

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO CFRP-RESINA-BETÃO SUJEITA A ACÇÕES CÍCLICAS

João Limão Marques (1)
Pedro Fong (2)
Pedro Macedo (2)
Carlos Chastre Rodrigues (3)
Válter Lúcio (4)

(1) Licenciado em Engenharia Civil na UNL, Mestrando do IST-UTL

(2) Licenciado em Engenharia Civil na UNL

(3) Assistente da UNL, Investigador do UNIC - Centro de Investigação em Estruturas e Construção da UNL

(4) Professor Associado da UNL, Investigador do UNIC - Centro de Investigação em Estruturas e Construção da UNL

SUMÁRIO

Nesta comunicação apresentam-se os resultados de um estudo experimental sobre o comportamento da ligação CFRP-RESINA-BETÃO, recorrendo a modelos experimentais em que se variaram diversos parâmetros. Alterou-se o tipo de modelo (betão simples ou armado), o tipo de ligação (com ou sem bucha em fibra de carbono) e o tipo de acção (cíclica ou monotónica), mantendo-se constante o tipo de betão e de armaduras utilizadas.

1. INTRODUÇÃO

A utilização crescente de materiais compósitos no reforço e/ou reparação de estruturas em regiões sísmicas obriga a um melhor conhecimento do comportamento destes materiais e, em especial, da ligação CFRP-RESINA-BETÃO. Diversos têm sido os trabalhos realizados sobre o comportamento da ligação AÇO-RESINA-BETÃO [1] ou CFRP-RESINA-BETÃO [2, 3], contudo são poucas as referências existentes a trabalhos realizados sobre o comportamento da ligação sujeita a acções cíclicas. Com este trabalho pretende-se dar um contributo para o estudo deste tema.

Na ligação CFRP-RESINA-BETÃO a rotura pode ocorrer pelos materiais ou pela interface entre estes. Por forma a que a rotura não ocorresse pelo compósito foram utilizadas três camadas de CFRP. Complementarmente, em alguns modelos, foram colocadas buchas de FRP o que condiciona o modo de rotura obtido. O principal objectivo deste trabalho experimental foi, assim, o de observar experimentalmente o comportamento dos modelos CFRP-RESINA-BETÃO variando diversos parâmetros e tentando quantificar a influência destes no comportamento da ligação sujeita a acções monotónicas ou cíclicas.

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio da Sika a qual forneceu a fibra de carbono e a resina epóxida utilizada.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais aplicados nos modelos de betão foram um tecido de fibra de carbono, SikaWrap-230C [5], aplicado com resina epóxida, Sikadur-330 [4], da Sika. Na Tabela 1 apresentam-se as características mecânicas das fibras de carbono, da resina e do betão utilizados.

Tabela 1- Características dos materiais

Resina (Sikadur-330) [4]	Fibra (SikaWrap-230C) [5]	Betão (EC2)
Tensão de rotura à tracção: 30 MPa Módulo de elasticidade: 3800 MPa	Módulo elasticidade: 230 GPa Resistência à tracção: 3500 MPa Extensão na rotura: 1,5%	f_{cm} : 37.7 MPa f_{ck} : 29.7 MPa f_{ctm} : 2.9 MPa E_{cm} : 31.9 GPa

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS E SISTEMA DE ENSAIO

3.1 Descrição e geometria dos modelos

Consideraram-se dois tipos de modelos de acordo com o betão utilizado, o *tipo 1*, constituído por dois prismas cúbicos de betão simples com as dimensões $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ e o *tipo 2*, constituído por prismas rectangulares de betão armado de dimensões $100 \times 150 \times 300 \text{ mm}^3$.



