrevam a relação constitutiva de aderência de varões de GFRP ao betão em função da temperatura. Na presente secção propõem-se leis bond-slip para os varões com acabamento de areia testados no estudo experimental, desde os 20 °C até aos 140 °C (temperaturas de ensaio) e para um comprimento aderente ao betão de 5 vezes o diâmetro do varão. Para o efeito foi adoptada uma metodologia numérica desenvolvida por Sena-Cruz e Barros [5], a qual permitiu considerar a distribuição não uniforme de tensões ao longo do comprimento aderente do varão; esta metodologia utiliza os resultados experimentais (em termos de força e deslizamento) para calibrar um conjunto de parâmetros que definem as leis bond-slip analíticas.

A expressão analítica considerada para a relação local de tensão de aderência-deslizamento foi proposta por Sena-Cruz [6], sendo definida pelas Eqs (1a) e (1b):

$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_m \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha & \text{se } s \leq s_m \\ \tau_m \frac{1}{1 + \left(\frac{s - s_m}{s_1}\right)^{\alpha'}} & \text{se } s > s_m \end{cases} \quad (1a)$$

$$(1b)$$

em que s é o deslizamento do varão, $\tau(s)$ é a tensão de aderência para um dado valor de deslizamento, τ_m e s_m são a tensão máxima de aderência e o valor de deslizamento correspondente, e α , α' and s_1 são os parâmetros que definem a forma das curvas tensão de aderência-deslizamento. A Eq. (1a) define o valor de $\tau(s)$ para a fase pré-pico, seguindo o modelo proposto por Eligehausen *et al.* [7], enquanto que a Eq. (1b) simula a fase pós-pico, seguindo a abordagem de Stang and Aarre [8].

Conforme referido na secção 3.2, a aderência deste tipo de varão ao betão foi influenciada pelo deslizamento relativo entre o acabamento superficial do varão (em areia) e o seu núcleo (algo que não se verifica para varões nervurados); isto resulta que a deformabilidade do núcleo do varão e da camada superficial de areia e resina seja diferente. Por este motivo foi necessário calibrar, para cada temperatura, um módulo de elasticidade aparente (como uma percentagem do módulo de elasticidade obtido experimentalmente nos ensaios de tracção, descritos na secção 2.2). Esta abordagem levou a uma maior precisão da rigidez das curvas analíticas de força-deslizamento por comparação com as curvas experimentais (conforme exemplificado na Fig. 7 para a extremidade carregada do varão).

Os valores do módulo de elasticidade aparente e dos valores calibrados dos parâmetros das Eqs (1a) e (1b), para as diferentes temperaturas, encontram-se listados no Quadro 2. Refira-se que os parâmetros foram obtidos através da minimização das diferenças relativas (área) entre as curvas força-deslizamento experimentais e analíticas (obtidas para as extremidades livre e carregada do varão), assegurando também valores similares da força máxima e do deslizamento correspondente. Ilustram-se na Fig. 8 as leis constitutivas de aderência entre os varões de GFRP e o betão obtidas para as diferentes temperaturas testadas.

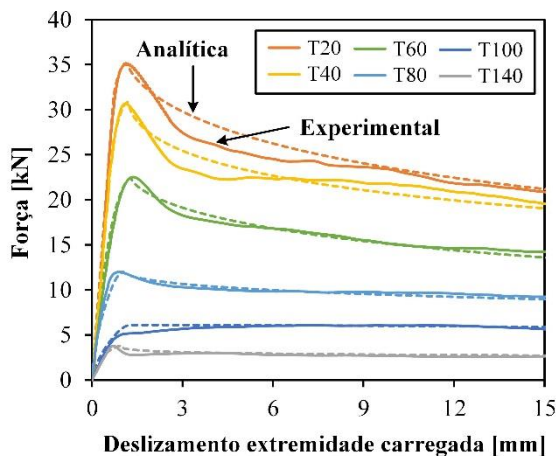


Figura 7. Comparação entre as curvas força-deslizamento na extremidade carregada: curva experimental (linha contínua) e analítica (curva tracejada).

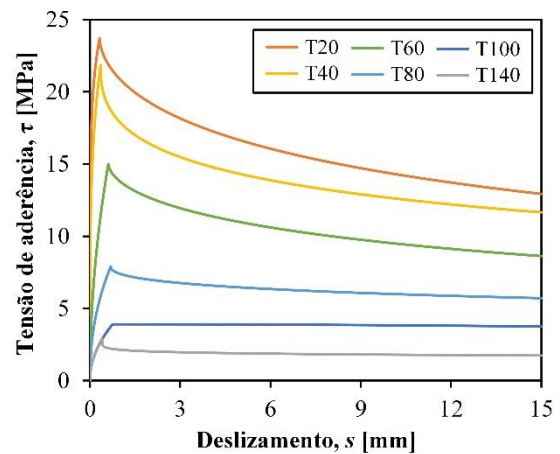


Figura 8. Relação local de tensão de aderência vs. deslizamento calibrada para diferentes temperaturas.

