

Aderência de varões de GFRP retos e dobrados ao betão a temperatura elevada: ensaios de arrancamento e modelação numérica

Bond of straight and bent GFRP rebars to concrete at elevated temperature: *pull-out* tests and numerical modelling

Inês C. Rosa
Mário R. T. Arruda
João P. Firmo
João R. Correia

Resumo

Este artigo apresenta um estudo experimental e numérico sobre a influência da geometria da ancoragem (reta ou dobrada a 90°) na aderência de varões de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) ao betão a temperatura elevada. Os resultados experimentais mostraram que a utilização de varões dobrados é uma solução eficaz para melhorar a capacidade de ancoragem dos varões a temperatura elevada. Os estudos numéricos paramétricos permitiram concluir que, para mobilizar a resistência à tração dos varões a temperaturas elevadas, os comprimentos de amarração dos varões (retos ou dobrados) dimensionados para temperatura ambiente devem ser consideravelmente aumentados devido à degradação severa da aderência, sobretudo quando a temperatura se aproxima e excede a temperatura de transição vítrea dos varões. Com base nos estudos paramétricos, foram propostos comprimentos de amarração, em função da temperatura, para varões de GFRP retos e dobrados a 90° para aplicações em vigas e lajes de betão armado.

Abstract

This paper presents experimental and numerical studies about the influence of the anchorage geometry (straight or 90° bent) on the bond between glass fibre reinforced polymer (GFRP) rebars and concrete at elevated temperature. The experimental results showed that the use of bent rebars is an effective solution to improve the anchorage strength of GFRP rebars at elevated temperature. The parametric studies performed allowed concluding that in order to mobilize the tensile strength of GFRP rebars at elevated temperatures, the anchorage lengths of both straight and bent rebars, designed for ambient temperature, must be considerably extended to overcome the severe degradation of bond that occurs when the temperature of the rebars approaches and exceeds their glass transition temperature. Based on the results of parametric studies, anchorage lengths for straight and 90° bent GFRP rebars were proposed, as a function of temperature, for beam and slab applications.

Palavras-chave: Aderência GFRP-betão / Geometria da ancoragem / Temperatura elevada / Ensaios de arrancamento / Modelação numérica

Keywords: GFRP-concrete bond / Anchorage geometry / Elevated temperature / Pull-out tests / Numerical modelling

Inês C. Rosa

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

Mário R. T. Arruda

Investigador Doutorado, CERIS
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
mario.rui.arruda@tecnico.ulisboa.pt

João P. Firmo

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

João R. Correia

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

Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The contents included in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

ROSA, I. [et al.] – Aderência de varões de GFRP retos e dobrados ao betão a temperatura elevada: Ensaios de arrancamento e modelação numérica. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 22. ISSN 2183-8488. (julho 2023) 31-42.

1 Introdução

Atualmente, os varões de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) já são materiais economicamente mais competitivos face aos varões de aço inoxidável, aliando elevada resistência à corrosão com elevada resistência à tração, leveza, transparência eletromagnética e facilidade de instalação. Os varões de GFRP têm vindo a ser mais frequentemente utilizados em pontes e estruturas de betão armado localizadas em ambientes marítimos, duas aplicações nas quais a resistência ao fogo não é tipicamente um requisito de desempenho. A sua utilização em edifícios é ainda pouco comum e isto deve-se em parte à falta de informação e de recomendações de dimensionamento relativas à sua segurança em situação de incêndio. Neste contexto, sabe-se que a aderência GFRP-betão é severamente degradada a temperaturas (moderadamente elevadas) próximas da temperatura de transição vítrea (T_g) (i.e., de amolecimento) da resina polimérica (tipicamente, entre 93 °C e 120 °C [1]) e que, por esse motivo, os varões necessitam ser ancorados em zonas frias da estrutura para evitar roturas prematuras por deslizamento e, assim, permitir que a sua capacidade resistente possa ser explorada. Embora Nigro *et al.* [2] tenham mostrado que os comprimentos de ancoragem frios podem ser reduzidos utilizando varões dobrados, há um elevado desconhecimento sobre o comportamento de aderência destes varões ao betão a temperatura elevada; adicionalmente, foram realizados poucos estudos numéricos [3-6] sobre a interação GFRP-betão a temperatura elevada e nenhum deles simulou o comportamento de aderência de varões dobrados (apenas foram considerados varões retos).

Este artigo apresenta um estudo experimental e numérico sobre o comportamento de aderência de varões de GFRP retos e dobrados a 90° ao betão a temperatura elevada. Numa primeira fase do estudo, realizaram-se ensaios de arrancamento em varões dobrados a 90° embebidos em cilindros de betão a temperaturas até 300 °C, e os resultados foram comparados com aqueles obtidos por Rosa *et al.* [7] em varões retos. Numa segunda fase, foram desenvolvidos modelos de elementos finitos tridimensionais (3D) com o objetivo de simular os ensaios de arrancamento e efetuar estudos paramétricos. Os estudos paramétricos permitiram propor comprimentos de amarração, em função da temperatura, para varões de GFRP retos e dobrados a 90°, perspetivando a sua utilização em vigas e lajes de betão armado.

2 Ensaios de arrancamento a temperatura elevada

2.1 Descrição dos ensaios

A campanha experimental consistiu em ensaios de arrancamento (do tipo *pull-out*) em varões de GFRP, retos e dobrados a 90°, embebidos em cilindros de betão. Os ensaios foram realizados desde a temperatura ambiente (20 °C) até 300 °C, em regime estacionário – i.e., os provetes foram aquecidos até à temperatura objetivo e depois sujeitos a um carregamento mecânico aplicado a temperatura constante.

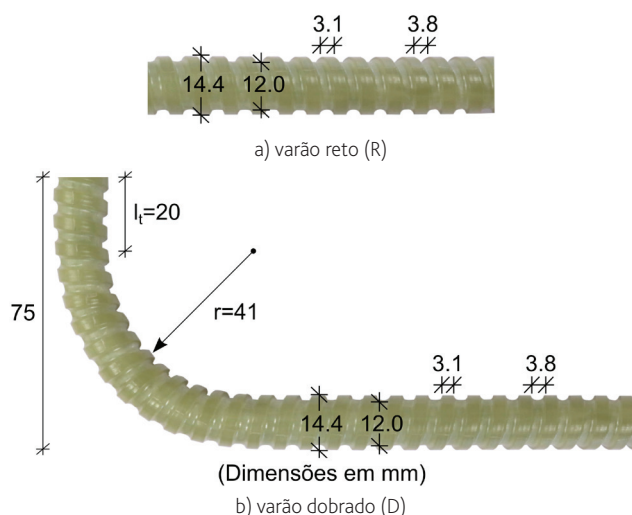


Figura 1 Varões de GFRP com geometria a) reta e b) dobrada a 90°

Os varões testados, ilustrados na Figura 1, foram fornecidos pela empresa *Schöck* (modelo *ComBAR*). Os varões são constituídos por fibras de vidro (tipo E-CR) embebidas numa resina de viniléster-epóxi; têm um acabamento superficial nervurado e um diâmetro nominal de 12 mm (14,4 mm incluindo as nervuras). Os varões têm uma temperatura de transição vítrea (T_g) de 104 °C (determinada com base no início do decaimento da curva do módulo de armazenamento, obtida através de análises dinâmicas mecânicas,

DMA) e uma temperatura de decomposição (T_d) de 400 °C (definida como a temperatura média do decaimento da massa, obtida através de análises termogravimétricas). Os varões, incluindo as nervuras e a extremidade dobrada dos mesmos, foram moldados e curados dentro de um tubo de polipropileno (removido antes dos ensaios) com uma superfície indentada idêntica ao perfil das nervuras. As propriedades termofísicas (T_g e T_d) assim como a resistência à tração e o módulo de elasticidade dos varões (retos) a temperatura elevada foram determinados em Rosa *et al.* [8] (cf. Figura 7a). As principais propriedades mecânicas e termofísicas dos varões encontram-se resumidas no Quadro 1.

