

Efeito da temperatura no comportamento de ancoragens mecânicas para confinamento transversal de FRP



José Sena-Cruz¹



Luís Correia²



Cristina Barris³

RESUMO

Atualmente a utilização de laminados de CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*) no reforço de estruturas de betão armado (BA) constitui uma solução viável, consolidada pelos vários estudos científicos e aplicações práticas. A técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) é frequentemente utilizada como forma de aumentar a resistência à flexão de estruturas de BA. Contudo, o desenvolvimento de tensões de corte elevadas nas extremidades do laminado pode levar à rotura prematura do sistema CFRP/betão por destacamento. Esta situação é ainda mais frequente quando o laminado é pré-esforçado, sendo neste caso necessário o uso de ancoragens nas extremidades, que evitam esta rotura precoce.

O presente trabalho tem como principal objetivo procurar compreender a influência do efeito de temperaturas moderadamente elevadas (de serviço) no comportamento de sistemas de ancoragens mecânicas para confinamento transversal de laminados de CFRP.

O programa experimental foi composto por 14 prismas de betão (200 mm × 500 mm × 800 mm), aos quais é aplicado um laminado de CFRP de acordo com a técnica EBR. Posteriormente, cada ancoragem mecânica foi fixa ao prisma através de seis parafusos pré-esforçados, de forma a criar um nível confinamento transversal pré-determinado. Os provetes foram ensaiados segundo uma configuração de ensaio de arranque direto, uns em (i) regime estacionário (RE) e outros (ii) em regime transiente (RT). No regime estacionário, a temperatura foi mantida constante (20 °C, 60 °C e 80 °C), enquanto que a força de arranque foi aumentando até à rotura do sistema. No regime transiente, a força de arranque foi mantida constante (100 kN e 120 kN), enquanto que a temperatura foi aumentando gradualmente. Além da temperatura e da configuração de ensaio, a largura do laminado (50 mm, 80 mm, 100 mm) e o nível de confinamento transversal foram também estudados.

Assim, os resultados dos ensaios de arranque direto são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: CFRP; Pré-esforço; Ancoragem; Temperatura

¹ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Univ. do Minho, Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal; e-mail: jsena@civil.uminho.pt

²ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Univ. do Minho, Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal; e-mail: lcorreia@civil.uminho.pt

³AMADE, Dept. of Mech. Engineering and Industrial Construction, Univ. of Girona, c/ M^a Aurèlia Capmany 61, 17071 Girona, Spain; e-mail: cristina.barris@udg.edu

1. INTRODUÇÃO

O reforço de estruturas de betão armado (BA) com materiais compósitos FRP (*Fibre Reinforced Polymers*) é, atualmente, uma solução tecnicamente viável, consolidada por vários estudos realizados nas últimas décadas, aplicações práticas e códigos de dimensionamento. Os compósitos FRP com fibras de Carbono (CFRP) são geralmente aplicados segundo a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) no reforço de estruturas de BA de forma a aumentar a sua resistência à flexão. Nestas aplicações habitualmente utilizam-se resinas epoxídicas, as quais permitem uma correta transferência de tensões entre o laminado de CFRP e o betão [1]–[3]. Não obstante, um dos maiores problemas associados à técnica EBR está relacionado com o desenvolvimento de elevadas tensões de corte na interface de ligação entre o betão e o CFRP, que promovem a rotura prematura do sistema de reforço [3]–[5]. A resistência da ligação é limitada pelo comprimento de amarração efetivo. Neste contexto, desenvolveram-se vários sistemas de ancoragem, dos quais se destacam as ancoragens mecânicas pelo facto de promoverem o aumento da capacidade de carga dos sistemas EBR com elevada eficiência. Adicionalmente, as ancoragens mecânicas permitem a imposição de tensões transversais de confinamento, que criam tensões de atrito e aumentam a eficiência da ancoragem [6]–[8].

Outra preocupação atual das estruturas de BA reforçadas com CFRP segundo a técnica EBR, centra-se no seu comportamento quando expostas a temperaturas elevadas. A rigidez e resistência destes sistemas é reduzida de forma acentuada na presença de temperaturas relativamente elevadas, normalmente, quando estas ultrapassam a temperatura de transição vítrea do adesivo epoxídico usado no reforço [9].

Este artigo tem como objetivo estudar o comportamento de um sistema de ancoragem mecânico comercial. O programa experimental inclui 14 provetes de arranque direto, em que a geometria do laminado, o nível de confinamento, a temperatura e a configuração de ensaio são investigados.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental é composto por 14 prismas de betão (200×500×800 [mm]), aos quais foi aplicado um laminado de CFRP de acordo com a técnica EBR. Adicionalmente, uma ancoragem mecânica foi utilizada para fixar na extremidade do laminado de CFRP através de seis parafusos M16 pré-esforçados, de forma a criar um nível confinamento transversal pré-determinado. Cada ancoragem mecânica, constituída numa liga metálica leve de elevada durabilidade, tem a geometria de 12×270×200 [mm]. As ancoragens mecânicas possuem seis furos com 18 mm de diâmetro. Os parafusos foram pré-esforçados com recurso a uma chave dinamométrica, tendo sido usados dois distintos momentos de aperto: 100 N·m e 150 N·m. Três diferentes laminados de CFRP foram utilizados, com as seguintes secções transversais: 50×1.2 [mm], 80×1.2 [mm] e 100×1.2 [mm].