Quadro 2. Parâmetros que definem a relação local de tensão de aderência-deslizamento em função da temperatura.

Série	T [°C]	Módulo de elasticidade calibrado [GPa]	s _m [mm]	τ _m [MPa]	α [-]	α' [-]	s ₁ [-]	Diferença relativa ¹ [-]	
								Deslizamento livre	Deslizamento carregada
T20_5db	20	14.5 (30% E _{exp})	0.32	23.70	0.15	0.59	20	4.2%	4.8%
T40_5db	40	12.0 (25% E _{exp})	0.35	21.80	0.25	0.44	20	3.8%	4.5%
T60_5db	60	11.7 (25% E _{exp})	0.61	15.00	0.50	0.59	24	2.1%	2.5%
T80_5db	80	11.0 (24% E _{exp})	0.69	7.90	0.45	0.45	120	2.5%	2.7%
T100_5db	100	4.4 (10% E _{exp})	0.75	3.90	0.50	2.00	70	3.9%	3.7%
T140_5db	140	2.2 (10% E _{exp})	0.40	2.91	0.50	0.20	110	6.4%	6.6%

¹Diferença relativa de percentagem, em valor absoluto, entre as áreas sob as curvas força-deslizamento experimentais e analíticas (deslizamento medido nas extremidades livre e carregada do varão).

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um estudo experimental acerca do comportamento de aderência entre betão e varões de GFRP (com acabamento de areia e fibras helicoidais enroladas) desde a temperatura ambiente (20 °C) até aos 140 °C. Uma estratégia numérica foi implementada para determinação da influência da temperatura na lei local de aderência. Dos resultados obtidos, as seguintes principais conclusões foram obtidas:

- Conforme esperado, a resistência e rigidez na interface GFRP-betão são significativamente afectadas com o aumento da temperatura de exposição. A resistência de aderência média é severamente reduzida, mesmo para temperaturas abaixo da temperatura de transição vítrea dos varões de GFRP (98 °C), apresentando valores residuais de cerca de 60-70% e de apenas 10% a 60 °C e 140 °C, respectivamente, comparando com a resistência de aderência média à temperatura ambiente;
- Para os materiais, esquema e procedimento de ensaio utilizados neste programa experimental e para a gama de temperaturas testadas, a redução da resistência na aderência foi similar para os dois comprimentos aderentes testados (5 e 9 vezes o diâmetro dos varões);
- Observações visuais dos provetes após os ensaios permitiram concluir que o dano sofrido pelos varões de GFRP foi limitado praticamente à sua superfície, com a camada superficial de areia a ser completamente removida do núcleo do varão; estas observações mostraram que a aderência entre os varões de GFRP com acabamento de areia e o betão, quer a temperatura ambiente quer a temperatura elevada, é influenciada pela adesão (e fricção) entre o acabamento superficial e o núcleo do varão;
- relações bond-slip locais foram calibradas para diferentes temperaturas e permitiram reproduzir com significativa precisão os resultados experimentais em termos da resposta carga-deslizamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação para a Ciência e Tecnologia – FCT (projecto PTDC/ECM-EST/1882/2014) e aos CERIS pelo financiamento desta investigação, à Secil/Unibetão pelo fornecimento de betão e à *Hughes Brothers* pelo fornecimento dos varões de GFRP. O primeiro e segundo autores também gostariam de agradecer o financiamento da FCT através das bolsas SFRH/BD/129681/2017 e SFRH/BDP/108319/2015, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Katz, N. Berman, L.C. Bank (1999). “Effect of high temperature on bond strength of FRP rebars”, *Journal of Composites for Construction*, 3 (4), 153–160.
- [2] A. Abbasi, P.J. Hogg (2006). “Fire testing of concrete beams with fibre reinforced plastic rebar”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37 (8), 1142–1150.
- [3] ASTM E1640 (1999), “Standard test method for assignment of the glass transition temperature by dynamic mechanical analysis”, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, USA.
- [4] ASTM D7913/D7913M (2014). “Standard test method for bond strength of fiber-reinforced polymer matrix composite bars to concrete by pullout testing”, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, USA.
- [5] Sena-Cruz J. and Barros J., “Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete”, *Computers and Structures*, 82 (17–19), 1513–1521, 2004.
- [6] Sena-Cruz J.M., “Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips,” *PhD thesis in Civil Engineering*, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2005.
- [7] Eligehausen R., Popov E.P. and Bertero V. V., “Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: experimental results and analytical model,” Report No. UCB/EERC-8, Earthquake Engineering Research Center, California, USA, 1982.
- [8] Stang H. and Aarre T., “Evaluation of crack width in FRC with conventional reinforcement”, *Cement and Concrete Composites*, 14 (2), 143–154, 1992.