Quadro 1 Propriedades dos varões de GFRP

Diâmetro nominal (núcleo)	12 mm
Diâmetro equivalente, D (superfície aderente ao betão)	13,3 mm
Resistência à tração (zona reta (1) / zona dobrada (2))	1184 / 700 MPa
Módulo de elasticidade (zona reta) (1)	60 GPa
Teor em fibra (1)	72%
Temperatura de transição vítrea, T_g (1)	104 °C
Temperatura de decomposição, T_d (1)	400 °C

(1) Propriedades (valores médios) determinadas pelos autores em Rosa *et al.* [8].
 (2) Valor fornecido pelo fabricante.

Os ensaios de arrancamento foram realizados de acordo com a norma ASTM D7913 [9]. A geometria dos provetes com varões retos e dobrados é ilustrada, respetivamente, na Figura 2a e na

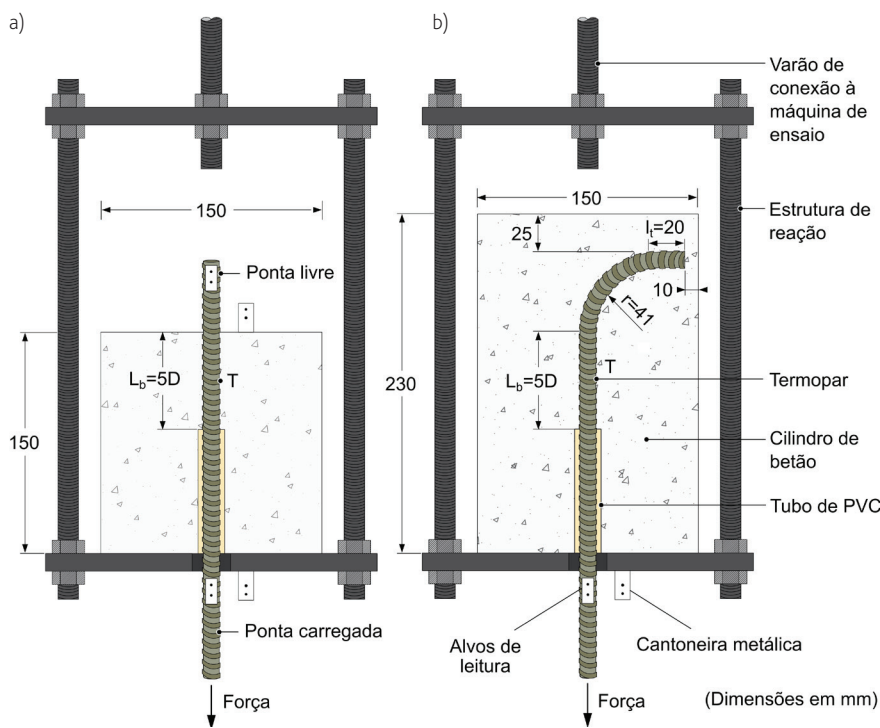


Figura 2 Geometria dos provetes com varões a) retos e b) dobrados; c) esquema de ensaio

Figura 2b. Os cilindros de betão foram produzidos numa única betonagem recorrendo a betão pronto (cimento tipo CEM II/A-L 42,5R e agregados calcários) com valores médios de resistência à compressão de 31,7 MPa e de resistência à tração de 1,7 MPa (propriedades obtidas aos 272 dias de idade, *i.e.*, à data dos ensaios de arrancamento). O comprimento aderente dos varões ao betão consistiu num troço reto (L_b) correspondente a 5 vezes o diâmetro equivalente (D , *cf.* Quadro 1) dos varões ($5D = 66,5$ mm) e, no caso dos varões dobrados, incluiu também uma dobra a 90° seguida de um troço reto (altura do gancho, l_f) de 20 mm; o comprimento aderente total dos varões dobrados era 161,3 mm ($\sim 12D$). O esquema de ensaio, ilustrado na Figura 2c, era composto por uma estrutura de reação metálica instalada dentro de uma câmara térmica *Tinius Olsen* e conectada a uma máquina universal de ensaios *Instron*. Para evitar roturas prematuras por esmagamento na zona das garras da máquina de ensaio, a extremidade carregada (inferior) dos varões foi protegida com tubos de aço inoxidável preenchidos com resina epóxida. A temperatura dos provetes foi medida na interface varão-betão através de um termopar (tipo K) posicionado a meia altura do comprimento aderente reto (*cf.* Figura 2a e Figura 2b). O deslizamento dos varões foi medido através de vídeo-extensometria, tendo-se utilizado para o efeito uma câmara de alta resolução *Sony*, ilustrada na Figura 2c. Os provetes foram aquecidos até a dada temperatura objetivo (60 °C, 100 °C, 120 °C, 140 °C, 220 °C e 300 °C) a uma taxa (inicial) média de aquecimento do ar no interior da câmara térmica de 7 °C/min (1 °C/min na interface varão-betão); depois, mantendo a temperatura constante na temperatura

objetivo, o varão foi tracionado em controlo de deslocamentos à velocidade de 1 mm/min (valor definido de acordo com [9]).

2.2 Resultados e discussão

Com exceção dos varões dobrados testados a 20 °C (cuja rotura ocorreu por fendilhação excessiva (*splitting*) do betão ou pela rotura à tração dos varões), os restantes provetes apresentaram roturas por deslizamento (*pull-out*); a 60 °C, a rotura ocorreu por *splitting* ou por *pull-out*. A Figura 3 e a Figura 4 mostram o aspeto pós-rotura da interface varão-betão dos varões retos e dobrados, respetivamente, para diferentes temperaturas de ensaio. Nos ensaios realizados a 20 °C (Figura 3a e Figura 4a), os varões deslizaram ao longo da interface varão-betão, indicando que a rotura ocorreu por *pull-out* com esmagamento e arrancamento do betão entre as nervuras do varão. Contudo, foi observado um comportamento diferente para temperaturas de ensaio superiores à T_g (Figura 3b,c e Figura 4b,c) – neste caso, devido ao amolecimento da resina, as nervuras perderam a adesão ao núcleo do varão e, conseqüentemente, o núcleo deslizou enquanto as nervuras permaneceram aderentes ao betão ao longo de grande parte do comprimento aderente. O dano na interface varão-betão a 220 °C e a 300 °C foi especialmente severo, visto que um número significativo de nervuras encontravam-se partidas e arrancadas do varão e, no caso dos varões testados a 300 °C (Figura 3c e Figura 4c), algumas fibras à superfície do núcleo também se encontravam partidas e sem vestígios de resina devido à sua decomposição.

