

## ADERÊNCIA ENTRE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO E O BETÃO



**Sofia Ribeiro**  
Assist. de Investigação  
LNEC  
Lisboa



**Erik Ulrix**  
Eng. Civil  
BIU Internacional Lda.  
Lisboa

### SUMÁRIO

Com o objectivo de avaliar a aderência entre compósitos reforçados com fibras de carbono (CFRP) e o betão foram efectuados ensaios de arrancamento por tracção (ensaio Pull-off) em vigas  $15 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$  de betão reforçadas numa das faces com CFRP, nas formas de laminado e folha. Foram utilizados dois betões de classe de resistência à compressão diferente. Antes da colagem do reforço, os provetes foram sujeitos a distintos tratamentos de superfície.

### 1. INTRODUÇÃO

A utilização de compósitos armados com fibras de carbono (CFRP) está a ocupar um lugar importante e cada vez mais frequente no reforço estrutural (Fig. 1).

Enquanto as características mecânicas, físicas e químicas dos compósitos são estabelecidas e garantidas pelo fabricante (certificação do produto e fabrico), a sua aplicação exige uma série de requisitos adicionais: tratamento da superfície de colagem do suporte, avaliação da resistência à tracção superficial do suporte; planicidade das zonas de intervenção, entre outros. Todos estes requisitos são da responsabilidade do empreiteiro, que terá de garantir o cumprimento das normas correctas de aplicação, a fim do trabalho responder adequadamente ao projecto de reforço.



Figura 1: Reforço de elementos de betão armado pela adição de compósitos CFRP nas formas de laminado e de folha

Na medida que seja possível transmitir aos empreiteiros e às entidades de fiscalização os conceitos da boa execução, os projectistas irão ganhar cada vez mais confiança, permitindo trabalhar com margens de segurança mais fiáveis, viabilizando cada vez mais a utilização destes novos materiais [1].

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa detém-se particularmente na variação do tratamento da superfície do betão para a aplicação do reforço exterior por colagem com CFRP, nas formas de laminado e de folha. A aderência entre o CFRP e o betão foi avaliada em vigas de  $15 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$ . Para o fabrico das vigas foram utilizados dois betões de classes de resistência à compressão diferentes: *C12/15* e *C30/37*. A aderência da ligação foi determinada pela tensão de rotura à tracção –  $f_{ct}$  – resultante do ensaio de arrancamento por tracção (*Bond* ou *Pull-off Test*), segundo o método descrito no prEN 1542, o qual prevê a realização de uma incisão circular no betão de suporte, com o diâmetro do disco de arranque ( $50 \text{ mm}$ ) e profundidade de  $15\text{-}20 \text{ mm}$ . A interface da ligação compósito-adesivo-betão foi observada ao microscópio electrónico de varrimento (MEV). O programa está inserido num projecto PRAXIS XXI [2].

### 2.1 Compósitos unidireccionais de carbono

Os sistemas laminado e folha foram fornecidos pela BIU – Internacional, Lda, sendo constituídos pelos seguintes produtos:

- laminado *CFK S & P 200/2000 B 100/1.4*, adesivo *ARTICOL*<sup>®</sup> e desengordurante;
- folha *S & P C-Sheet 240* e adesivo *MULTIPOX*<sup>®</sup>.

O laminado foi cortado à medida (significado da sigla *B*), apresentando a largura de  $b_L=100\text{mm}$  e a espessura de  $t_L=1,4\text{mm}$  ( $100/1.4$ ). Os números  $200/2000$  significam, respectivamente, os valores do módulo de elasticidade em GPa e da resistência à tracção na rotura em MPa do laminado. A força de tracção com alongamento de  $0,6/0,8\%$  é de  $168/224\text{kN}$  [3]. A resistência à tracção por flexão e à compressão, aos 28 dias, do adesivo *Articol* foi, respectivamente, de  $20\text{MPa}$  e  $45,1\text{MPa}$  [2].