A Figura 1 apresenta a geometria, configuração de ensaio e instrumentação de cada provete. Conforme é ilustrado, o laminado foi fixo ao betão num comprimento de 522 mm, dos quais 272 mm correspondem à chapa de ancoragem mecânica (zona MA). Nos restantes 250 mm, o laminado foi fixo ao betão segundo a técnica EBR (zona EBR).

Os provetes foram ensaiados segundo uma configuração de ensaio de arranque direto em (i) regime estacionário (RE) e (ii) em regime transiente (RT). No regime estacionário manteve-se a temperatura constante (20 °C, 60 °C e 80 °C) enquanto que se aumentou a força de arranque até à rotura do sistema. No regime transiente manteve-se a força de arranque constante (100 kN e 120 kN) enquanto que se aumentou gradualmente a temperatura. Os provetes foram agrupados em cinco séries, de acordo com o tipo de ensaio (RE20, RE60 e RE80 para os provetes ensaiados em regime estacionário às temperaturas de 20 °C, 60 °C e 80 °C, respetivamente; RT100 e RT120 para os provetes ensaiados em regime transiente com a força de 100 kN e 120 kN, respetivamente), conforme se apresenta no Quadro 1.

A cada provete foi atribuída uma designação **X_Y_Z**, onde **X** é a geometria do laminado (L50, L80 e L100 para os laminados com a secção transversal de 50×1.2 [mm], 80×1.2 [mm] e 100×1.2 [mm], respetivamente), **Y** correspondem ao momento de aperto aplicado aos parafusos M16 (T100 e T150 para os níveis de 100 N·m e 150 N·m, respetivamente) e **Z** é a série do provete (RE ou RT).

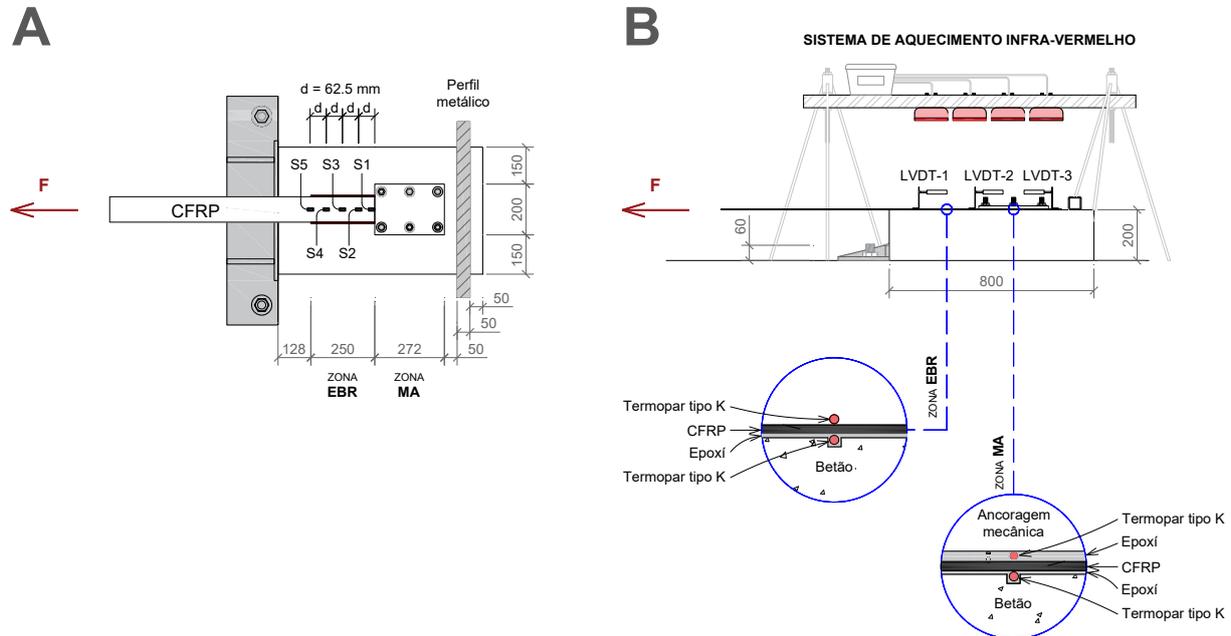


Figura 1. Geometria, instrumentação e configuração de ensaio: (A) vista superior e (B) vista lateral. Nota: unidades em [mm].