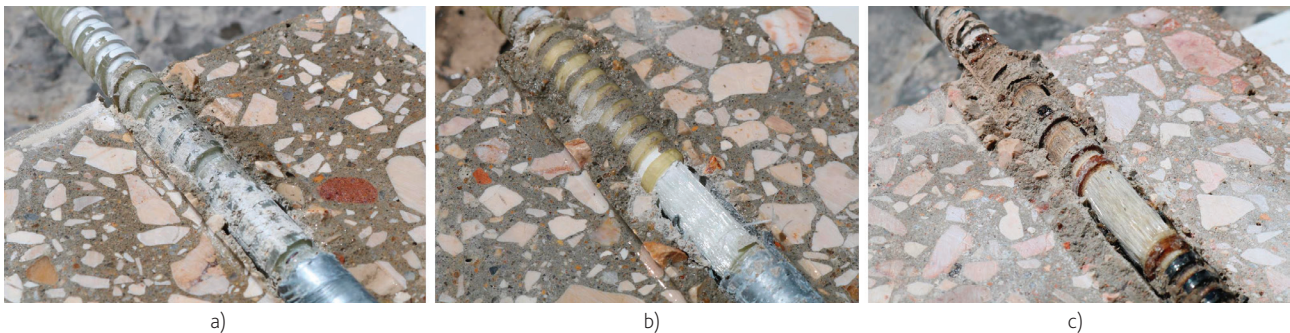


Figura 3 Modos de rotura de varões retos testados a: a) 20 °C, b) 100-200 °C e c) 300 °C

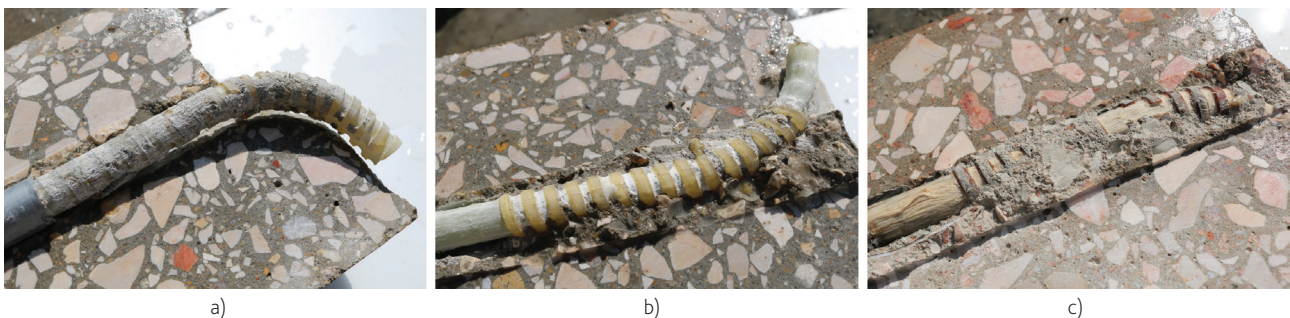


Figura 4 Modos de rotura de varões dobrados testados a: a) 20 °C, b) 100-200 °C e c) 300 °C

A Figura 5a mostra a força máxima de *pull-out* e o módulo de armazenamento¹ (E') (obtido nos ensaios *DMA*), normalizados a 20 °C, em função da temperatura; a Figura 5b apresenta a força máxima em valores absolutos. Os resultados mostram que a resistência e a rigidez de aderência dos varões de GFRP são fortemente reduzidas com a temperatura e que, em virtude do amolecimento da resina, essa redução é especialmente severa para temperaturas próximas da T_g . Observa-se que a resistência de aderência dos varões retos e dobrados se degradou de forma similar com a temperatura (Figura 5a) tal que, em relação a 20 °C, a força máxima de *pull-out* dos varões dobrados diminuiu cerca de 75% a 140 °C (73% nos varões retos) e 95% a 300 °C (94% nos varões retos). Contudo, conforme se mostra na Figura 5b, os varões dobrados apresentaram uma maior capacidade de ancoragem em relação aos varões retos para toda a gama de temperaturas testadas – a existência de uma dobra a 90° após o troço reto conferiu um aumento da força máxima de *pull-out* entre 31% (a 120 °C) e 88-89% (a 20-60 °C) em relação aos varões retos. Tal como esperado, a aderência GFRP-betão (Figura 5a) foi mais afetada com o aumento da temperatura do que a resistência à tração e o módulo de elasticidade dos varões (*cf.* Figura 7).

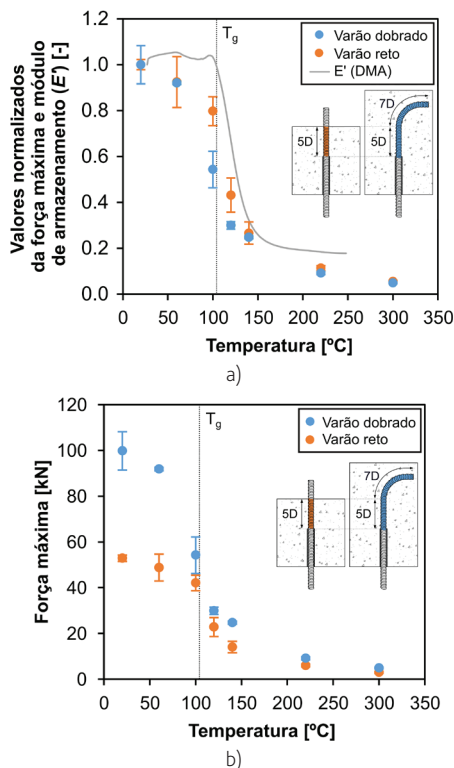


Figura 5 Força máxima de *pull-out* e módulo de armazenamento (E' , obtido por *DMA*) em função da temperatura em valores a) normalizados à temperatura ambiente e b) absolutos

¹ O módulo de armazenamento é uma propriedade que se relaciona com a rigidez do material e corresponde à capacidade dos materiais viscoelásticos armazenarem energia (mecânica) de uma forma elástica.

3 Simulação numérica do comportamento de aderência a temperatura elevada

3.1 Descrição dos modelos numéricos

Complementarmente ao estudo experimental, foram desenvolvidos modelos de elementos finitos 3D no software comercial *ABAQUS Standard* com o objetivo de investigar a influência da geometria dos varões de GFRP no seu comportamento de aderência ao betão a temperatura elevada. O estudo numérico teve como principais objetivos: (i) simular os ensaios de arrancamento realizados em varões retos e dobrados, e (ii) realizar estudos paramétricos para determinar (ii₁) a resistência de ancoragem dos varões, para diferentes temperaturas, em função do comprimento de amarração, e (ii₂) a configuração ótima (comprimentos de amarração e altura do gancho) dos varões em função da temperatura.

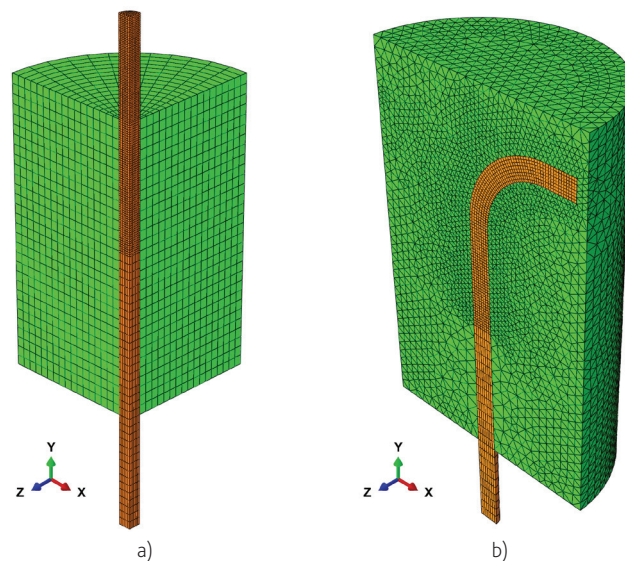


Figura 6 Geometria e malha dos modelos com varões a) retos e b) dobrados

A geometria dos modelos e a malha de elementos finitos utilizados para simular os ensaios de arrancamento são apresentadas na Figura 6. Graças às condições de simetria, apenas 1/4 e 1/2 da dimensão dos provetes com varões retos e dobrados foi modelada, respetivamente, tendo para o efeito sido definidas condições de fronteira apropriadas. Os varões (retos e dobrados) e os cilindros de betão com varões dobrados (Figura 6b) foram modelados com elementos hexaédricos de 8 nós (com integração reduzida) do tipo C3D8R; os cilindros de betão com varões retos (Figura 6a) foram modelados com elementos tetraédricos de 4 nós do tipo C3D4.