Figura 1: Vista geral dos modelos

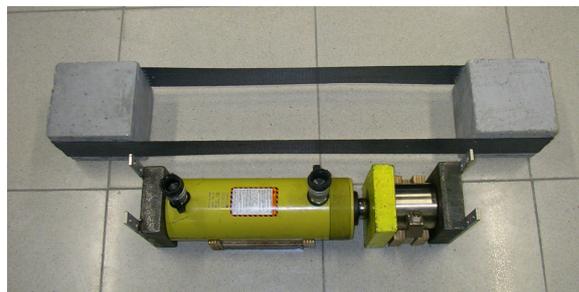


Figura 2: Pormenor de um dos modelos

Os modelos são constituídos por dois prismas de betão, ligados entre si, em duas faces opostas, por um compósito de CFRP composto por três camadas de tecido de fibra de carbono com $90 \times 90 \text{ mm}^2$ aplicado com resina epóxida. Em cada face dos prismas de betão o comprimento de aderência é de aproximadamente $90 \times 150 \text{ mm}^2$ e o afastamento entre os dois prismas é de 600mm. Nas Figuras 1 e 2 apresentam-se uma vista geral e um pormenor dos modelos ensaiados.

Em quatro dos modelos a ancoragem foi complementada com buchas constituídas por faixas rectangulares de tecido CFRP com $40 \times 110 \text{ mm}$. O tecido é aberto no seu comprimento em cerca de 50mm e é enrolado e impregnado com resina. Em seguida, numa profundidade de 60mm, o rolo de tecido é introduzido nos furos previamente realizados nos provetes. Os 50mm remanescentes são dispostos radialmente na superfície do provete conforme esquema apresentado na Figura 3.

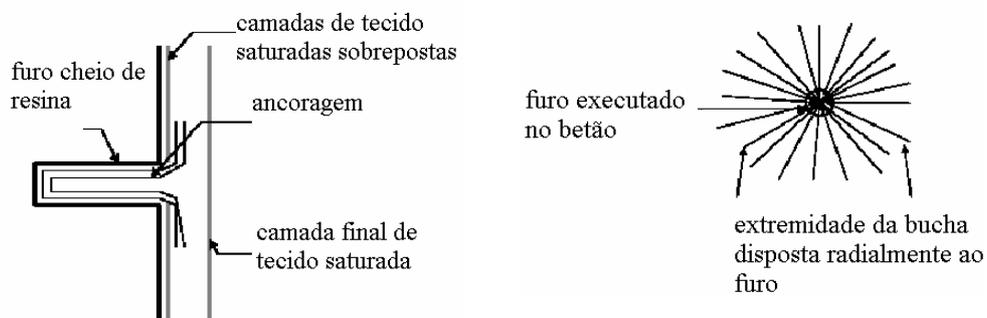


Figura 3: Secção e vista em planta do sistema de ancoragem com buchas de CFRP [6]

Na Tabela 2, apresentam-se as características dos modelos ensaiados. Quatro destes eram de betão simples e três de betão armado. Nos modelos de betão simples, dois foram ensaiados sem bucha e os outros dois com bucha, em ambos os casos cada tipo de ligação foi ensaiada sob acções monotónicas ou cíclicas. Nos modelos de betão armado, um foi ensaiado monotonicamente sem bucha e os restantes, ambos com bucha, um foi ensaiado sob acções monotónicas e o outro sob acções cíclicas.

Tabela 2: Características dos modelos

	Modelo	Tipo de betão	Tipo de ligação	Tipo de acção
Tipo 1	BS-M-SB-1	Simple	s/bucha	monotónica
	BS-C-SB-2	Simple	s/bucha	cíclica
	BS-M-CB-3	Simple	c/bucha	monotónica
	BS-C-CB-4	Simple	c/bucha	cíclica
Tipo 2	BA-M-SB-5	Armado	s/bucha	monotónica
	BA-M-CB-6	Armado	c/bucha	monotónica
	BA-C-CB-7	Armado	c/bucha	cíclica

Legenda: BA-betão armado; BS-betão simples; M-monotónico; C-Cíclico; SB-sem bucha; CB-com bucha

A preparação da superfície do betão foi realizada por desbaste superficial, com disco abrasivo, de forma a retirar a leitada superficial do betão até expor os agregados e conferir alguma rugosidade homogénea na zona de contacto com a resina epóxida.