Quadro 1. Programa experimental

Série	Provete	Largura do laminado [mm]	Torque [N·m]	Configuração de ensaio
RE20	L50_T100_RE20	50	100	R. Estacionário
RE20	L50_T150_RE20	50	150	R. Estacionário
RE20	L80_T100_RE20	80	100	R. Estacionário
RE20	L80_T150_RE20	80	150	R. Estacionário
RE20	L100_T100_RE20	100	100	R. Estacionário
RE20	L100_T150_RE20	100	150	R. Estacionário
RE60	L100_T100_RE60	100	100	R. Estacionário
RE60	L100_T150_RE60	100	150	R. Estacionário
RE80	L100_T100_RE80	100	100	R. Estacionário
RE80	L100_T150_RE80	100	150	R. Estacionário
RT100	L100_T100_RT100	100	100	R. Transiente
RT100	L100_T150_RT100	100	150	R. Transiente
RT120	L100_T100_RT120	100	100	R. Transiente
RT120	L100_T150_RT120	100	150	R. Transiente

2.1 Caracterização dos materiais

Na presente secção são apresentadas as propriedades geométricas e mecânicas dos materiais utilizados no programa experimental, nomeadamente do betão e do laminado de CFRP. No contexto da avaliação das propriedades mecânicas do betão, foram realizados ensaios de compressão. A avaliação do módulo de elasticidade (E_{cm}) e da resistência à compressão (f_{cm}) foi realizada de acordo com as recomendações

LNEC E397-1993:1993 [10] e NP EN 12390-3:2011 [11], respetivamente. Os ensaios de caracterização do betão foram realizados à mesma data que os ensaios de arranque direto. Os resultados obtidos na caracterização mecânica do betão encontram-se presentes no Quadro 2. Em geral, observa-se que os valores dos coeficientes de variação são baixos, tanto para os valores de resistência à compressão como para o módulo de elasticidade, indiciando uniformidade das amostras e elevado controlo de qualidade na execução dos provetes.

Quadro 2. Propriedades mecânicas do betão. Nota: os valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV).

Série	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à compressão [MPa]
RE20	30.8 (2.8%)	33.4 (4.3%)
RE60, RE80, RT 100, RT120	32.8 (0.7%)	45.0 (1.2%)

Os laminados de CFRP utilizados (S&P Laminate CFK [12]) possuem um volume de fibras superior a 68%, sendo a matriz em vinilester [12]. De forma a caracterizar estes compósitos, foram realizados ensaios de tração uniaxial a seis amostras de cada tipo de laminado. A caracterização das amostras de CFRP foi realizada em conformidade com a ISO 527-5:2009 [13], tendo-se obtido os seguintes resultados: (i) o laminado com 50×1.2 [mm] apresentou um módulo de elasticidade (E_f) de 176.4 GPa (CoV=2.0%) e uma tensão de rotura (f_f) de 2222.4 MPa (CoV=4.7%); (ii) no caso do laminado com 80×1.2 [mm] obteve-se $E_f=174.5$ GPa (CoV=1.1%) e $f_f=2867.9$ MPa (CoV=1.6%); (iii) finalmente para o laminado com 100×1.2 [mm] obteve-se $E_f=178.3$ GPa (CoV=11.5%) e $f_f=2867.9$ MPa (CoV=16.7%).

As propriedades mecânicas do adesivo epoxídico usado para fixar os laminados (S&P Resin 220 [14]) não foram determinadas no contexto deste trabalho. Segundo a sua ficha técnica, o epóxi possui uma resistência à compressão superior a 70 MPa e um módulo de elasticidade superior a 7.1 GPa [14]. As propriedades mecânicas em tração deste adesivo foram determinadas noutros estudos ([15], [16]), nos quais se verificou que a resistência à tração é igual a 22.0 MPa (CoV=4.5%), o módulo de elasticidade igual a 7.2 GPa (CoV=3.7%) e a temperatura de transição vítrea, T_g , igual a 47.2 °C (segundo a ISO 6721 [17]).

2.2 Configuração de ensaio e instrumentação

Tal como referido anteriormente, o programa experimental incluiu 14 provetes com as características referidas no Quadro 1, ensaiados segundo duas configurações de ensaio de arranque direto: (i) regime estacionário e (ii) em regime transiente.

Em regime estacionário, os provetes são aquecidos até que, na zona MA (ancoragem mecânica), seja atingida a temperatura predefinida (60 °C ou 80 °C). Em seguida, os provetes são ensaiados em controlo de deslocamento, a uma velocidade de 0.3 mm/min. Depois do laminado na zona EBR se destacar do betão, a velocidade do ensaio é posteriormente aumentada para 2.0 mm/min. O ensaio termina quando ocorre rotura do provete (deslizamento ou rotura do laminado).