Nos modelos com varões retos, os varões de GFRP e o betão foram modelados como materiais isotrópicos com comportamento elástico linear, considerando-se para o efeito as seguintes propriedades elásticas (módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν)) a temperatura ambiente: para o betão ($E = 26,2$ GPa, $\nu = 0,2$) e para os varões ($E = 60,1$ GPa, $\nu = 0,3$). A resistência à tração e o módulo de elasticidade dos varões retos (e das zonas retas

dos varões dobrados) foram definidos em função da temperatura de acordo com os resultados dos ensaios de tração realizados por Rosa *et al.* [8] (cf. Figura 7 e Quadro 2).

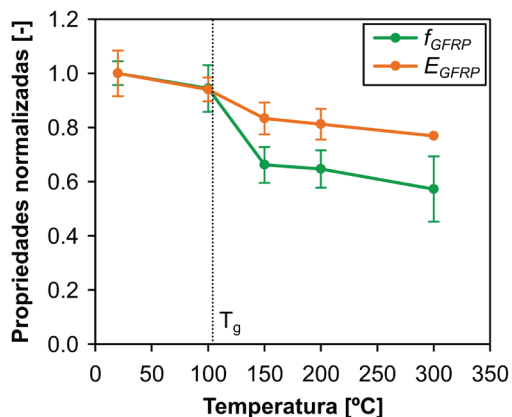


Figura 7 Resistência à tração (f_{GFRP}) e módulo de elasticidade (E_{GFRP}) dos varões retos em função da temperatura obtidos em Rosa *et al.* [8]

Nos modelos com varões dobrados, o comportamento inelástico do betão foi simulado através do modelo material *Concrete Damaged Plasticity (CDP)*, assumindo um comportamento elasto-plástico. O comportamento do betão à compressão e à tração a temperatura ambiente foi definido de acordo com o Eurocódigo 2 (EC2) – Parte 1-1 e a variação das propriedades mecânicas com a temperatura foi definida de acordo com o EC2 – Parte 1-2, com exceção do coeficiente de Poisson ($\nu = 0,2$) e da energia de fratura ($G_f = 0,06$ N/mm, estimada de acordo com [10]) e que foram considerados constantes com a temperatura. Os varões dobrados foram modelados como transversalmente isotrópicos e com comportamento elástico linear; a zona dobrada foi dividida em segmentos de 10° por forma a definir as propriedades mecânicas dos varões nas direções longitudinal (L) e transversal (T) (cf. Quadro 2). As constantes elásticas a 20°C foram definidas de acordo com a lei das misturas. Devido à inexistência de dados experimentais, a variação da resistência dos varões com a temperatura na zona dobrada foi assumida igual à dos varões retos ([8]); a variação com a temperatura dos módulos de elasticidade (E_T) e de distorção (G_{LT} e G_{TT}) transversais foi considerada de acordo com os resultados obtidos por Rosa *et al.* [11], e os coeficientes de Poisson foram assumidos invariantes com a temperatura.

A interação entre os varões e o betão foi modelada através de superfícies coesivas, utilizando a interação *surface-to-surface contact* e a formulação de contacto *small sliding* do *ABAQUS*. Os parâmetros que definem a interação varão-betão na direção tangencial, incluindo a iniciação e a evolução do dano na interface, dos varões retos e das zonas retas dos varões dobrados a 20°C (conforme descrito em seguida) foram implementados nos modelos de acordo com as leis locais de tensão de aderência vs. deslizamento ilustradas na Figura 8; estas leis foram calibradas numericamente em Rosa *et al.* [7] para diferentes temperaturas e com base nos ensaios de arrancamento realizados nos varões retos. Os parâmetros que definem as leis de aderência, descritas através da Equação 1, para diferentes temperaturas encontram-se listados no Quadro 3.

Quadro 2 Constantes elásticas adotadas para os varões dobrados em função da temperatura

Temperatura [°C]	E_L [GPa]	E_T [GPa]	ν_{LT}	ν_{TT}	G_{LT} [GPa]	G_{TT} [GPa]
20	60,1	15,4			5,6	5,5
60	58,3	10,6			3,9	3,8
100	56,5	5,7			2,1	2,1
120	53,9	4,8	0,27	0,39	1,8	1,7
140	51,4	3,5			1,3	1,2
220	48,3	1,8			0,7	0,7
300	46,2	1,7			0,6	0,6

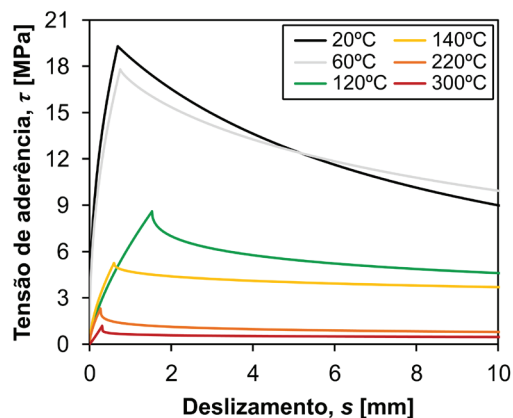


Figura 8 Leis locais de tensão de aderência vs. deslizamento para diferentes temperaturas (leis calibradas para varões retos em Rosa *et al.* [7])

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

Numa fase preliminar do estudo numérico, a interação entre a zona dobrada dos varões e o betão foi modelada da mesma forma que a zona reta (*i.e.*, considerando as leis locais de aderência calibradas em [7] para varões retos); contudo, embora tenham sido obtidos bons resultados (*i.e.*, boa concordância com os dados experimentais) a 20°C , esta metodologia conduziu à sobrestimação das forças máximas de *pull-out* obtidas nos ensaios realizados a temperaturas elevadas. Estes resultados indicaram que, a temperatura elevada, os modelos não são capazes de simular o dano localizado que ocorre nas nervuras da zona dobrada do varão. Este dano localizado deve-se, por um lado, à combinação de forças na direção longitudinal e transversal da dobra, tornando-a propensa a grandes concentrações

de tensões, conforme se mostra na Figura 10b; por outro lado, o dano na zona dobrada resulta também da redução severa da resistência ao corte das nervuras devido ao amolecimento da resina [11]. Os resultados preliminares sugeriram assim que, ao contrário do que seria inicialmente expectável, a resistência de aderência na zona dobrada do varão seria na verdade inferior à da zona reta. Consequentemente, para simular os efeitos acima referidos de uma forma implícita, foram calibradas leis de aderência para a zona dobrada dos varões através de análise inversa e apenas para temperaturas superiores a 20 °C. Para o efeito, a tensão máxima de aderência na zona dobrada (τ_m' no Quadro 3) foi definida através da redução da tensão máxima de aderência na zona reta (τ_m no Quadro 3 e Equação 1) através de um fator de redução (indicado entre parênteses no quadro). O fator de redução foi calibrado de forma a minimizar a diferença entre as forças máximas de *pull-out* experimentais e numéricas a cada temperatura.