3.2 Parâmetros analisados

Conforme se pode observar da Tabela 2, os parâmetros que se fizeram variar por forma a estudar a sua influência no comportamento da ligação CFRP-RESINA-BETÃO foram o tipo de provete de betão, com a existência ou não de armadura, o tipo de ligação, com ou sem bucha de FRP e o tipo de acção, monotónica ou cíclica. Tendo-se mantido constante o tipo de betão e de armaduras utilizadas e a área de ancoragem.

3.3 Sistema de ensaio

Os modelos foram ensaiados no Laboratório de Estruturas da FCT /UNL utilizando para o efeito um cilindro hidráulico RRH307 de duplo efeito da ENERPAC colocado no interior dos modelos (Figuras 2 e 4) e funcionando em conjunto com a bomba hidráulica GPEW 2020 WSN da ENERPAC com *load maintainer*. No interior dos modelos foram colocados para além do cilindro hidráulico, e de uma célula de carga, dois apoios que permitiam a aplicação da carga aos prismas de betão. Um dos apoios possuía uma rótula esférica que permitia anular eventuais momentos transmitidos ao sistema.

A instrumentação foi constituída por uma célula de carga de 300kN, MT – KCM/300 da Microtest e por um LVDT de 100mm, CDP100 da TML, cujos dados foram adquiridos através de um Data logger Centipede100 da HBM e de um PC portátil. O LVDT (Figura 4) foi colocado de forma a medir o deslocamento relativo entre os prismas de betão.

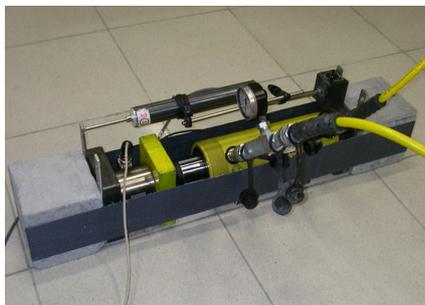


Figura 4: Aspecto geral do sistema de ensaio

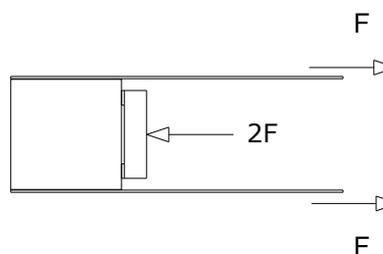


Figura 5: Diagrama de forças do ensaio

Conforme esquematizado na Figura 5, os valores de força F correspondem à força em cada faixa de CFRP. O deslocamento Δ_1 é o deslocamento ocorrido em cada superfície de aderência. Este deslocamento corresponde ao escorregamento da resina, à deformação da fibra aderente ao provete e à deformação da superfície de betão. Os dois últimos são pouco relevantes, pois, apresentam módulos de elasticidade bastante superiores aos da resina. O deslocamento Δ_2 corresponde à deformação ocorrida no troço de CFRP não aderente. O deslocamento total, δ , corresponde assim a $2 \times \Delta_1 + \Delta_2$.

3.4 Procedimento de ensaio

Nos ensaios monotónicos a carga foi aplicada através de incrementos sucessivos de aproximadamente 20 kN. Nos ensaios cíclicos, foi aplicada uma carga inicial correspondente a cerca 45% da carga de rotura do modelo monotónico com as mesmas características. Seguidamente foram aplicados três ciclos de carga de $\pm 4,5\%$ da carga de rotura ou seja $\pm 10\%$ da carga aplicada, ao fim dos quais se aplicaram mais três ciclos, agora com incrementos de $\pm 20\%$ da carga aplicada inicialmente e assim sucessivamente ($\pm 30\%$, $\pm 40\%$, ...) até se atingir a rotura (Figura 6).

