

Comportamento em situação de incêndio de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP instalados em rasgos: ensaios de resistência ao fogo e simulações numéricas

Fire behaviour of reinforced concrete beams strengthened with CFRP strips installed into slits: fire resistance tests and numerical simulations

João Pedro Firmo
Mário Rui Arruda
João Ramôa Correia

Resumo

Neste artigo apresenta-se um estudo experimental e numérico sobre o comportamento em situação de incêndio de vigas de betão armado (BA) reforçadas à flexão com laminados de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) instalados em rasgos no betão de recobrimento (técnica NSM). Foram realizados ensaios de resistência ao fogo em vigas reforçadas e protegidas com isolamento térmico de espessura variável ao longo do comprimento. No estudo numérico foram desenvolvidos modelos de elementos finitos 3D para simular os ensaios; foi considerada a variação com a temperatura das propriedades térmicas e mecânicas dos materiais constituintes; a interação CFRP-adesivo-betão foi modelada através de leis bilineares tensão de corte vs. escorregamento, calibradas anteriormente. Os resultados experimentais e numéricos mostraram que é possível explorar a contribuição mecânica do CFRP durante mais de 90 minutos de exposição ao fogo, desde que se aplique isolamento térmico, com espessura maior nas zonas de ancoragem do reforço.

Palavras-chave: Reforço de betão armado / Polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) / Comportamento estrutural ao fogo / Simulação numérica / Sistemas de proteção ao fogo

Abstract

This paper presents experimental and numerical investigations about the fire behaviour of reinforced concrete (RC) beams flexurally strengthened with carbon fibre reinforced polymer (CFRP) strips applied according to the near surface mounted (NSM) technique. The experimental programme included fire resistance tests on NSM-CFRP strengthened RC beams that were protected with thermal insulation with varying thickness along their length. The numerical study comprised the development of 3D finite element models in order to simulate the fire resistance tests; the variation with temperature of the thermal and mechanical properties of the constituent materials was considered; the CFRP-adhesive-concrete interaction was modelled by means of bi-linear bond-slip laws previously calibrated by the authors. Both experimental and numerical results showed that it is possible to exploit the CFRP mechanical contribution for more than 90 minutes of fire exposure, provided that a thicker insulation is applied along the CFRP anchorage zones.

Keywords: Strengthening of reinforced concrete / Carbon fibre reinforced polymers (CFRP) / Structural behaviour under fire exposure / Numerical simulation / Fire protection systems

João Pedro Firmo

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

Mário Rui Arruda

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

João Ramôa Correia

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

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

FIRMO, J. [et al.] – Comportamento em situação de incêndio de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP instalados em rasgos: ensaios de resistência ao fogo e simulações numéricas. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 5. ISSN 2183-8488. (novembro 2017) 7-16.

1 Introdução e objetivos

O reforço de estruturas de betão armado através da colagem de materiais compósitos de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) tem apresentado uma utilização crescente nas duas últimas décadas, sobretudo devido às vantagens que esta técnica apresenta em relação às tradicionais, das quais se destaca a elevada resistência à tração, a leveza, a durabilidade e a facilidade de aplicação. Tipicamente, estes sistemas são constituídos por mantas ou laminados de CFRP colados à superfície do elemento a reforçar com recurso a um adesivo epoxídico – técnica de aplicação denominada por EBR (do termo inglês *externally bonded reinforcement*). Mais recentemente, tem sido estudada e aplicada uma técnica alternativa, conhecida como NSM (do inglês *near surface mounted*), em que laminados, barras ou varões de CFRP são introduzidos em rasgos previamente executados no betão de recobrimento e preenchidos com um adesivo – a maior superfície de contacto e o facto de o CFRP se encontrar no interior do betão melhora substancialmente a eficácia da ligação colada, atrasa a ocorrência de descolamentos prematuros e protege o sistema de reforço do vandalismo e da ação do fogo [1]. Apesar de apresentarem um elevado potencial, estes sistemas suscitam preocupações relacionadas com o seu desempenho a temperaturas elevadas (independentemente da técnica de aplicação) [2]. De facto, a resistência, rigidez e propriedades adesivas dos CFRPs são severamente afetadas para temperaturas moderadamente elevadas [3], nomeadamente quando estas se aproximam da temperatura de transição vítrea (T_g) da matriz polimérica, que tipicamente varia entre 55 °C e 120 °C. A ligação entre o betão e o CFRP, materializada por adesivos epoxídicos, é igualmente afetada para temperaturas superiores à T_g do adesivo, que, em geral, é inferior à do CFRP, apresentando valores entre 45 °C e 80 °C. De facto, um estudo realizado pelos autores do presente artigo [4] sobre o comportamento da interface betão-CFRP a temperaturas moderadamente elevadas mostrou que a resistência da ligação entre estes materiais é reduzida em cerca de 70% a 90 °C (técnica de aplicação EBR; a T_g do adesivo utilizado era 47 °C). Além disso, observou-se o melhor desempenho do sistema de reforço quando aplicado segundo a técnica NSM, tanto a temperatura ambiente (com metade da área de CFRP obtiveram-se resistências 90% superiores) como a temperaturas elevadas (a 90 °C a resistência da ligação foi reduzida em 60%).