Em regime transiente, os provetes são inicialmente mantidos durante três horas a 30 °C, de forma a promover uma uniformização dos ensaios, nomeadamente similar cura do epóxi. Posteriormente, no laminado é aplicada uma força predefinida (100 kN ou 120 kN). Depois, mantendo a força constante, a temperatura no provete é aumentada até ao valor máximo (80 °C, na zona MA). Caso a temperatura máxima (80 °C) seja atingida e não se verifique rotura no provete, a temperatura máxima e força são mantidas durante uma hora.

O sistema de aquecimento (ver Figura 1) é composto por quatro aquecedores de radiação infravermelha, que são controlados por um termostato. Por sua vez, o termostato utiliza um termopar localizado entre o betão e o CFRP, a meio da chapa de ancoragem (zona MA). O sistema de aquecimento foi dimensionado de forma a que a temperatura máxima (80 °C) fosse atingida num intervalo de tempo

relativamente curto (dos 20 °C aos 80 °C em cerca de 170 min) e de forma a que a temperatura fosse uniforme em toda a zona EBR e em toda a zona MA. Contudo deve ser referido que, nos ensaios a elevadas temperaturas (séries: RE60, RE80, RT100 e RT120), a temperatura na zona EBR foi inferior à temperatura na zona MA. Quando a temperatura na zona MA era igual a 60 °C e 80 °C, na zona EBR a temperatura era igual a 53 °C e 66 °C, respetivamente.

A instrumentação adotada incluiu 3 LVDTs (*Linear Variable Differential Transducers*), conforme ilustrado na Figura 1, com o objetivo de registar o deslocamento relativo (deslizamento) entre o laminado de CFRP e o betão. Um LVDT foi colocado no início da zona EBR (LVDT-1), um segundo foi colocado no final da zona EBR (LVDT-2), e o terceiro foi colocado depois da chapa de ancoragem mecânica (LVDT-3). Cinco extensómetros (referência TML BFLA-5-3) foram colados na zona EBR, de forma equidistante (S1 a S5 na Figura 1) de modo a registar as extensões durante o ensaio. A temperatura foi registada com recurso a termopares tipo K, que foram colocados a meio da zona MA e a meio da zona EBR, conforme é ilustrado na Figura 1. Também foi utilizada uma célula de carga com capacidade máxima de 300 kN para medir a força aplicada.

2.3 Preparação dos provetes

A preparação dos provetes seguiu o seguinte protocolo:

1. Numa fase inicial procede-se ao tratamento da camada superficial de betão com recurso a jato de areia, com o objetivo de remover a leitada de cimento e expor os agregados. No final desta etapa recorre-se a ar comprimido para limpar a superfície tratada;
2. De seguida foram realizados seis furos nos prismas de betão com vista à instalação de varões M16 roscados necessários para a instalação das chapas de ancoragem mecânica. Usou-se novamente ar comprimido como forma de proceder à limpeza dos furos e, em seguida, utilizou-se o adesivo químico HIT HY 200-A® para fixar os varões ao betão;
3. Posteriormente o adesivo epóxi foi preparado de acordo com as recomendações do seu fabricante, enquanto o laminado foi limpo com acetona. O adesivo epóxi foi aplicado na superfície do laminado de CFRP, bem como na superfície de betão em contacto com o mesmo e na chapa de ancoragem;
4. Depois o laminado foi posicionado e ligeiramente pressionado contra a superfície de betão com recurso a espaçadores, com o objetivo de se ter uma espessura próxima dos 1-2 mm;
5. Finalmente, a chapa de ancoragem foi instalada e os varões M16 foram pré-esforçados com uma chave dinamométrica de modo a assegurar o momento de aperto pré-definido. Os provetes foram mantidos em ambiente de laboratório (20 °C de temperatura e 55% de humidade relativa) durante 7 dias antes de serem ensaiados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio em regime estacionário

A título ilustrativo, na Figura 2 é apresentada a evolução do deslocamento relativo entre o CFRP e betão durante o ensaio de arranque direto, nos provetes L100_T100_RE20 e L100_T100_RE60. As respostas obtidas durante os ensaios são representativas do comportamento observado nos restantes provetes ensaiados em regime estacionário (L100_T100_RE20 para série RE20; e L100_T100_RE60 para séries RE60 e RE80). Todos os ensaios em regime estacionário apresentam inicialmente com um ramo quase linear da relação entre a força, F , e o deslizamento medido no início da zona EBR, s_{LVDT-1} . Com o destacamento do laminado na zona EBR, o valor de s_{LVDT-1} aumenta enquanto que a força permanece sensivelmente constante. O destacamento completo do laminado na zona EBR é atingido quando o LVDT-2, localizado no final da zona EBR, ao qual está associado o respetivo deslizamento (s_{LVDT-2}), começa a registar valores. A partir deste instante, regista-se a evolução do deslizamento em toda a zona