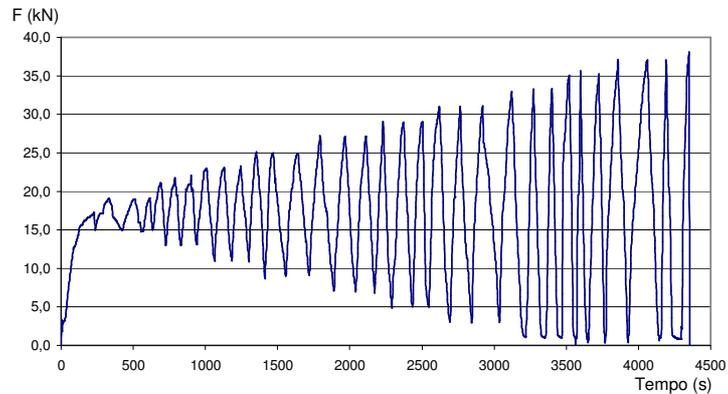


Figura 6: Evolução da força aplicada ao longo do tempo num dos ensaios cíclicos.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Apresenta-se na Tabela 3 o resumo dos resultados obtidos, em termos de força de rotura, tensão média de aderência, deslizamento na rotura e rigidez da ligação CFRP-RESINA-BETÃO, para 45% da respectiva força de rotura. Ao contrário do que acontece nas acções monotónicas, nas acções cíclicas os valores máximos da força ou tensão (Tabela 4) podem não coincidir com os valores na rotura, para valores de deslocamento muito próximos.

Tabela 3: Resumo de resultados obtidos

Modelo	Força de rotura	Tensão média de aderência na rotura	Deslizamento na rotura	Rigidez a 45% da força de rotura
	F_{rot} (kN)	τ_{med} (MPa)	δ (mm)	kN/mm
BS-M-SB-1	19,1	1,37	1,156	18,660
BS-C-SB-2	19,0	1,39	1,037	19,987
BS-M-CB-3	23,1	1,69	1,444	13,548
BS-C-CB-4	19,8	1,45	1,355	17,769
BA-M-SB-5	21,8	1,55	1,038	21,875
BA-M-CB-6	27,2	1,98	1,348	20,982
BA-C-CB-7	27,4	2,02	1,309	20,666

Tabela 4: Valores máximos para as acções cíclicas

Modelo	Força máxima	Tensão máxima	Deslocamento máximo	Nº Máximo de ciclos
	$F_{máx}$ (kN)	$\tau_{máx}$ (MPa)	δ (mm)	
BS-C-SB-2	19,0	1,39	1,037	31
BS-C-CB-4	20,9	1,54	1,372	30
BA-C-CB-7	27,6	2,04	1,309	34

4.1 Comparação global em termos de força de rotura

Verifica-se que nos ensaios cíclicos os modelos de betão armado com bucha apresentam uma resistência cerca de 38% superior aos modelos em betão simples. Este valor nos ensaios monotónicos é de apenas 18%. Nos modelos sem bucha o aumento de resistência, em ensaios monotónicos, dos modelos de betão armado em relação aos de betão simples é de 14%. Pode-se concluir que nos modelos de betão armado a resistência é superior aos dos modelos de betão simples, contudo, fica por provar a influência da espessura do recobrimento das armaduras (10mm nos presentes modelos) no incremento da resistência em relação aos modelos de betão simples.

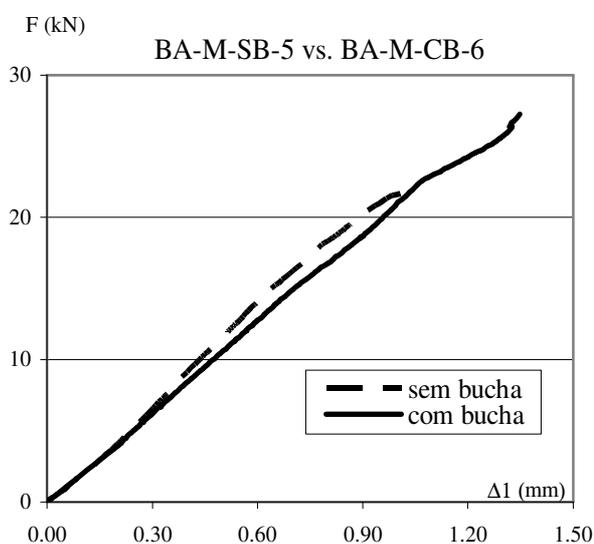


Figura 7 – Comparação do comportamento entre modelos com bucha e sem bucha, em provetes de betão armado, sujeitos a carga monotónica