Ensaio de resistência ao fogo a elementos de betão armado reforçados com CFRP (e.g. [5,6]) comprovaram a suscetibilidade destes sistemas quando submetidos a um incêndio. Nestes estudos, apesar de não ter sido possível determinar com exatidão o valor da temperatura do CFRP no instante em que a sua ligação ao betão foi afetada, observou-se que o sistema de reforço perdeu a sua eficácia estrutural após poucos minutos de exposição ao incêndio. Estes estudos realçaram ainda a necessidade de desenvolver sistemas de proteção adequados para prolongar o tempo de resistência ao fogo do reforço. De facto, a regulamentação relativa ao dimensionamento de reforços em CFRP (e.g. [2, 7]) refere que a contribuição estrutural destes sistemas deve ser desprezada na combinação de ações que inclua o incêndio, a não ser que se comprove que, mediante a aplicação de sistemas de proteção ao fogo, a T_g do adesivo não é atingida. Contudo, presentemente, não existem documentos/

recomendações que auxiliem o dimensionamento desses sistemas de proteção ao fogo. Os autores deste artigo têm realizado diversos estudos sobre este tema (e.g. [8, 9]) com o objetivo de desenvolver uma metodologia de dimensionamento de sistemas de proteção ao fogo para elementos de betão armado reforçado com CFRP. Simplificadamente, essa metodologia consiste na aplicação de um material de isolamento térmico com maior espessura nas zonas de ancoragem/extremidade do CFRP, permitindo tirar partido do reforço mesmo quando a ligação ao betão se encontra comprometida pela ação térmica na zona central (menos protegida).

No presente artigo, apresentam-se os principais resultados obtidos numa campanha experimental em que a eficácia da referida metodologia foi avaliada através de ensaios de resistência ao fogo realizados em vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP e protegidos com placas de silicato de cálcio. Adicionalmente, foram desenvolvidos modelos de elementos finitos (EF) tridimensionais (3D) das vigas. Estes modelos, além de simularem a sua resposta termomecânica, permitiram quantificar um conjunto de grandezas que, em geral, são impossíveis de medir durante os ensaios. Estes resultados são essenciais para compreender com maior detalhe a eficácia estrutural do sistema de reforço durante a ação de um incêndio e validar a metodologia de proteção ao fogo adotada nos ensaios.

2 Descrição do programa experimental

2.1 Séries experimentais – descrição dos sistemas de reforço e de proteção ao fogo

A campanha experimental consistiu em ensaios de resistência ao fogo realizados a 4 vigas reforçadas à flexão com dois laminados de CFRP instalados segundo a técnica NSM, cuja geometria é apresentada na Figura 1. Os laminados de CFRP, com 1,10 m de comprimento, foram colocados no interior de 2 rasgos (com 15 mm de profundidade e 5 mm de largura) previamente executados no betão de recobrimento da face inferior das vigas. Sobre o sistema de reforço foram aplicados painéis de silicato de cálcio, cuja espessura variou entre 25 mm e 50 mm. Na nomenclatura adotada para as vigas, o primeiro número identifica a espessura (em mm) dos painéis na zona de ancoragem (T , Figura 1a) e o segundo a espessura (em mm) na zona central (t , Figura 1a). Assim, foram ensaiadas as seguintes vigas reforçadas: (i) 0-0; (ii) 25-0; (iii) 25-25 e (iv) 50-25.

Os laminados de CFRP (com denominação comercial S&P Laminates CFK 150/2000) apresentam uma secção transversal de 1,4 mm x 10 mm (espessura x largura); estes laminados foram introduzidos nos rasgos executados no betão de recobrimento, que foram previamente preenchidos com um adesivo epoxídico (denominação comercial S&P Epoxy Resin 220). As temperaturas de transição vítrea do CFRP ($T_g = 83$ °C) e do adesivo ($T_g = 47$ °C) foram determinadas através de análises mecânicas dinâmicas (taxa de aquecimento de 1 °C/min) com base no decaimento da curva do módulo de armazenamento. Em ensaios de flexão em 4 pontos de vigas realizados à temperatura ambiente verificou-se que o reforço descrito possibilitou um aumento de 110% da capacidade resistente.

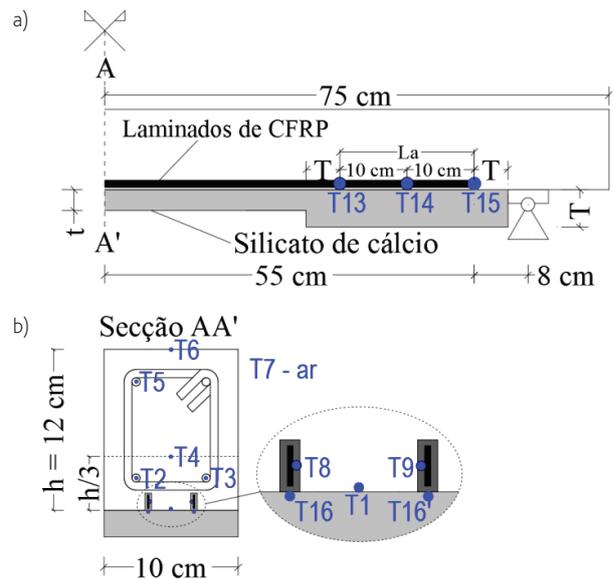


Figura 1 Geometria das vigas reforçadas à flexão com um laminado de CFRP e posicionamento dos termopares: a) vista em alçado; b) detalhe da secção de meio vão