EBR (LVDT-1 e LVDT-2) e a força é suportada exclusivamente pela ancoragem mecânica (zona MA). Nesta etapa dos ensaios, distintos comportamentos são observados para os ensaios a temperatura ambiente (RE20) e a temperatura elevada (RE60 e RE80): os provetes da série RE20 apresentam um aumento dos valores de s_{LVDT-1} e s_{LVDT-2} até à rotura do CFRP, quando este atinge a sua resistência última. Durante esta fase, o LVDT-3 regista valores praticamente nulos. Em contraste, nos ensaios a temperaturas elevadas (série RE60 e RE80), os deslizamentos registados com o LVDT-1 e LVDT-2 aumentam com a força até ocorrer o deslizamento do laminado ao longo de toda a ancoragem mecânica (zona MA). Imediatamente após o início deste deslizamento, o LVDT-3 começa a registar valores crescentes enquanto a força F diminui. Contudo, haverá que realçar que a força não decresce até zero, mas estabiliza a num valor de resistência residual que depende do nível de confinamento. Resultados semelhantes encontram-se reportados na literatura, e.g. [6], [18].

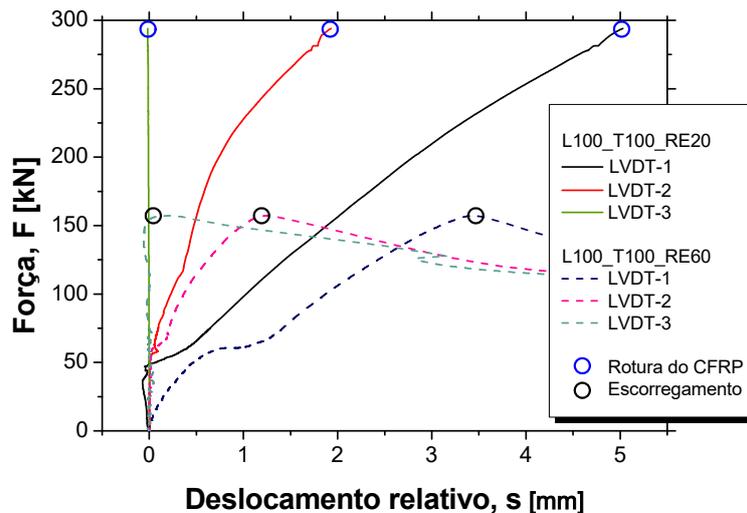


Figura 2. Evolução do deslocamento relativo entre o CFRP e o betão durante um ensaio de arranque direto em regime estacionário (L100_T100_RE20 e L100_T100_RE60)

A Figura 3 apresenta a força correspondente ao destacamento do laminado (a vermelho), a força máxima atingida (a preto) e extensão máxima (a verde) registada durante o ensaio. No âmbito do presente artigo a força de destacamento do laminado é a força máxima suportada pela zona EBR, antes da ancoragem mecânica ser solicitada. Deve ser referido que nos ensaios em regime estacionário à temperatura ambiente o destacamento do CFRP na zona EBR é um evento rápido, contudo facilmente identificado através do LVDT-2 e extensómetro S1 (ver Figura 1). Segundo a CNR [2] o comprimento de amarração efetivo para o presente caso (l_e) é aproximadamente 200 mm e a força de destacamento esperada no laminado 50×1.2 [mm], 80×1.2 [mm] e 100×1.2 [mm] é igual a 27 kN, 43 kN e 53 kN, respetivamente. Conforme pode ser observado na Figura 3, os resultados experimentais estão de acordo com os resultados estimados analiticamente.

Contrariamente ao observado na série RE20, nos ensaios a elevadas temperaturas, para a configuração de ensaio utilizada, desde praticamente o início do ensaio, a força de arranque é suportada por ambas as zonas (EBR e MA). Isto deve-se ao facto de, nestes casos, o comprimento utilizado ser inferior ao efetivo, que aumenta com o aumento da temperatura, visto que a rigidez do adesivo diminui. Por outro lado, constata-se que a temperatura também afeta o tipo de rotura da ligação (zona EBR): nos ensaios a temperatura ambiente verifica-se uma rotura adesiva na interface betão/epóxi (ver Figura 4C), enquanto que em ensaios realizados a temperaturas elevadas a rotura da ligação foi mista (adesiva na interface betão/epóxi + coesiva no adesivo epoxídico), conforme é apresentado na Figura 4D.

Tal como foi referido anteriormente, nos ensaios realizados a temperatura ambiente (série RE20) observou-se a rotura do laminado de CFRP (ver Figura 4A), pelo facto de se ter atingido a sua resistência à tração. Contudo, no provete L80_T150_RE20, obteve-se uma rotura precoce em virtude do laminado