Quadro 3 Parâmetros das leis de aderência de varões retos e dobrados

Temperatura [°C]	s_m [mm]	Zona reta		Zona dobrada		α [-]	α' [-]	s_1 [-]
		τ_m [MPa]	τ_m' [MPa]	τ_m [MPa]	τ_m' [MPa]			
20	0,69	19,30	19,30	0,42	0,98	8,1		
60	0,75	17,80	9,79 (0,55 τ_m)	0,45	0,80	12,4		
120	1,53	8,60	0,43 (0,05 τ_m)	0,67	0,46	11,5		
140	0,60	5,26	1,58 (0,30 τ_m)	0,61	0,40	80,0		
220	0,27	2,30	0,23 (0,10 τ_m)	0,63	0,35	1,5		
300	0,31	1,18	0,41 (0,35 τ_m)	1,10	0,22	1,3		

Os efeitos da temperatura na interação varão-betão na direção normal não foram considerados neste estudo devido à inexistência de dados experimentais a esse respeito; como tal, na direção normal, adotou-se uma rigidez de contacto de 10 000 MPa (equivalente a uma ligação rígida) e uma tensão máxima de aderência de 33 MPa (*i.e.*, suficientemente elevada para não afetar a resposta global). A interação entre a ponta livre dos varões retos e o betão (*cf.* Figura 2a) foi simulada considerando um coeficiente de atrito de 0,5 (valor médio reportado na literatura) e uma rigidez de contacto de 1000 MPa (equivalente a uma ligação rígida), ambos assumidos constantes com a temperatura.

Foram realizadas análises estáticas (i) geometricamente lineares nos modelos com varões retos e (ii) geometricamente não lineares nos modelos com varões dobrados. A força axial de tração foi aplicada na extremidade inferior dos varões em pequenos incrementos.

3.2 Validação do modelo

A Figura 9 compara as curvas experimentais e numéricas força vs. deslizamento na ponta carregada obtidas em varões retos (Figura 9a) e dobrados (Figura 9b). Em geral, os modelos foram capazes de

prever com boa precisão o comportamento observado nos ensaios, especialmente no que se refere à força máxima de *pull-out*, à rigidez inicial da resposta e aos modos de rotura. A Figura 9b mostra que a interação entre os varões dobrados e o betão a 20 °C pode ser modelada ao longo de todo o comprimento aderente através de leis de aderência calibradas para varões retos. Isto deve-se ao facto de a 20 °C, conforme explicado na Secção 2.2, a resistência de aderência dos dois tipos de varões ter sido condicionada de igual forma pela resistência do betão entre as nervuras.

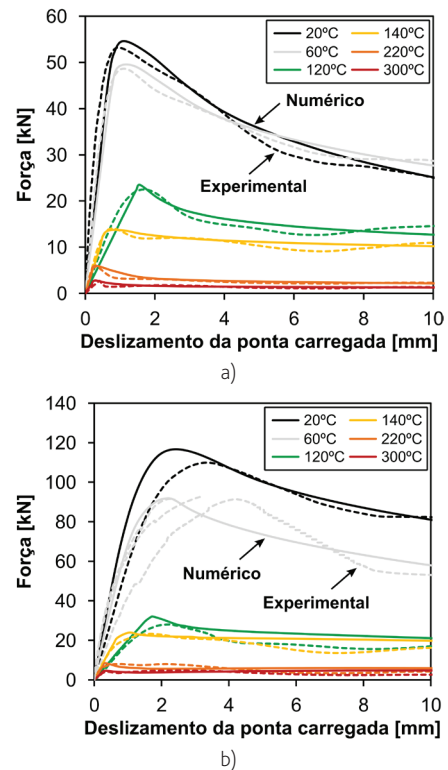


Figura 9 Comparação entre as curvas força vs. deslizamento na extremidade carregada dos varões a) retos e b) dobrados: curva numérica (linha contínua) e experimental (linha tracejada)

Mostrou-se, contudo, que, a temperatura elevada (*i.e.*, 60 °C a 300 °C), a resistência de aderência dos varões dobrados é controlada não só pela degradação da aderência das nervuras ao núcleo do varão (efeito considerado na lei calibrada para varões retos), mas também pela resistência ao corte das nervuras mobilizada na zona da dobra (implicitamente considerada na lei calibrada para a zona dobrada). Estes resultados enfatizaram as diferenças relevantes que existem nos mecanismos de aderência de varões de GFRP retos e dobrados a temperatura elevada; estas diferenças justificam a necessidade de calibração de leis de aderência separadamente para as zonas reta e dobrada dos varões.

De facto, a Figura 10b mostra que a distribuição de tensões na zona dobrada não é uniforme na secção do varão, desenvolvendo-se tensões de tração de grande magnitude na zona interior da dobra,

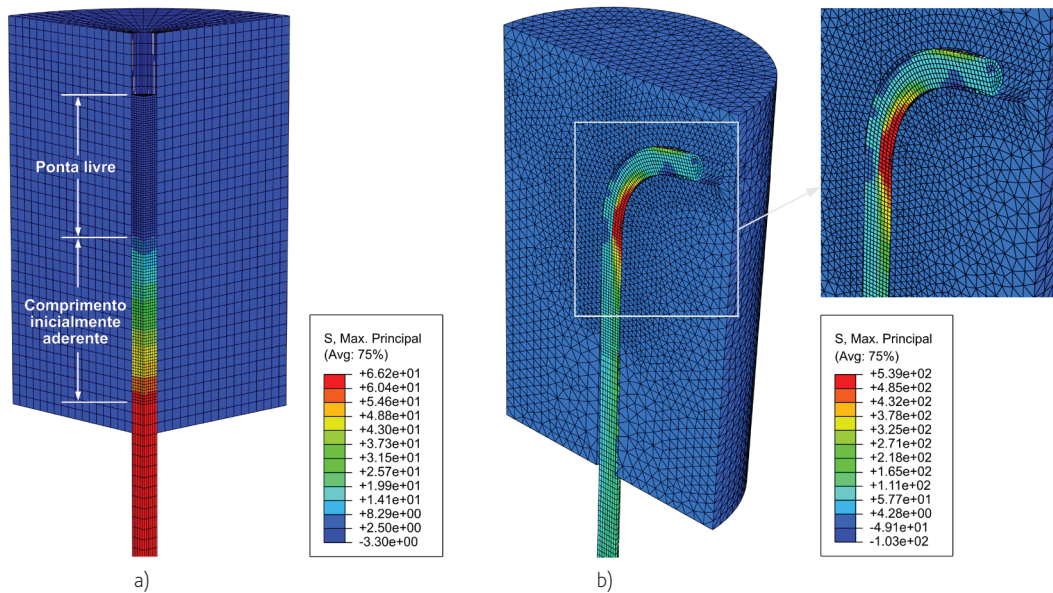


Figura 10 Distribuição das tensões máximas principais (em MPa) ao longo do comprimento aderente de varões a) retos e b) dobrados (exemplo de simulação realizada a 140 °C; estado de tensão correspondente a um deslocamento imposto de 25 mm)

e tensões de compressão na face exterior da dobra e na zona inferior do troço horizontal do gancho. Este estado de tensão é marcadamente diferente daquele que ocorre nos varões retos, tal como se mostra na Figura 10a, nos quais a distribuição de tensões é uniforme na secção do varão e as tensões radiais são marginais em comparação com as tensões tangenciais que se desenvolvem ao longo do comprimento aderente.