O sistema de proteção ao fogo é constituído por placas de silicato de cálcio, com a denominação comercial *Promatect L500*, apresentando as seguintes propriedades à temperatura ambiente: massa volúmica $\rho = 450$ kg/m³; condutibilidade térmica $k = 0,083$ W/m.°C; e calor específico $C_p = 0,82$ J/g °C. A fixação das placas à face inferior das vigas foi efetuada com recurso a mástique refratário e finas chapas de aço em forma de U, aparafusadas às faces laterais das vigas e com afastamento aproximado de 25 cm. Tal como se observa na Figura 1, a espessura da proteção pode variar ao longo do comprimento do reforço. Nas extremidades do laminado, foram aplicadas as placas de maior espessura (T) ao longo do comprimento $T + La + T$ (Figura 1a), em que $La = 20$ cm corresponde ao comprimento de amarração, calculado de acordo com [2]. Esta metodologia de proteção tem como objetivo possibilitar que se tire partido da contribuição mecânica do reforço através do comportamento tipo "cabo"/"tirante" após a ligação betão-CFRP ser comprometida na zona central (menos protegida).

2.2 Sistema de ensaio, instrumentação e procedimento

As vigas foram colocadas simplesmente apoiadas sobre um forno vertical, num esquema de flexão em quatro pontos, como ilustrado na Figura 2. As cargas foram aplicadas por intermédio de uma viga de transmissão, na qual foram suspensos pesos em ambas as extremidades. A ação térmica foi aplicada apenas na face inferior das vigas e ao longo do comprimento do reforço.

As vigas foram instrumentadas com 16 termopares do tipo K (posicionamento na Figura 1) para medição da temperatura ao longo do tempo de exposição ao incêndio. Note-se que os termopares T8 a T15 (Figura 1) foram posicionados a meia altura dos rasgos

efetuados no betão de recobrimento. O deslocamento a meio vão foi monitorizado com recurso a um transdutor de fio, posicionado na face superior da viga.

A primeira fase do ensaio consistiu na aplicação do carregamento gravítico; a segunda fase iniciou-se após o período para estabilização do deslocamento das vigas (30 min) e consistiu na imposição da ação térmica do incêndio padrão definido na norma ISO 834 [10], que especifica uma curva temperatura vs. tempo. Refira-se que a carga gravítica foi mantida constante ao longo dos ensaios. Relativamente ao valor do carregamento aplicado, adotou-se a regra simplificada do Eurocódigo 2, parte 1-2 [11], que sugere a aplicação de 70% do valor da carga de dimensionamento, que, no presente estudo, foi estimada de acordo com [2]. A carga aplicada durante os ensaios (14,8 kN) correspondeu a 37% da carga de rotura obtida à temperatura ambiente e a 144% da carga de dimensionamento de uma viga não reforçada. Este último valor mostra que, para que seja verificada a segurança em situação de incêndio, é necessário incluir a contribuição do reforço para a resistência do elemento estrutural. Estas relações de cargas foram propositadamente adotadas para mostrar que é possível tirar partido da contribuição do sistema de reforço durante tempos de exposição compatíveis com os tipicamente exigidos na regulamentação de segurança contra o fogo em edifícios.

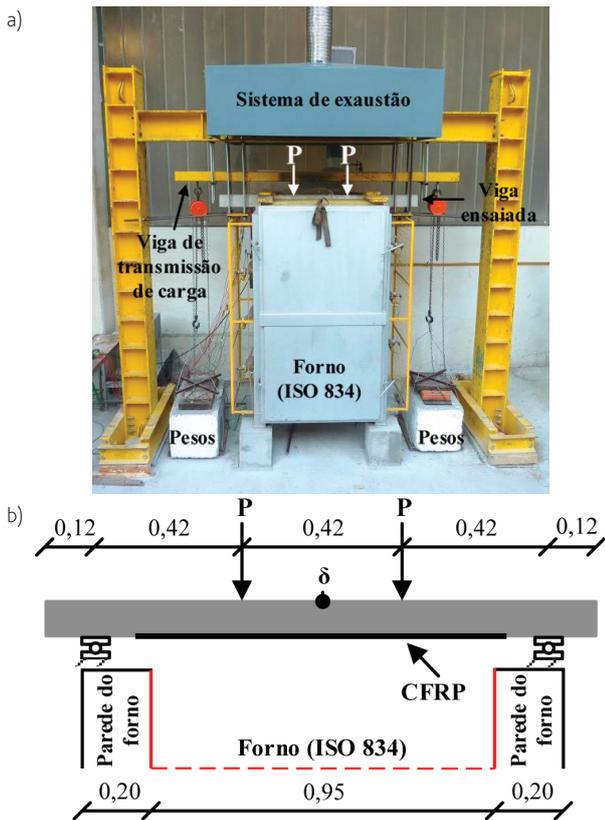


Figura 2 Sistema de ensaio: a) vista geral do esquema de ensaio; b) posicionamento das cargas

3 Resultados dos ensaios de resistência ao fogo

3.1 Distribuição de temperaturas

Na Figura 3a) exemplifica-se a distribuição de temperaturas ao longo do tempo obtida na viga 25-0. Como esperado, a temperatura do adesivo na secção central da viga (termopar T8) foi consideravelmente superior às registadas na zona de ancoragem (T13 a T15), onde foi aplicada a proteção de 25 mm. Note-se que após 20 minutos de ensaio a temperatura no adesivo (T8) aumentou a uma taxa consideravelmente superior; este comportamento deverá estar relacionado com a fendilhação do betão na zona onde foi colocado este sensor. As temperaturas nas armaduras de tração (T2) apresentaram valores relativamente reduzidos (sempre inferiores a 350 °C), pelo que durante este ensaio a degradação das suas propriedades mecânicas poderá considerar-se reduzida.