A folha foi fornecida em rolo, com largura de  $b_F=300\text{mm}$  e comprimento de  $l_F=50\text{m}$ , tendo sido cortada à tesoura no laboratório, em troços de  $150\text{mm}$  de largura e  $550\text{mm}$  de comprimento. O número  $240$  significa o valor do módulo de elasticidade da folha, em GPa. O seu peso é de  $200\text{g/m}^2$ , com densidade de  $1,7\text{g/cm}^3$ . A resistência à tracção é de  $3900\text{MPa}$  e o alongamento na rotura de  $1,55\%$  [3]. O adesivo *Multipox* apresentou, aos 14 dias de idade, a resistência à tracção por flexão e à compressão, respectivamente, de  $22,9\text{MPa}$  e  $83,6\text{MPa}$  [2].

## 2.2 Preparação da superfície

A decapagem com jacto de água e abrasivos (*pressão do jacto*= $1,5\text{MPa}$ ) foi seleccionada por se tratar da metodologia especificada no prEN 1776, para o tratamento prévio da superfície do betão de referência. Foram utilizados dois tipos de abrasivo pelas seguintes razões: o pó de pedra por se tratar do abrasivo frequentemente utilizado no tratamento de superfícies de betão; uma areia por ser o material especificado na referida norma.

O tratamento da superfície do betão por desbaste superficial foi, também, utilizado por se tratar de outra metodologia correntemente utilizada, dada a facilidade de execução e bom rendimento de trabalho (Fig. 2).

Os tratamentos por picagem manual, martelo de agulhas, martelo pneumático e jacto de água a elevada pressão ( $>50\text{MPa}$ ) não foram considerados, face aos resultados desfavoráveis obtidos em estudos de outros autores [4-8]. De facto, Austin [6] constatou uma diferença significativa na intensidade de micro-fissuras introduzidas no betão superficial pelos diversos métodos de tratamento e/ou remoção do betão da superfície. Verificou que a decapagem com abrasivo e o jacto de água não introduz micro-fissuras no betão superficial como no caso da utilização do martelo pneumático. Com o martelo pneumático, os resultados dos seus ensaios conduziram a um decréscimo de cerca de  $50\%$  da resistência à tracção superficial do betão, determinada pelo ensaio de arrancamento por tracção – *Pull-off Test*.

O índice de rugosidade superficial foi determinado através do método da “altura de areia” (Fig. 3), segundo o procedimento descrito na secção 7 do prEN 1766. Como mostra a Tabela 1, globalmente verifica-se que a rugosidade diminui com o aumento da resistência à compressão do betão, sendo a decapagem com areia o método que produz superfícies mais rugosas. Verifica-se ainda que a granulometria da areia afecta os resultados.



Figura 2: Equipamento para desbaste superficial



Figura 3: Determinação da rugosidade pelo método da “coluna de areia”

Tabela 1 – Índice de rugosidade da superfície do betão

Areia [mm]	Decapagem c/ areia		Decap. c/ pó de pedra		Por desbaste	
	<i>C12/15</i>	<i>C30/37</i>	<i>C12/15</i>	<i>C30/37</i>	<i>C12/15</i>	<i>C30/37</i>
0,16-0,3	1,10	0,43	0,35	0,41	0,36	0,32
0,08-0,6	1,08	0,39	0,32	0,28	0,27	0,30
<0,08	1,05	0,37	0,29	0,28	0,21	0,22

## 2.3 Aplicação do CFRP em vigas de betão

### 2.3.1 Laminado

Após a limpeza, com o desengordurante, da face do laminado que iria ficar em contacto com o adesivo, procedeu-se à aplicação deste. O adesivo *ARTICOL*, de dois componentes, foi manualmente misturado até possuir uma consistência semelhante à de uma argamassa convencional (Fig. 4), tendo sido aplicado sobre o laminado com o auxílio de uma régua dentada (Fig. 5), de modo a permitir controlar a sua espessura. Da mistura foram extraídos provetes que foram ensaiados em laboratório.

Sobre a superfície do betão não foi aplicado nenhum tipo de primário. De imediato, procedeu-se manualmente à colagem do laminado, pressionando-o contra a superfície do betão com um rolo semi-rígido até expelir todo o excesso de adesivo e eliminar eventuais vazios introduzidos durante o seu espalhamento (Fig.6).



Figura 4: Aplicação do adesivo sobre o laminado



Figura 5: Remoção do adesivo em excesso com auxílio de uma régua dentada



Figura 6: Passagem de rolo semi-rígido sobre o laminado

### 2.3.2 Folha

Sobre a superfície do betão foi aplicado, a pincel, o adesivo *MULTIPOX*, em duas demãos, sem a aplicação prévia de um primário. Este adesivo possuía uma consistência semelhante à de uma calda de cimento convencional, necessária para permitir a impregnação da folha “in-situ”. Da mistura foram extraídos provetes para ensaio em laboratório. A folha foi desenrolada e cortada à medida com uma vulgar tesoura.