A Figura 11 mostra, para diferentes temperaturas, as forças máximas de *pull-out* obtidas nos ensaios realizados em varões retos (A) ($L_b = 5D$) e dobrados (B) ($L_b \approx 12D$) e compara-as com aquelas obtidas numericamente para um varão reto com o mesmo comprimento aderente (total) dos varões dobrados (C) ($L_b \approx 12D$). Conforme se verificou nos ensaios, a presença de uma dobra após um troço reto permite aumentar significativamente a resistência de ancoragem do varão reto (B vs. A). Porém, visto que a resistência de aderência dos varões dobrados é afetada pela fragilidade local das nervuras na zona dobrada, os resultados mostram que, na realidade (para este tipo de acabamento superficial), um varão dobrado apresenta uma menor resistência de aderência do que um varão reto com o mesmo comprimento aderente (B vs. C). Importa, contudo, salientar que esta análise considera que a distribuição de temperatura é uniforme ao longo de todo o varão e, como tal, a degradação da aderência progride ao mesmo ritmo em todas as secções do mesmo. Porém, num cenário real de incêndio, as armaduras não estão sujeitas a uma temperatura uniforme, já que a extremidade dobrada do varão pode ser ancorada numa zona fria da estrutura (protegida da ação direta do calor), onde a aderência se degrada mais lentamente. Por este motivo, numa situação real, é expectável que a capacidade de ancoragem de um varão dobrado seja maior do que aquela supracitada e, como tal, a adoção de um varão dobrado em detrimento de um varão reto pode contribuir para uma melhoria

significativa da sua capacidade de ancoragem, tal como verificado por Nigro *et al.* [2].

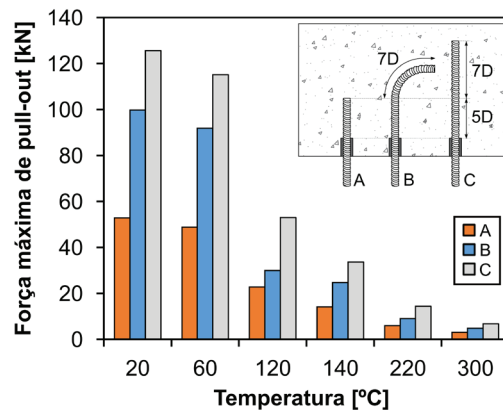


Figura 11 Comparação das forças máximas de *pull-out* de varões retos e dobrados para diferentes temperaturas (A e B – valores experimentais; C – valor estimado numericamente)

3.3 Estudo paramétrico – determinação de comprimentos de amarração para varões de GFRP em função da temperatura

3.3.1 Descrição dos parâmetros

A última parte do estudo consistiu na realização de estudos paramétricos para investigar a influência da geometria dos varões no

seu comportamento de aderência ao betão a temperatura elevada. O principal objetivo deste estudo foi propor comprimentos de amarração em função da temperatura para varões retos e dobrados a 90°, tendo em vista a sua aplicação em vigas e lajes. Para o efeito, o comprimento aderente dos varões retos (L_b), e a altura do gancho (l_g) e comprimento aderente reto (L_b) dos varões dobrados (cf. esquema da Figura 14) foram variados em função do diâmetro (D) do varão; o raio da dobra foi mantido constante e igual à geometria do varão ilustrada na Figura 1b. Para acomodar varões maiores, as dimensões dos cilindros de betão utilizados no estudo paramétrico foram aumentadas em relação àquelas consideradas na fase de validação (i.e., da Figura 6). Os comprimentos de amarração foram definidos de uma forma conservativa tendo em vista: (i) a determinação do comprimento de ancoragem necessário para mobilizar a resistência à tração dos varões a temperatura elevada, e (ii) a definição da altura do gancho ótima que permite atingir esse fim. O Quadro 4 resume os parâmetros e temperaturas analisadas no estudo; não foram simuladas temperaturas superiores a 140 °C, visto que a retenção da resistência de aderência nessa gama de temperaturas é muito reduzida (cf. Figura 5a) e, consequentemente, conduziria a comprimentos de amarração inviáveis numa estrutura real.

Quadro 4 Parâmetros analisados nos estudos paramétricos

Geometria do varão	Parâmetro	Gama de variação	Temperaturas
Reto	Comprimento de amarração (L_b)	[5D; 60D]	20, 60, 120, 140 °C
Dobrado a 90°	Altura do gancho (l_g)	[1.5D; 24D]	
	Comprimento de amarração reto (L_b)	[5D; 35D]	

No caso dos varões dobrados, o estudo paramétrico foi realizado em duas fases. Na primeira fase, manteve-se o comprimento aderente reto (L_b) igual a 5D (tal como nos modelos usados para simular os ensaios de arrancamento) e determinou-se a altura ótima do gancho (l_g) para cada temperatura, correspondendo esse valor ao comprimento para além do qual o aumento na área de contacto não conduziu a um aumento apreciável da força de *pull-out* do varão (Figura 12a e Figura 12b). De forma a considerar as espessuras correntes de lajes armadas com varões de GFRP – entre 150 mm [12] e 260 mm [13] – a altura máxima do gancho em lajes foi definida como 10D (correspondendo a um gancho com 187 mm de altura); para vigas, essa limitação não foi imposta. A segunda fase do estudo consistiu em determinar o comprimento de amarração reto que conduz à rotura à tração do varão, considerando a altura ótima do gancho definida na primeira fase (Figura 12c e Figura 12d). Conforme se mostra na Figura 14, e de acordo com a nomenclatura da norma ACI 318-11 [14], o comprimento de amarração de varões dobrados (l_b) correspondeu à distância entre a secção crítica e a face exterior da dobra (neste caso, equivalente à soma do comprimento de amarração reto (L_b), do raio da dobra (r) e do diâmetro do varão (D)).

3.3.2 Resultados e discussão

A Figura 12a e Figura 12c apresentam, respetivamente, a variação da força de *pull-out* dos varões dobrados com o aumento da altura do gancho e do comprimento aderente reto; por sua vez, a Figura 13a mostra a variação da força de *pull-out* dos varões retos com o aumento do comprimento aderente. As referidas figuras mostram que a força de *pull-out* aumenta com o aumento da área aderente até a um determinado comprimento aderente/altura do gancho (valor ótimo). A Figura 12b e Figura 12d mostram, respetivamente, a altura ótima do gancho e o comprimento de amarração reto obtidos para varões dobrados em função da temperatura; por outro lado, a Figura 13b apresenta o comprimento de amarração necessário para amarrar um varão reto em função da temperatura. A Figura 14 compara os comprimentos de amarração necessários para mobilizar a resistência à tração de varões retos e dobrados em função da temperatura para um caso de aplicação numa viga. Conforme se mostra na Figura 14 (e também na Figura 12 e Figura 13), o estudo paramétrico permitiu concluir que os comprimentos de amarração necessários para mobilizar a resistência à tração de varões de GFRP a temperatura elevada são significativamente maiores do que aqueles que são requeridos a temperatura ambiente, especialmente para temperaturas superiores à T_g (104 °C), em virtude da degradação severa da aderência que ocorre devido ao amolecimento da resina. Por exemplo, conforme se mostra na Figura 14, para explorar a capacidade resistente de um varão reto a 20 °C e a 140 °C são necessários comprimentos de amarração de 17D e 47D, respetivamente.