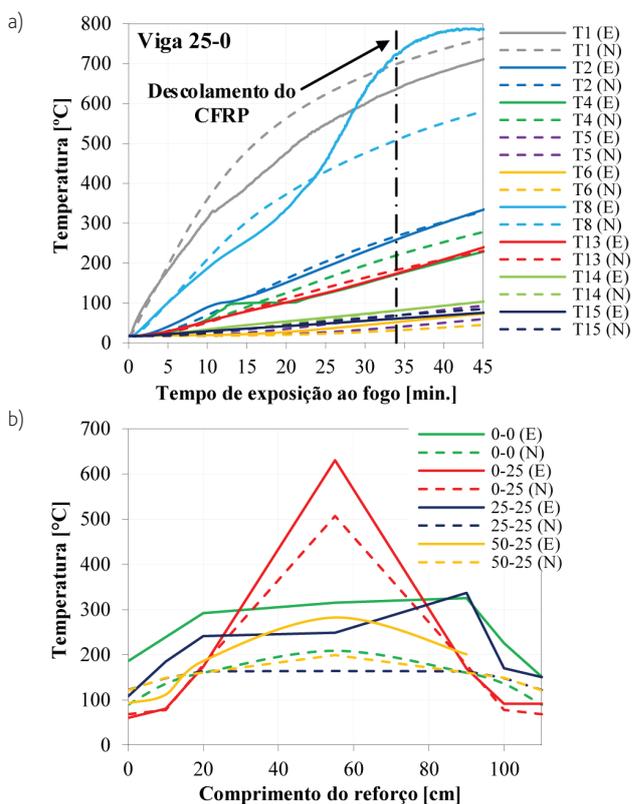


Figura 3 a) Evolução das temperaturas ao longo do tempo de exposição na viga 25-0; b) temperaturas no adesivo no instante do descolamento do laminado (todas as vigas ensaiadas) (E-experimental; N-numérico)

Na Figura 3b) ilustram-se as distribuições de temperatura no adesivo ao longo do comprimento do reforço no instante do seu descolamento (este instante foi determinado com base na Figura 4b, como será referido na secção 3.2). A distribuição de temperaturas na viga 25-0 destaca-se das restantes por apresentar valores mais elevados na zona central, onde não foi aplicado qualquer sistema de

proteção. Por sua vez as temperaturas médias no adesivo na zona de ancoragem no instante do descolamento do reforço (Figura 4a), apesar de apresentarem alguma dispersão, são consideravelmente superiores à T_g do adesivo, variando entre 111 °C ($2,4 T_g$) e 236 °C ($5,0 T_g$). Este resultado mostra que o valor da temperatura limite considerado nos regulamentos (igual à T_g do adesivo) é bastante conservativo quando se recorre à técnica de reforço NSM.

3.2 Evolução do deslocamento a meio vão

A Figura 4b) ilustra a evolução do deslocamento a meio vão das vigas em função do tempo de exposição ao fogo. Como esperado, as temperaturas elevadas causaram a perda de rigidez de todos os materiais constituintes, refletindo-se num aumento do deslocamento ao longo do tempo. Nas vigas protegidas com placas de silicato de cálcio ao longo de toda a extensão do reforço (vigas 25-25 e 50-25), a temperatura aumentou mais lentamente e, conseqüentemente, a taxa de aumento de deslocamento foi inferior à registada nas restantes. Na Figura 4b) observa-se que as curvas registaram um aumento acentuado do deslocamento, o qual está associado ao descolamento do reforço. A perda de eficácia estrutural dos laminados de CFRP teve como consequência a diminuição instantânea da rigidez das vigas, pelo que, a partir desse instante, o declive das curvas foi superior.

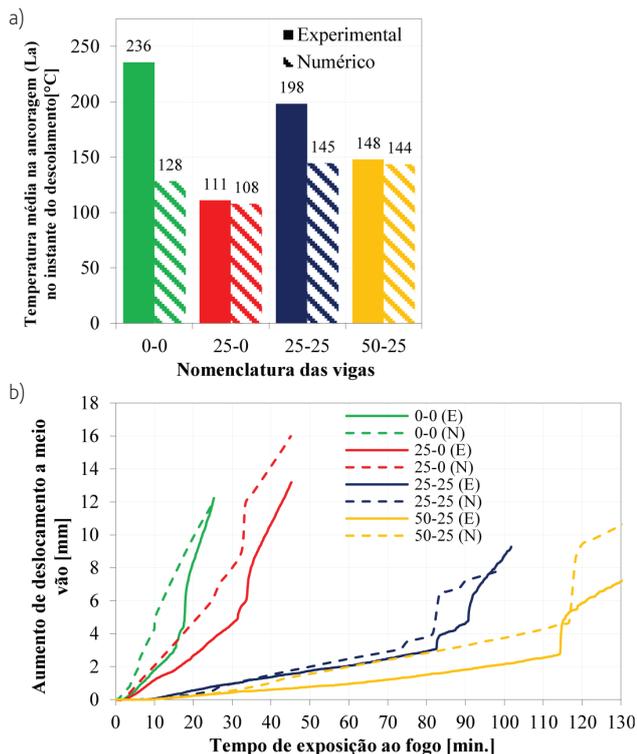


Figura 4 a) Temperaturas médias na zona de ancoragem (L_a) no instante do descolamento; b) aumento de deslocamento a meio vão em função do tempo de exposição (E-experimental; N-numérico)

No caso das vigas desprotegida (0-0) e com proteção apenas na zona de ancoragem (25-0), após o descolamento dos laminados, as respetivas curvas de deslocamento exibiram um declive superior ao das restantes; nas vigas 25-25 e 50-25 as placas de silicato de cálcio aplicadas em todo o comprimento continuaram a isolar termicamente o elemento mesmo após a rotura do reforço e, por esse motivo, o declive das curvas é inferior ao das vigas referidas anteriormente.