De imediato, procedeu-se à aplicação manual da folha sobre a superfície do betão. Com o auxílio de uma espátula de borracha, a folha foi pressionada, cuidadosamente, contra a superfície do betão para favorecer a sua impregnação, remover o excesso de adesivo e eliminar eventuais vazios introduzidos durante o seu espalhamento e/ou colagem da folha (Fig. 7). De seguida, o plástico protector que acompanha a folha foi retirado e aplicou-se a camada final do adesivo, em uma demão (Fig. 8). Optou-se por aplicar apenas uma camada de folha por cada viga de betão, tendo em conta os objectivos do estudo experimental.



Figura 7: Passagem de espátula de borracha e aplicação da última camada de adesivo



Figura 8: Remoção do plástico protector da folha para aplicação do adesivo

## 2.4. Resultados e análise

Na maioria dos ensaios, a rotura coesiva ocorreu no seio do betão (com excepção de 3 ensaios num total de 101 ensaios) (Fig. 9), como seria de esperar, uma vez que a resistência à tracção dos adesivos de colagem do laminado ( $f_{cm}^{flexão}=20MPa$ ) e da folha ( $f_{cm}=22,9MPa$ ) é muito superior à resistência à tracção superficial dos betões C12/15 ( $f_{cm}=1,0MPa$ ) e C30/37 ( $f_{cm}=2,3 MPa$ ).



Figura 9: Tipologia da rotura obtida nos ensaios de aderência – rotura coesiva no seio do betão

Poder-se-á considerar que o desbaste superficial não será o tratamento da superfície mais aconselhável para as aplicações do CFRP na forma de laminado. De facto, foi nesta situação que se verificou maior diferença nos valores médios da tensão de aderência, para ambos os betões (Fig. 10). Uma das possíveis causas desta diferença poderá estar relacionada com a menor facilidade do adesivo de colagem do laminado, de consistência elevada, penetrar no betão com menor índice de rugosidade (obtido por desbaste superficial). De facto, a impregnação superficial do betão aumenta a sua coesão superficial, que provoca uma rotura no seio do betão mais profunda e com maior área de contacto (por envolvimento de um maior número de agregados) e, conseqüentemente, a força de tracção necessária para que ocorra a rotura terá que ser superior.

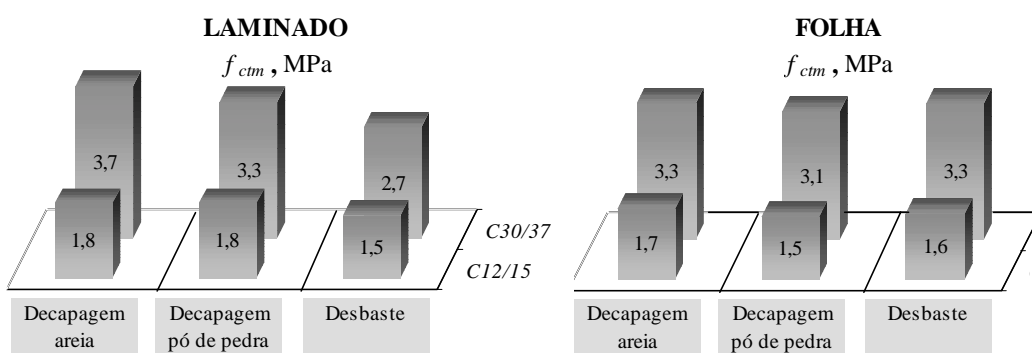


Figura 10: Valores médios da tensão de aderência ( $f_{ctm}$ ) do CFRP aplicado em vigas de betão (C12/15 e C30/37) para os diferentes tipos de tratamento da superfície do betão

As observações da micro-estrutura da ligação do adesivo-compósito-betão efectuadas sobre o reforço com laminado (Figs.11 e 12) confirmam a perfeita união entre os materiais de matriz polimérica (compósito e adesivo) e entre o adesivo polimérico e o betão, com ausência de vazios e de microfissuração na interface de ligação.