de CFRP ter deslizado no dispositivo de fixação (amarra), através do qual era aplicada a força de arranque. Adicionalmente, um problema técnico no sistema de aquisição impediu a leitura do valor máximo da força quando ocorreu rotura no CFRP do provete L100_T150_RE20. Nos provetes ensaiados a temperaturas elevadas a força máxima foi observada quando o laminado deslizou da chapa de ancoragem mecânica (ver Figura 4B). Verificou-se uma redução na força máxima de 58.4% e 44.5% para os provetes das séries RE60 e RE80, respetivamente, por comparação com os resultados obtidos à temperatura ambiente. Esta redução está associada à mudança do tipo de rotura. Contrariamente à rotura frágil obtida nos ensaios da série RE20, nos provetes a temperaturas elevadas observa-se uma rotura “dúctil” em que a força decresce para um valor residual igual a 60.5-66.2% da força máxima. Este valor residual é uma consequência das forças de atrito que se desenvolvem no interior da ancoragem mecânica. Como era esperado, o valor da resistência residual é superior nos ensaios realizados com o nível de momento de aperto mais elevado, i.e. para o valor de 150 N·m (125.1 kN e 84.9 kN para os provetes L100_T150_RE60 e L100_T150_RE80, respetivamente) por comparação com o valor de 100 N·m (103.3 kN e 75.7 kN para os provetes L100_T100_RE60 e L100_T100_RE80, respetivamente). Constata-se também que o momento de aperto influencia no valor de força máxima (f_u) e extensão máxima (ϵ_u) nos provetes ensaiados a 60 °C e 80 °C: o aumento deste momento de aperto de 100 N·m para 150 N·m, produziu um aumento na f_u de 20.3% e 14.5% nos provetes ensaiados a 60 °C e 80 °C, respetivamente. Não obstante, nesta campanha experimental, a temperatura apresentou-se como o parâmetro que mais influenciou os ensaios de arranque direto. Os ensaios realizados a 60 °C e 80 °C tiveram uma redução na f_u de 41.5%-55.5% e uma diminuição na ϵ_u de 45.1%-64.5%.

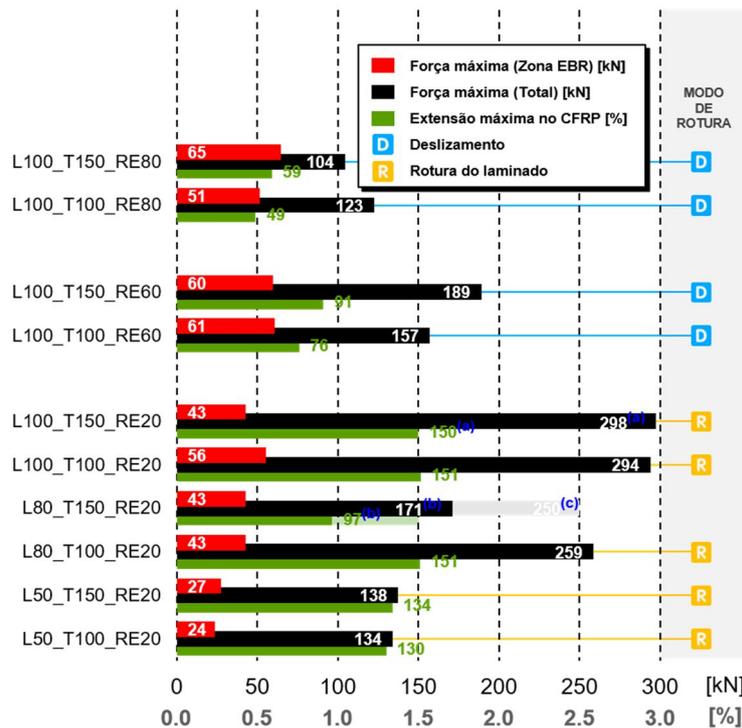


Figura 3. Resultados principais. Nota: ^(a) a força máxima não foi registada devido a um problema técnico no sistema de aquisição – estes valores correspondem aos resultados esperados; ^(b) este provete teve rotura precoce no dispositivo de fixação; ^(c) valor máximo esperado.