A influência das buchas na resistência corresponde a um aumento de 21% ou 25%, consoante se trate de betão simples ou de betão armado, respectivamente, em relação aos modelos sem bucha.

O diagrama da Figura 7 ilustra como os modelos sem bucha possuem menor força de rotura que os mesmos modelos com bucha, sendo possível de observar o ganho de resistência e rigidez do modelo quando a bucha entra em funcionamento.

4.2 Deslocamento da zona de aderência na rotura (Δl)

Constata-se que o deslocamento na rotura da zona de aderência (Figura 8) dos modelos com bucha é, em média, 22% superior ao dos modelos equivalentes sem bucha. Enquanto o escorregamento ocorrido na zona de aderência nos modelos com provetes de betão armado é em média 7% inferior ao dos modelos equivalentes mas com provetes de betão simples. Relativamente ao deslizamento da zona de aderência nos modelos ensaiados com cargas cíclicas, verifica-se que este é menor em média cerca de 6% comparativamente com os ensaiados com cargas monotónicas.

No gráfico de força-escorregamento na rotura (Figura 9), unindo os pontos à origem, pode-se comparar uma rigidez secante dos diferentes modelos. Observa-se que os modelos com provetes de betão armado apresentam maior rigidez comparativamente aos dos de betão

simples. Observa-se também que os modelos com bucha, apresentam menor rigidez que os modelos equivalentes mas sem bucha.

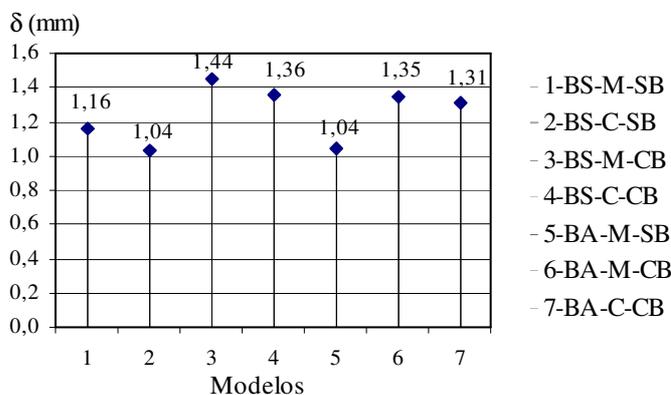


Figura 8 - Valores de escorregamento da ligação na rotura

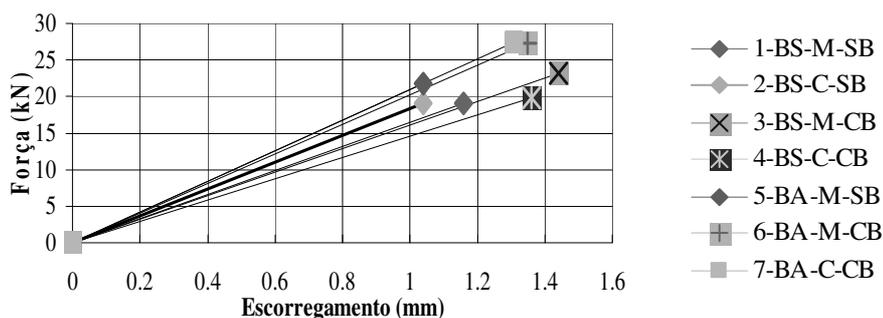


Figura 9 - Diagrama força-escorregamento

4.3 Comparação global em termos de rigidez da ligação CFRP-RESINA-BETÃO

Os valores de rigidez foram obtidos para 45% da força de rotura de cada modelo. Nos modelos ensaiados com carga cíclica, os valores de rigidez, correspondem à primeira carga aplicada que é 45% da carga de rotura.