3.3 Modo de rotura e tempo de resistência do reforço

Nas Figuras 5a) e 5b) apresentam-se, respetivamente, as faces inferiores das vigas 0-0 e 50-25 após os ensaios de resistência ao fogo. Na primeira viga (Figura 5a) é possível observar a coloração negra devida à ignição e decomposição térmica do CFRP. Constatou-se igualmente a destruição/decomposição do adesivo de colagem em grande parte do comprimento do reforço. Apesar de a observação visual do modo de rotura do reforço ter sido dificultada pelo facto de os laminados de CFRP se encontrarem inseridos em rasgos no betão, concluiu-se que a perda de eficácia estrutural do reforço ocorreu por deslizamento dos laminados no interior dos rasgos. A Figura 5b) mostra que apesar de o sistema de proteção estar fendilhado, a fixação mecânica impediu o seu destacamento, prolongando a eficácia do reforço durante todo o ensaio.

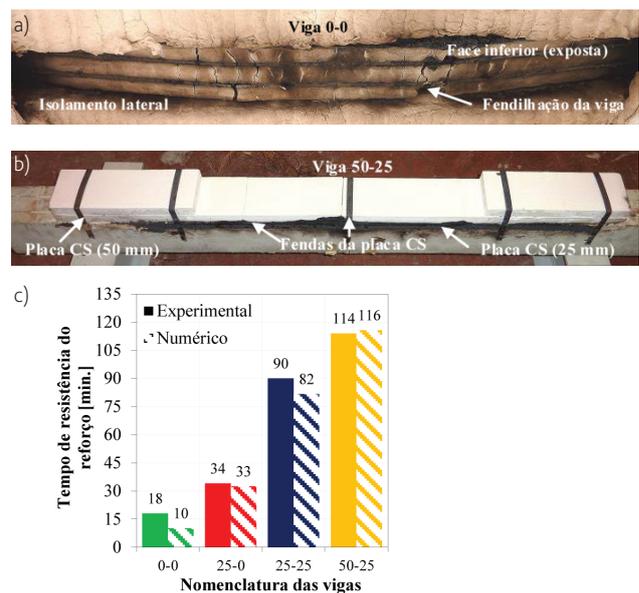


Figura 5 Modos de rotura do reforço a) na viga 0-0 e b) na viga 50-25; c) tempos de resistência ao fogo do reforço

Na Figura 5c), onde se apresentam os tempos de resistência ao fogo do reforço (tempo de exposição até ao descolamento dos laminados), constata-se, como esperado, que a aplicação dos sistemas de proteção conduziu a um aumento significativo nos tempos de resistência, obtendo-se em duas das vigas tempos de resistência do reforço superiores a 90 minutos (compatível com a grande maioria das exigências regulamentares). Comparando o

tempo de resistência do reforço da viga 25-0 (34 min) com o da viga 25-25 (90 min), constata-se a importância da aplicação da proteção na zona central do reforço. Não obstante, observa-se que o aumento da espessura na zona de ancoragem conduziu a um incremento do tempo de resistência do reforço não desprezável (de 90 min na viga 25-25 para 114 min na viga 50-25); este resultado mostra que a utilização desta metodologia de proteção poderá permitir uma poupança substancial de material e de custos.

3.4 Comparação com resultados anteriores em vigas EBR

A Figura 6 compara os principais resultados da presente campanha experimental com os obtidos anteriormente em ensaios de resistência ao fogo realizados em vigas constituídas pelos mesmos materiais (incluindo a proteção ao fogo), mas sendo o sistema de reforço instalado de acordo com a técnica EBR (descrição detalhada disponível em [12]). Como se observa na Figura 6a, o descolamento do sistema de reforço EBR ocorreu para temperaturas na ancoragem significativamente inferiores às obtidas nas vigas NSM, sendo apenas ligeiramente superiores à T_g do adesivo de colagem (variando entre $1,1 T_g$ e $1,4 T_g$). O pior comportamento ao fogo da técnica de reforço EBR é evidente na Figura 6b, onde se constata que para todos os sistemas de proteção testados, os tempos de resistência do sistema EBR são consideravelmente inferiores aos obtidos nas vigas equivalentes reforçadas com o sistema NSM. A Figura 6b evidencia ainda que o aumento de espessura do isolamento nas zonas de ancoragem é uma medida de proteção mais eficaz nas vigas EBR do que nas NSM – comparando as vigas 0-0 (desprotegidas) com as 25-0, o aumento relativo no tempo de exposição ao fogo até ao descolamento do reforço é superior na técnica EBR. Além disso, observa-se que no sistema NSM o isolamento térmico aplicado na zona central do reforço conduz a um aumento significativo do tempo de resistência (de 34 min na viga 25-0 para 90 min na viga 25-25), enquanto no sistema EBR esse aumento é praticamente desprezável (de 15 min na viga 25-0 para 18 min na viga 25-25). Este resultado deverá estar relacionado com os diferentes mecanismos de transferência de tensões entre a zona central e as ancoragens do reforço – são necessários mais estudos que permitam compreender melhor este comportamento.