Quadro 5 Comprimentos de amarração recomendados para varões retos e dobrados, em função do diâmetro do varão (para $r = 3,1D$)

Elemento estrutural	T [°C]	Varões retos		Varões dobrados a 90°	
		Comprimento de amarração (l_b)	Comprimento de amarração (l_b) ⁽¹⁾	Altura ótima do gancho (l_g)	Comprimento total de amarração ⁽²⁾
Lajes e vigas	20	17D	12D	3D	17D
	60	18D	13D	6D	21D
Vigas	120	37D	25D	15D	42D
	140	47D	27D	20D	49D
Lajes	120	37D	30D	10D ⁽³⁾	42D
	140	47D	38D	10D ⁽³⁾	50D

- (1) Comprimento de amarração de varões dobrados definido na Figura 12.
- (2) Comprimento de amarração total correspondente à soma da altura do gancho (l_g), zona dobrada e comprimento de amarração reto (L_b).
- (3) Altura máxima do gancho limitada a 10D devido à espessura da laje.

O Quadro 5 apresenta os comprimentos de amarração estimados para varões retos e dobrados, em função da temperatura, para aplicações em vigas e lajes. Os resultados permitem concluir que é possível adotar comprimentos de ancoragem mais curtos se forem utilizados varões dobrados com uma altura de gancho adequada. Tomando como exemplo o caso de uma aplicação em viga (cf. Figura 14), verifica-se que o comprimento de amarração necessário para uma temperatura de 140 °C pode ser reduzido de 47D utilizando um varão reto, para 27D se for utilizado um varão dobrado com um gancho de altura 20D (cf. Figura 12b). Importa referir que os guias/normas atuais de dimensionamento de estruturas de betão armado com varões de GFRP não providenciam nenhuma expressão de cálculo para o comprimento de amarração

na qual os efeitos da temperatura elevada sejam considerados; os resultados obtidos neste estudo têm, por este motivo, uma relevância prática no dimensionamento de zonas de ancoragem e de emenda em contexto de incêndio. É também importante salientar que este estudo numérico foi desenvolvido considerando uma distribuição de temperatura uniforme ao longo de todo o comprimento da armadura; contudo, conforme referido, numa situação real de incêndio, os varões podem ser ancorados nas vigas e colunas, logo sujeitos a gradientes térmicos, que permitem que as tensões de aderência sejam resistidas pelas regiões mais frias dos varões onde a aderência tenha sido menos afetada. Por este motivo e nestas circunstâncias, os comprimentos de amarração propostos no Quadro 5 devem ser considerados como conservativos.

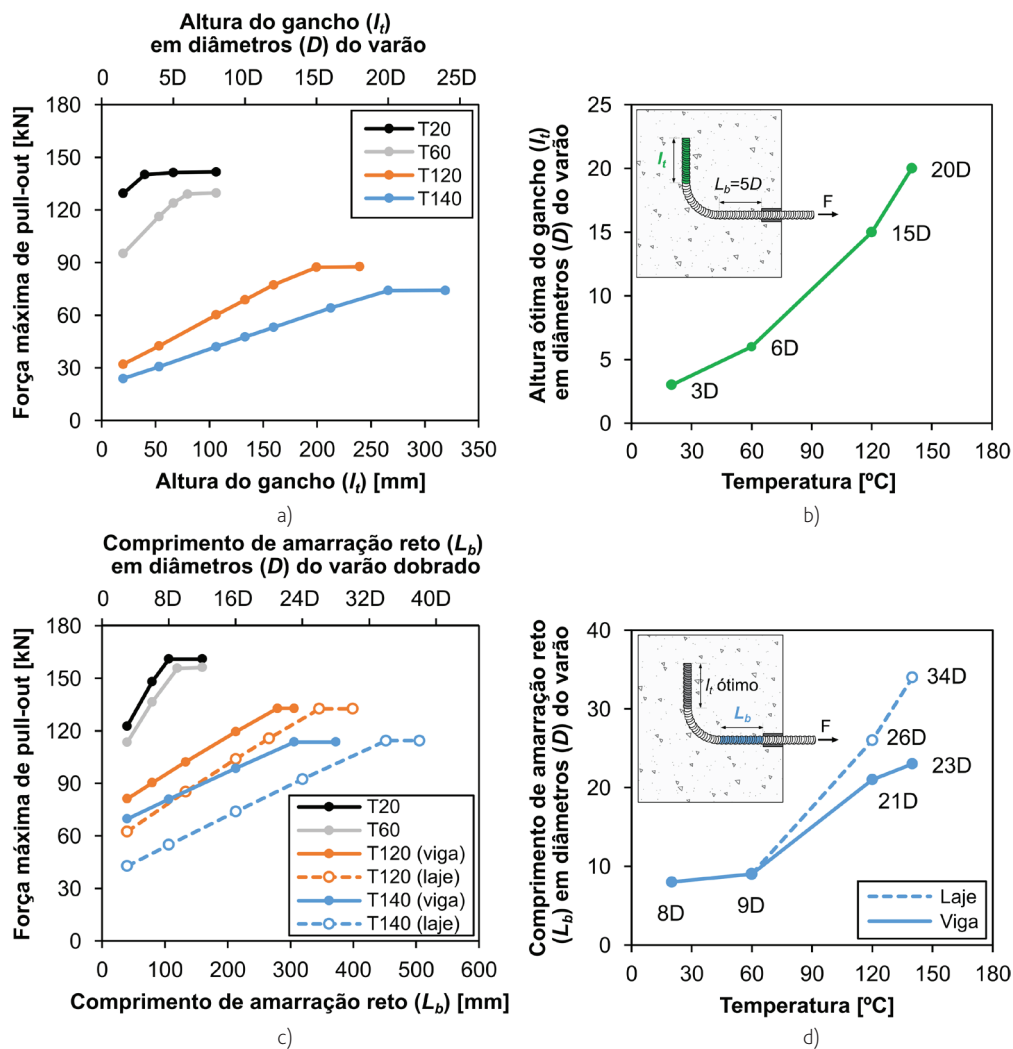


Figura 12 Resultados do estudo paramétrico em varões dobrados: força máxima de *pull-out* em função de: a) altura do gancho (l_f) e c) comprimento de amarração reto (L_b); b) altura ótima do gancho e d) comprimento de amarração reto de varões dobrados em função da temperatura

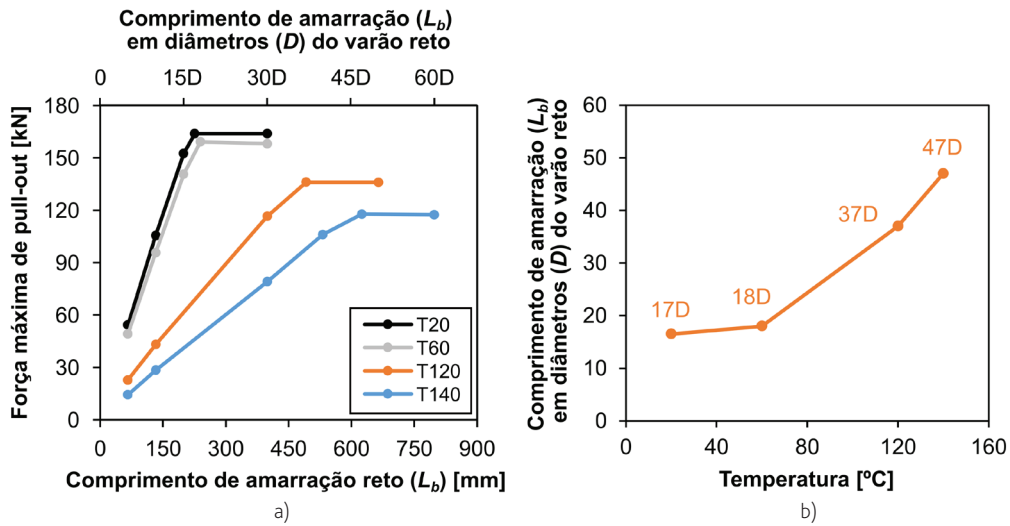


Figura 13 Resultados do estudo paramétrico em varões retos: a) força máxima de *pull-out* em função do comprimento de amarração reto (L_b); b) comprimento de amarração reto (L_b) em função da temperatura