Os modelos com bucha apresentam um decréscimo de rigidez da ligação em média de 14%. Verificou-se que quando a bucha entra em funcionamento ocorre um acréscimo de rigidez. A causa provável para a menor rigidez dos provetes com bucha será a descontinuidade da zona de aderência provocada pela existência da bucha.

Os modelos com provetes de betão armado apresentam uma rigidez de ligação CFRP-RESINA-BETÃO, em média 21% superior aos modelos com provetes de betão simples. Este comportamento é explicado pela influência da armadura na superfície de rotura do betão.

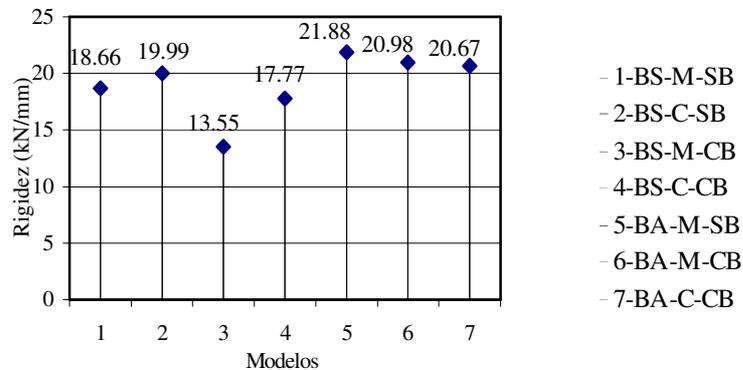


Figura 10: Comparação global da rigidez da ligação CFRP-RESINA-BETÃO

5. OBSERVAÇÕES FINAIS

Os modelos com bucha comparativamente aos modelos sem bucha, apresentaram valores superiores da força de rotura e uma rigidez idêntica da ligação CFRP-RESINA-BETÃO e conseqüentemente maiores deslocamentos. As buchas romperam sempre ao corte mas promoveram um acréscimo de aderência. Esse acréscimo varia entre 21% e 25%, respectivamente para provetes de betão simples e de betão armado.

Os modelos com provetes de betão armado apresentam valores superiores da força de rotura e menores deslocamentos relativamente aos modelos de betão simples, bem como um comportamento mais rígido da ligação da zona de aderência. Os modelos com provetes de betão armado e com bucha são os que apresentam maiores valores de força de rotura e a sua rigidez é superior aos modelos com provetes de betão simples com ou sem bucha.

Em termos de força de rotura, os modelos ensaiados com cargas cíclicas, comparativamente com os ensaiados a cargas monotónicas, não apresentam em média, decréscimo acentuado de resistência, embora a rotura ocorra sempre para menores deslocamentos da zona de aderência.

Dado o reduzido número de ensaios efectuados, estas conclusões são meramente indicativas, evidenciando, no entanto, um aumento de eficiência da ligação proporcionado pelas buchas e pela existência de armaduras.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Rodrigues, C.C., “Comportamento da Ligação Aço-Resina-Betão em Elementos Estruturais”, Tese de Mestrado, IST-UTL, 1993;
- [2] Juvandes, L., “Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de CFRP”, Tese Doutoramento, FEUP, 1999;
- [3] Travassos, N., Gomes, A., “Caracterização do Comportamento da Ligação Folha de Fibra de Carbono-Resina-Betão”, Encontro Nacional Betão Estrutural 2000, Porto, 2000;
- [4] Ficha técnica nº533 da Sika, “Sikadur -330”;
- [5] Ficha técnica nº 534 da Sika, “Sika wrap- 230C”
- [6] FIB-Bulletin 14., “Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures”, 2001.