Os resultados apresentados nesta secção, além de comprovarem o melhor desempenho ao fogo da técnica de reforço NSM, permitem concluir que os critérios de dimensionamento da espessura do sistema de proteção nas zonas de ancoragem que permitam tirar partido do comportamento “tipo cabo” devem ser distintos nas técnicas EBR e NSM: enquanto na técnica EBR o valor da T_g do adesivo de colagem parece ser um valor indicativo apropriado para a temperatura limite a atingir durante o tempo de exposição pretendido, na técnica NSM $2 \times T_g$ parece ser um valor mais adequado.

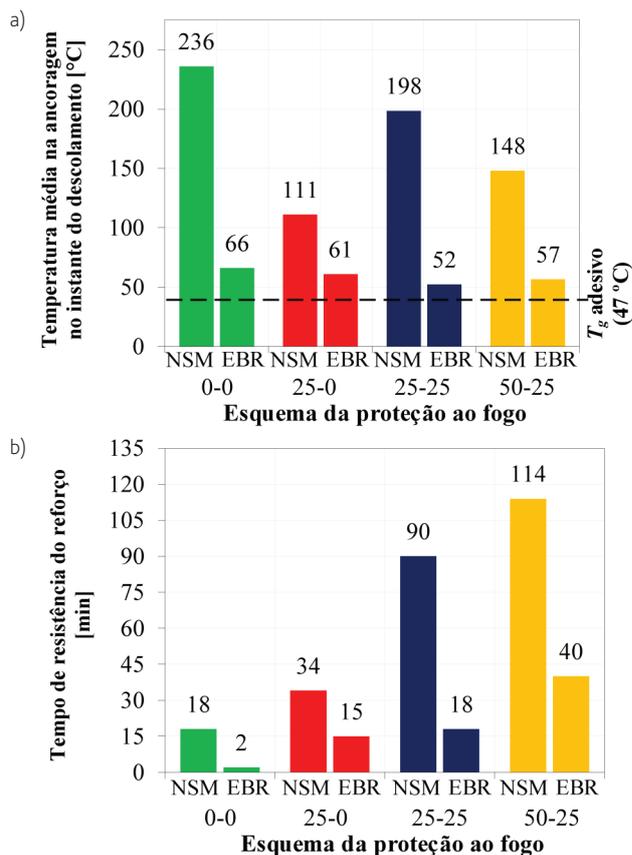


Figura 6 Comparação do comportamento ao fogo dos sistemas de reforço NSM e EBR (resultados anteriores disponíveis em [12]): a) temperatura média ao longo do comprimento de ancoragem no instante de descolamento do reforço; b) tempo de resistência do sistema de reforço

4 Simulação numérica

4.1 Descrição dos modelos

O estudo numérico apresentado neste artigo consistiu na simulação do comportamento termomecânico das vigas descritas anteriormente quando sujeitas à ação simultânea de um carregamento gravítico e do incêndio padrão. Além de simular o comportamento observado experimentalmente, estes modelos tiveram como objetivos (i) compreender com maior detalhe a eficácia estrutural do sistema de reforço durante a ação do fogo e (ii) validar a metodologia de proteção adotada na campanha experimental. Para tal, foram elaborados modelos de elementos

finitos (EF) tridimensionais (3D) das vigas (Figura 7a) com recurso ao software ABAQUS. Tirando partido da bissetria das vigas, foi possível modelar apenas metade do seu comprimento e largura, recorrendo-se a uma malha de EF com 12 mm de dimensão máxima. Os materiais betão, CFRP e silicato de cálcio foram modelados com elementos hexaédricos de 8 nós; para as armaduras de aço, foram utilizados elementos de barra (2 nós). O adesivo de colagem não foi explicitamente modelado, mas o seu efeito foi considerado como se descreve adiante.

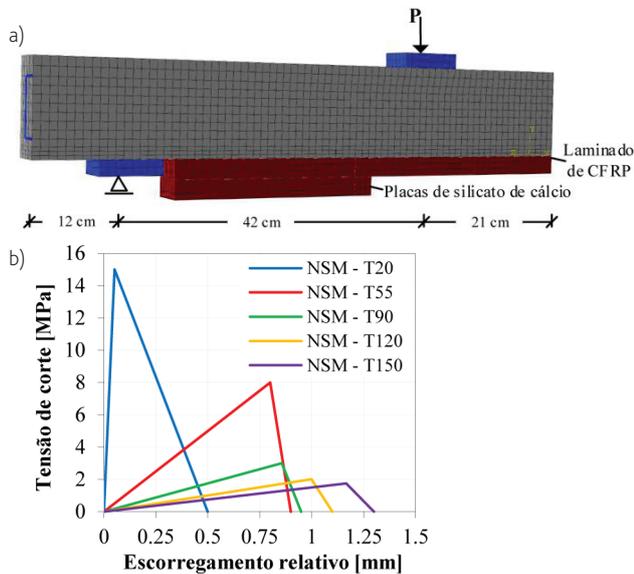


Figura 7 a) Esquema da malha de EF; b) relações constitutivas da interface betão-CFRP em função da temperatura consideradas nos modelos [4]

Os modelos numéricos consideraram a variação com a temperatura das propriedades termofísicas (calor específico, massa volúmica, condutibilidade e emissividade) e mecânicas de todos os materiais modelados; a descrição detalhada das referidas propriedades pode ser consultada em [13]. Relativamente aos modelos constitutivos, para o betão foi adotado um modelo de dano com plasticidade, para o aço foi assumido um comportamento elasto-plástico perfeito e para o CFRP foi definida uma lei de comportamento elástica linear (isotrópica). A ligação entre o aço e o betão foi assumida como rígida, enquanto para a interface betão-CFRP foram definidas as leis globais bilineares “tensão de corte vs. escorregamento relativo” indicadas na Figura 7b). Estas leis, calibradas recentemente pelos autores [4] com base em ensaios de aderência betão-CFRP e da respetiva modelação numérica (previamente aos ensaios de resistência ao fogo aqui descritos), consideram a degradação da ligação betão-

-CFRP com a temperatura até 150 °C; para temperaturas superiores a este valor não é considerada qualquer interação de corte entre os dois materiais.