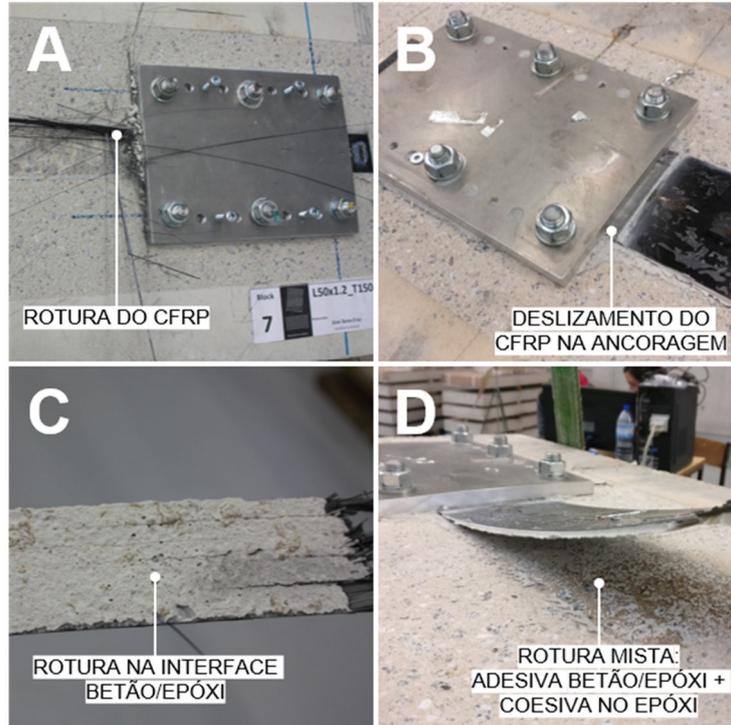


Figura 4. Modos de rotura: (A) rotura do CFRP no provete L50_T150_RE20; (B) deslizamento do CFRP na ancoragem no provete L100_T150_RE80; (C) detalhe da rotura (zona EBR) na interface betão/epóxi no provete L50_T100_RE20; e (D) detalhe da rotura (zona EBR) mista no provete L100_T150_RE80.

3.2 Ensaio em regime transiente

Nos testes em regime transiente utilizaram-se dois níveis de carga (100 kN e 120 kN) tendo-se observado qual a temperatura máxima suportada pelo sistema de ancoragem. A evolução do deslocamento relativo entre o betão e o CFRP (deslizamento) é apresentada na Figura 5. Na Figura 5 é também apresentado o instante em que a temperatura máxima predefinida é atingida (t_f) e o instante em que ocorre a rotura no provete (t_u). Em todos os ensaios realizados em regime transiente, observou-se uma rotura por deslizamento do laminado na ancoragem mecânica (ver Figura 4B).

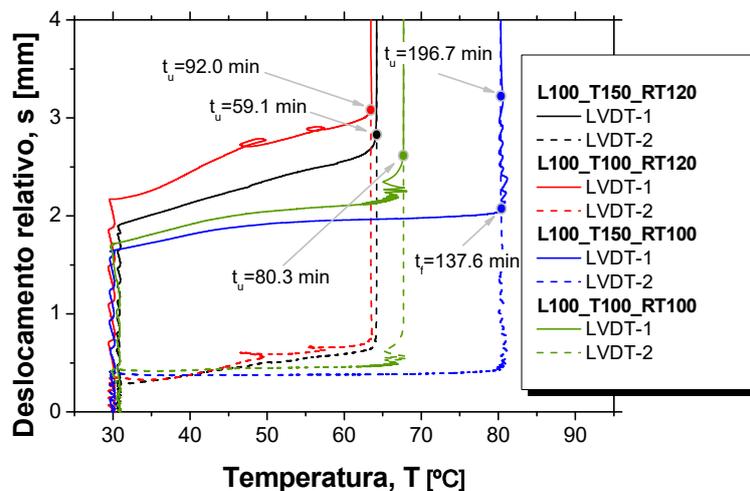


Figura 5. Evolução do deslocamento relativo entre o CFRP e o betão durante um ensaio de arranque direto em regime transiente.

Nos ensaios realizados com o menor valor de força aplicada (100 kN), o nível de confinamento, promovido pelo momento de aperto imposto aos parafusos M16, foi um fator decisivo na capacidade da ancoragem mecânica: o provete com o nível de confinamento menor (L100_T100_RT100) apresenta uma temperatura na rotura igual a 67.7 °C, enquanto que o provete com o nível de confinamento maior (L100_T150_RT100) não só atingiu a temperatura máxima predefinida (80 °C) como suportou estas condições durante uma hora.

Os restantes dois provetes, testados com o valor de força aplicado de 120 kN, apresentaram rotura por deslizamento na ancoragem breves instantes após a temperatura aplicada ter ultrapassado o T_g . Na rotura, o provete L100_T100_RT120 rompeu para uma temperatura igual a 63.4 °C, enquanto que o provete L100_T150_RE120 rompeu para uma temperatura igual a 64.2 °C. Assim, concluiu-se que para este nível de carga, o nível de confinamento tem uma menor influência sobre a resistência da ancoragem mecânica.

4. CONCLUSÕES

A campanha experimental apresentada no presente artigo teve como objetivo estudar o comportamento de um sistema de ancoragem mecânico comercial. Catorze ensaios de arranque direto, em regime estacionário e transiente, foram realizados em prismas de betão eternamente reforçados com laminados de CFRP, segundo a técnica EBR. Através da campanha experimental realizada foi possível obter as seguintes conclusões:

1. Independentemente do nível do momento de aperto imposto aos parafusos da ancoragem, o sistema permitiu o aproveitamento total da capacidade do laminado de CFRP quando o ensaio se realiza temperatura ambiente.
2. Nos ensaios realizados em regime estacionário distintos modos de rotura foram observados: (i) a temperatura ambiente (série RE20) obteve-se rotura do sistema pelo CFRP, quando este esgotou a sua capacidade resistente; (ii) a temperaturas elevadas (séries RE60 e RE80) obteve-se deslizamento do CFRP na ancoragem mecânica. A mudança do tipo de rotura representou uma redução de 58.5% e 44.5% na força máxima suportadas pelos provetes ensaiados a 60 °C (serie RE60) e a 80 °C (série RE80), respetivamente.
3. Constatou-se uma boa correlação entre os valores experimentais e esperados da força de destacamento do laminado na zona EBR, nos provetes ensaiados a temperatura ambiente, por comparação com a bibliografia existente;
4. Nos ensaios realizados em regime transiente dois distintos comportamentos foram observados: (i) nos provetes da série RT100 (força menor), a rotura ocorreu por deslizamento na ancoragem, havendo uma influência considerável do nível de confinamento imposto na ancoragem; (ii) nos provetes da série RT120 (força maior), a rotura por deslizamento na ancoragem foi observada breves instantes após a temperatura T_g do epóxi ter sido excedida, independentemente do nível de confinamento.
5. O momento de aperto aos parafusos que compõem a ancoragem foi a ferramenta utilizada para controlar o nível de confinamento nesta e, tendo por base os resultados obtidos, esta ferramenta aparenta ser um fator relevante na resistência da ancoragem.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apoiado pela FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competividade – COMPETE e fundos nacionais, através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia sob o projeto FRPLongDur POCI-01-0145-FEDER-016900 (FCT PTDC/ECM-EST/1282/2014). Este trabalho é também cofinanciado através do Programa Operacional Fatores de Competitividade e internacionalização (POCI), pelo projeto POCI-01-0145-FEDER-00763. Os autores gostariam também de agradecer à empresa S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda., que forneceu os materiais. O segundo autor deseja também agradecer a bolsa SFRH/BD/98309/2013, atribuída pela FCT. O terceiro autor

deseja agradecer ao governo espanhol (*Ministerio de Educación, Cultura y Deporte*) pela bolsa José Castillejo ref. CAS16/00288.

REFERÊNCIAS

- [1] ACI 440.2R-08, *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures*. 2008.
- [2] CNR, “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures.” 2013.
- [3] L. Correia, T. Teixeira, J. Michels, J. A. P. P. Almeida, and J. Sena-Cruz, “Flexural behaviour of RC slabs strengthened with prestressed CFRP strips using different anchorage systems,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 81, pp. 158–170, 2015.
- [4] R. Kotynia, R. Walendziak, I. Stoecklin, and U. Meier, “RC Slabs Strengthened with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips under Monotonic and Cyclic Loading.” *J. Compos. Constr.*, 2011.
- [5] J. Sena-Cruz, L. Correia, G. Escusa, E. Pereira, J. Michels, and P. M. França, “Effect of distinct environmental actions on the durability of RC slabs strengthened with prestressed CFRP laminate strips,” in *Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, SEMC 2016*, 2016.
- [6] H. C. Biscaia, C. Chastre, and M. A. G. Silva, “Bond-slip model for FRP-to-concrete bonded joints under external compression,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 80, pp. 246–259, Oct. 2015.
- [7] International Federation for Structural Concrete (fib), “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures,” Lausanne, Switzerland, 2001.
- [8] C. S. Hansen, J. W. Schmidt, and H. Stang, “Transversely compressed bonded joints,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 2, pp. 691–701, 2012.
- [9] J. P. Firmo, J. R. Correia, D. Pitta, C. Tiago, and M. R. T. Arruda, “Experimental characterization of the bond between externally bonded reinforcement (EBR) CFRP strips and concrete at elevated temperatures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 60, no. Supplement C, pp. 44–54, 2015.
- [10] LNEC, “LNEC E397-1993:1993,” 1993.
- [11] IPQ - Instituto Portugues da Qualidade; *NP EN 12390-3:2011*. Caparica, 2011.
- [12] S&P, “CFRP laminates, technical datasheet,” Seewen, Switzerland, 2014.
- [13] Iso-527-5, “Plastics—determination of tensile properties – Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites,” *London Br. Stand. Inst.*, 1997.
- [14] S&P, “Resin 220 epoxy adhesive, technical datasheet,” Seewen, Switzerland, 2013.
- [15] P. P. Silva *et al.*, “Effects of different environmental conditions on the mechanical characteristics of a structural epoxy,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 88, pp. 55–63, Mar. 2016.
- [16] P. M. da Silva, “Time-dependent behaviour and durability of RC slabs strengthened with NSM CFRP strips,” University of Minho, 2017.
- [17] ISO/TC 61/SC 5 Physical-chemical properties, “ISO 6721. Plastics – determination of dynamic mechanical properties – part 1: general principles; part 5: flexural vibration – non-resonance method,” Genève, 2001.
- [18] L. Correia, J. Sena-Cruz, J. Michels, P. M. França, E. Pereira, and G. Escusa, “Durability of RC slabs strengthened with prestressed CFRP laminate strips under different environmental and loading conditions,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 125, pp. 71–88, 2017.