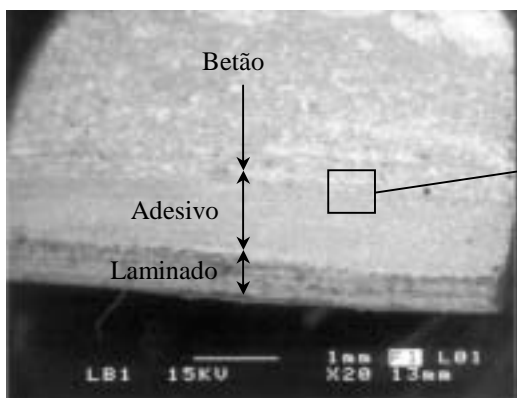


Figura 11: Observação da interface da ligação betão-adesivo-laminado. Imagem COMPO (x20)

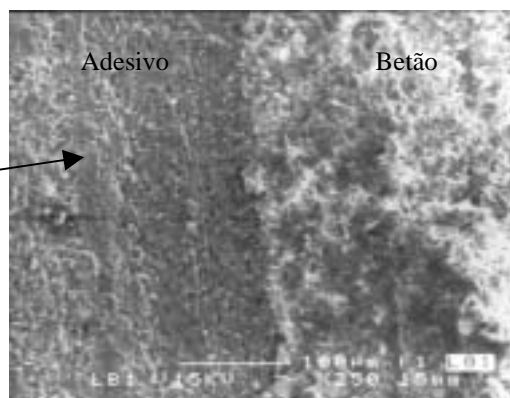


Figura 12: Observação da interface da ligação betão-adesivo. Imagem MEV (x250)

### 3. CONCLUSÕES

Nesta comunicação a resistência de aderência ao betão do CFRP foi determinada pelo ensaio de arrancamento por tracção (ensaio Pull-off). Na maioria dos ensaios, a rotura ocorre no seio do betão, como seria de esperar, dado que o adesivo e o compósito exibem, respectivamente, resistência à tracção cerca de 10 a 1000 vezes superior à do betão. O sistema do reforço do tipo laminado exige uma rugosidade superficial do betão superior ao do sistema da folha. Recomenda-se assim, para o sistema do laminado o tratamento da superfície com jacto de água e areia, enquanto para o sistema da folha qualquer dos 3 processos se pode utilizar. A boa execução do reforço com CFRP permite obter uma interface da ligação CFRP-adesivo-betão perfeita, com ausência de vazios e de microfissuração.

Do estudo salienta-se, também, não ser adequado reforçar com CFRP betões de baixa resistência à compressão (*C12/15*), pois não se consegue mobilizar a elevada capacidade resistente dos CFRP nas formas de laminado e de folha.

### 4. REFERÊNCIAS

- [1] Ulrix, E.; Van Gemert, D. et al – “Performance of Hybrid CFRP/Steel Strengthening of RC Constructions”, for presentation on 2<sup>nd</sup> International Conference on the Behaviour of Damage Structures, 2000, Brasil, 8 p.
- [2] Ribeiro, S; Gonçalves, A. – *Actividade Desenvolvida pelo NAB para a Realização da Tarefa 6 - Estudo da Aderência entre Compósitos Reforçados com Fibra de Carbono e o Betão*, Relatório XX/00 – NAB (em conclusão), LNEC, 2000, 37 p.
- [3] Documentos Técnicos da S&P sobre compósitos.
- [4] Juvandes, L. – *Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão usando Materiais Compósitos de “CFRP”*, dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP, 1999.
- [5] Petersen, C.; Poulsen, E. – “In-situ testing of near-to-surface layer of concrete and epoxy-bonded CFRP strips”, US-Canada – Europe Workshop on Bridge Engineering, Dubendorf and Zurich, 1997, 8 p.
- [6] Austin, S. et al, “Tensile bond testing of concrete repairs”, *RILEM, Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 28, 1995, p. 249-259.
- [7] Ohama, Y.; Puterman, M. editors - *Adhesion between Polymers and Concrete*, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International RILEM Symposium, edited by Dresden, Germany, 1999, 579 p.
- [8] Courard, L – “Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products”, *RILEM, Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 33, 2000, p. 65-72.

Artigo apresentado no congresso REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas – LNEC – Lisboa – 14 a 17 de Junho 2000

Repar2000Sofia.doc