A resposta das vigas foi simulada através de uma análise termomecânica sequencial desacoplada: no primeiro passo é calculada a distribuição de temperaturas (de 10 em 10 segundos) ao longo do tempo de exposição ao fogo, ao qual se segue uma análise mecânica estática, que considera a evolução de temperaturas calculada no passo anterior. O deslocamento inicial das vigas (para $t = 0$ s, ainda sem imposição de temperatura) foi calculado considerando incrementos de 1% da carga total aplicada, enquanto que a sua evolução ao longo do tempo foi estimada através de incrementos de 0,01 s.

4.2 Comparação com os resultados experimentais

A Figura 3a) ilustra a distribuição de temperaturas ao longo do tempo de exposição ao fogo obtida no modelo da viga 25-0 (curvas numéricas identificadas por N); apesar do andamento mais irregular das curvas experimentais (curvas E), observa-se, em geral, uma boa concordância entre os valores registados nos ensaios e os calculados numericamente. Relativamente à temperatura no termopar T8, a diferença entre os resultados numéricos e experimentais deve-se ao facto de o modelo numérico não simular o efeito (local) da fendilhação da viga que se observou nos ensaios (como referido na secção 3.1). Em relação às distribuições de temperaturas na interface betão-CFRP no instante do descolamento do reforço (instante estimado com base nas curvas da Figura 4b), constata-se que os modelos preveem temperaturas inferiores nas zonas de ancoragem do reforço em relação às obtidas nos ensaios; esta observação é particularmente evidente na Figura 4a), que ilustra a média desses valores. Nesta figura, conclui-se ainda que as temperaturas médias na zona de ancoragem no instante do descolamento do reforço são consideravelmente superiores à T_g do adesivo, variando entre 108 °C ($2,3 \times T_g$) e 144 °C ($3,1 \times T_g$), sendo, por isso, próximas das registadas nos ensaios, que variaram entre 111 °C ($2,4 \times T_g$) e 236 °C ($5,0 \times T_g$). No que diz respeito às temperaturas das vigas 0-0 e 25-25, a discrepância entre resultados experimentais e numéricos apresentados nas Figuras 3b) e 4a), além de estar associada à dificuldade em garantir o posicionamento de todos os termopares à mesma profundidade (meia profundidade do rasgo, tal como indicado na Figura 1b), pode explicar-se pela complexidade do comportamento da ligação entre o betão e o reforço: o gradiente térmico na profundidade do rasgo faz com que a temperatura na secção do reforço não seja uniforme; o desempenho da ligação colada poderá ainda ser afetado (positivamente) pelo eventual efeito de confinamento devido à expansão térmica do betão e do próprio adesivo.

A Figura 4b) apresenta as curvas de evolução do deslocamento a meio vão obtidas numericamente (identificadas por N), onde é possível observar declives superiores aos das curvas experimentais (curvas E); este andamento distinto (mais rígido) pode dever-se (i) a diferenças entre as propriedades reais dos materiais e as modeladas e (ii) à existência de algum atrito horizontal nos apoios das vigas durante os ensaios, efeito que não foi considerado nos modelos numéricos. Não obstante, os modelos permitiram prever com elevada precisão o instante de descolamento do reforço, sobretudo tendo em conta a complexidade dos fenómenos em causa; a boa concordância geral com os resultados experimentais é também evidente na Figura 5b).

4.3 Verificação do comportamento tipo "cabo" do CFRP

Os ensaios de resistência ao fogo evidenciaram que a aplicação de um sistema de proteção com maior espessura de isolamento nas zonas de ancoragem do CFRP permite incrementar o tempo de resistência ao fogo do reforço. Contudo, na campanha experimental não foi possível observar (nem medir) se esta metodologia de proteção permitiu explorar o comportamento tipo "cabo" do reforço. Os resultados numéricos apresentados na Figura 8 complementam os resultados experimentais e fornecem evidências desse tipo de comportamento. Nesta figura representa-se a evolução da tensão de corte média na interface betão-CFRP nas zonas central e de ancoragem do CFRP. Consta-se que nas vigas protegidas com isolamento de maior espessura nas extremidades do reforço (vigas 25-0 e 50-25), a partir de determinado instante (ex., 27 min na viga 50-25), as tensões de corte na zona central começam a tender para zero, sendo que esta diminuição coincide com um aumento das tensões na zona de ancoragem. Este resultado evidencia a transferência de tensões de corte entre a zona central e as extremidades do reforço, demonstrando, assim, o comportamento tipo "cabo" do CFRP e validando a metodologia de proteção ao fogo adotada. Este tipo de comportamento já tinha sido observado pelos autores em sistemas de CFRP aplicados pela técnica EBR [4].