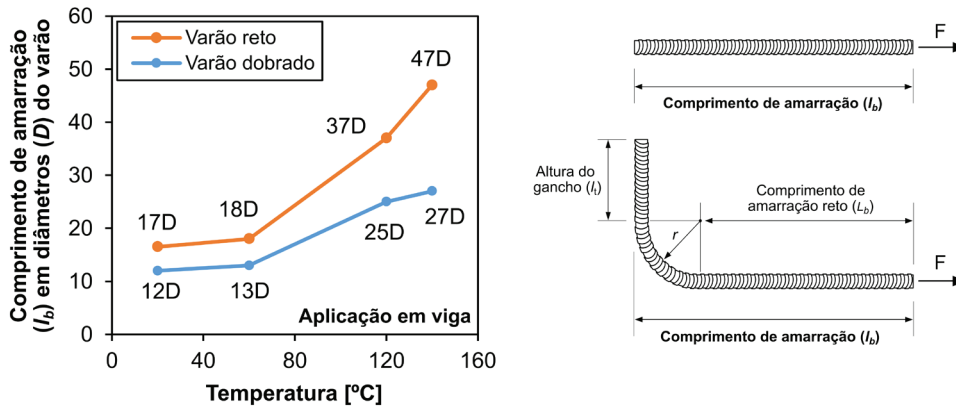


Figura 14 Comparação do comprimento de amarração (l_b) recomendado para ancorar varões retos e dobrados a 90° (exemplo de aplicação numa viga)

4 Conclusões

Este artigo apresentou um estudo experimental e numérico acerca do comportamento de aderência a temperatura elevada de varões de GFRP retos e dobrados a 90°. Os resultados experimentais comprovaram que apesar da aderência de ambos os tipos de varões ser severamente degradada para temperaturas próximas da T_g , a adoção de varões dobrados permite melhorar consideravelmente a resistência de aderência à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas. As leis locais de aderência implementadas nos modelos de elementos finitos 3D (calibradas noutra estudo para varões retos) permitiram prever com razoável precisão a resposta força vs. deslizamento dos varões retos a todas as temperaturas de ensaio e, também, dos varões dobrados a temperatura ambiente. Porém, para temperaturas superiores a 20 °C, foi necessário calibrar leis locais de aderência para a zona dobrada dos varões, de forma a

simular a menor resistência (local) de aderência dos varões nessa zona (decorrente do maior dano localizado que ocorre nas nervuras da dobra a temperatura elevada). Com base nos resultados de estudos paramétricos, foram propostos comprimentos de amarração e alturas de ganchos para varões de GFRP em função da temperatura. Os resultados mostram que os comprimentos de amarração dimensionados para temperatura ambiente nos guias/normas existentes são insuficientes para mobilizar a resistência à tração dos varões de GFRP a temperatura elevada. Demonstrou-se, também, que o comprimento de amarração necessário para ancorar um varão reto pode ser reduzido através da adoção de uma extremidade em gancho com uma altura adequada. Não obstante, estudos futuros deverão avaliar a influência de outros parâmetros, como o acabamento superficial, e o ângulo e o raio da dobra, no comportamento de aderência de varões de GFRP dobrados a temperatura elevada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT, projeto PTDC/ECM-EST/1882/2014) e ao CERIS (financiamento FCT, UIDB/04625/2020) pelo financiamento desta investigação, à Secil/Unibetão pelo fornecimento de betão e à Schöck pelo fornecimento dos varões de GFRP. A primeira autora agradece também o financiamento da FCT através da bolsa SFRH/BD/129681/2017.

Referências

- [1] ACI (American Concrete Institute) – “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars”, ACI 440.1R-15, Farmington Hills, Michigan, USA, 2015.
- [2] Nigro, E.; Bilotta, A.; Cefarelli, G.; Manfredi, G.; Cosenza, E. – “Performance under fire situations of concrete members reinforced with FRP rods: bond models and design nomograms”, *Journal of Composites for Construction*, 2012, Vol. 16 (4), p. 395-406.
- [3] Bilotta, A.; Compagnone, A.; Esposito, L.; Nigro, E. – “Structural behaviour of FRP reinforced concrete slabs in fire”, *Engineering Structures*, 2020, Vol. 221, , p. 111058.
- [4] Duan, D.; Ouyang, L.; Gao, W.; Xu, Q.; Liu, W.; Yang, J. – “Fire performance of FRP-RC flexural members: a numerical study”, *Polymers*, 2022, Vol. 14 (346).
- [5] Veljkovic, A.; Carvelli, V.; Solyom, S.; Balázs, G.L.; Rezazadeh, M. – “Modelling the temperature effects at the interface between GFRP bar and concrete”, *IABSE Symposium 2019 Guimarães - Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management*, Guimarães, Portugal, 2019, p. 1065-1072.
- [6] Veljkovic, A.; Carvelli, V.; Rezazadeh, M. – “Modelling the bond of GFRP bar and concrete for the thermo-mechanical behaviour of RC slabs”, *10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. CICE 2021, Lecture Notes in Civil Engineering*, Ed. por Ilki A. e Ispir M., Springer, Cham, 2022.
- [7] Rosa, I. C.; Firmo, J. P.; Correia, J. R.; Mazzuca, P. – “Influence of elevated temperatures on the bond behaviour of ribbed GFRP bars in concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 2021, Vol. 122, p. 104119.
- [8] Rosa, I. C.; Firmo, J.P.; Correia, J. R. – “Experimental study of the tensile behaviour of GFRP reinforcing bars at elevated temperatures”, *Construction and Building Materials*, 2022, Vol. 324, p. 126676.
- [9] ASTM (American Society for Testing and Materials) – “Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing”, *ASTM D7913/D7913M-14*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2014.
- [10] Hilsdorf, H.K.; Brameshuber, W. – “Code-type formulation of fracture mechanics concepts for concrete”, *International Journal of Fracture*, 1991, Vol. 51 (1), p. 61-72.
- [11] Rosa, I. C.; Morgado, T.; Correia, J. R.; Firmo, J. P.; Silvestre, N. – “Shear behaviour of GFRP composite materials at elevated temperature”, *Journal of Composites for Construction*, 2018, Vol. 22 (3), p. 04018010.
- [12] Benmokrane, B.; El-Salakawy, E.; Cherrak, Z.; Wiseman, A. – “Fibre reinforced polymer composite bars for the structural concrete slabs of a Public Works and Government Services Canada parking garage”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2004, Vol. 31 (5), p. 732-748.
- [13] Ahmed, E. A.; Benmokrane, B.; Sansfaçon, M. – “Case Study: Design, Construction, and Performance of the La Chancelière Parking Garage’s Concrete Flat Slabs Reinforced with GFRP Bars”, *Journal of Composites for Construction*, 2017, Vol. 21 (1), p. 05016001.
- [14] ACI (American Concrete Institute) – “Building Code Requirements for Structural Concrete”, *ACI 318-11*, Farmington Hills, Michigan, USA, 2011.