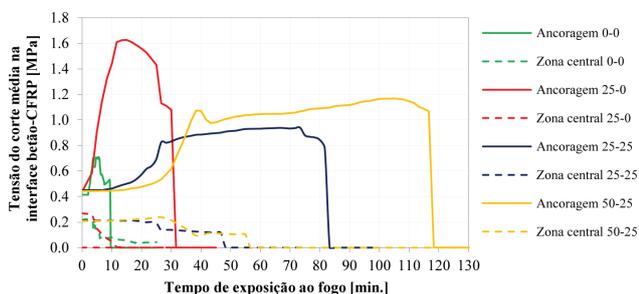


Figura 8 Evolução das tensões de corte médias na interface betão-CFRP nas zonas de vão e de ancoragem do CFRP

5 Conclusões

Após a realização da campanha experimental apresentada neste artigo, foi possível concluir que a temperatura crítica para a qual o sistema de reforço em CFRP aplicado segundo a técnica NSM perde eficácia estrutural foi consideravelmente superior ao valor da T_g do adesivo de colagem, variando entre $2,4 \times T_g$ e $5,0 \times T_g$ – estas temperaturas são significativamente superiores às obtidas em vigas idênticas mas reforçadas de acordo com a técnica EBR, que variaram entre $1,1 \times T_g$ e $1,4 \times T_g$. Além disso, estes resultados mostram que o valor da temperatura limite considerado nos regulamentos (igual à T_g do adesivo) é bastante conservativo quando se recorre à técnica de reforço NSM.

Os esquemas de proteção propostos no presente artigo permitiram alcançar tempos de resistência ao fogo do sistema de reforço em CFRP superiores a 90 minutos, mostrando que, mediante a adoção de medidas de proteção adequadas, a utilização da técnica de reforço NSM pode ser compatível com as exigências regulamentares de segurança contra incêndio em edifícios.

Relativamente aos modelos numéricos desenvolvidos, para além de simularem com uma precisão considerável a resposta termomecânica das vigas, permitiram quantificar um conjunto de grandezas que, em geral, são impossíveis de medir durante ensaios de resistência ao fogo. Os resultados numéricos comprovaram que, com os esquemas de proteção de maior espessura na zona de ancoragem do CFRP e menor na zona central, é possível tirar partido do comportamento tipo "cabo" do reforço durante a ação do incêndio, validando assim a metodologia de proteção ao fogo proposta.

Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem às seguintes entidades/empresas: FCT (projeto FireComposite, PTDC/ECM EST/1882/2014) e CERIS, pelo financiamento concedido; S&P Clever Reinforcement Iberia, pelo fornecimento dos laminados de CFRP e do adesivo de colagem; HTecnic, pela ajuda na fabricação dos provetes; Secil e Unibetão, pelo fornecimento do betão. O primeiro e o terceiro autores agradecem ainda à FCT o apoio financeiro concedido através das bolsas de pós-doutoramento SFRH/BPD/108319/2015 e SFRH/BPD/99902/2014, respetivamente.

Referências

- [1] Barros, J.; Fortes, A. S. – "Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, no. 4, pp. 471-480, 2005.
- [2] ACI440-2R. – Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute; 76 p., 2008.

- [3] Mouritz, A. P.; Gibson, A. G. (2006) – *Fire Properties of Polymer Composite Materials*, Springer, 2006, 394 p.
- [4] Arruda M.R.T.; Firmo J.P.; Correia, J.R.; Tiago, C. – "Numerical modelling of the bond between concrete and CFRP laminates at elevated temperatures", *Engineering Structures*, Vol 110, pp. 233-243, 2016.
- [5] Firmo, J.P. – *Fire behaviour of reinforced concrete structures strengthened with CFRP strips*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 210 p., 2015.
- [6] Firmo, J. P.; Correia, J. R.; Bisby, L. A. – "Fire behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete structural elements: A state-of-the-art review", *Composites Part B*, Vol. 80, pp. 198-216, 2015.
- [7] CNR-DT 200 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, Council INR, Rome, 144., 2004.
- [8] Firmo, J. P.; Correia, J. R.; França, P. – "Fire behaviour of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates: Protection systems with insulation of the anchorage zones", *Composites Part B*, Vol. 43, no. 3, pp. 1545-1556, 2012.
- [9] López, C.; Firmo, J. P.; Correia, J. R.; Tiago, C. – "Fire protection systems for reinforced concrete slabs strengthened with CFRP laminates", *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 324-333, 2013.
- [10] ISO 834 – Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements, International Organization for Standardization, Geneve, 25 p., 1999.
- [11] EC2 – Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão, Parte 1-2: Regras gerais, Verificação da resistência ao fogo, IPQ, 109 p., 2010.
- [12] Firmo J.P.; Correia, J.R. – "Fire behaviour of thermally insulated RC beams strengthened with EBR CFRP strips: experimental study", *Composite Structures*, Vol. 122, pp. 144-154, 2015.
- [13] Firmo J.P.; Arruda, M.R.T.; Correia, J.R. – "Numerical simulation of the fire behaviour of thermally insulated RC beams strengthened with EBR-CFRP strips", *Composite Structures*, Vol. 126, pp. 360-370, 2015.
- [14] Arruda, M.R.T.; Firmo, J.P.; Correia, J.R.; Tiago, C. – "Numerical modelling of the bond between concrete and CFRP laminates at elevated temperatures", *Engineering Structures*, Vol 110, pp. 233-243, 2016.

