

COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO UNIAXIAL DE PILARES CIRCULARES DE BETÃO ARMADO ENCAMISADOS COM CFRP



C. CHASTRE RODRIGUES
Assistente
FCT/UNL
Lisboa



M. GONÇALVES DA SILVA
Professor Catedrático
FCT/UNL
Lisboa

SUMÁRIO

O reforço de pilares com coletes de materiais compósitos tem vindo a incrementar a substituição dos coletes metálicos ou de outras técnicas similares, devido à sua boa relação resistência /peso e rigidez /peso, bem como à sua resistência à corrosão e à fadiga. Na presente comunicação são discutidos os resultados obtidos no ensaio de dez modelos de pilares reforçados com CFRP, bem como a caracterização mecânica dos materiais utilizados.

1. INTRODUÇÃO

Os laminados compósitos são materiais cujas propriedades podem ser “escolhidas” pelo projectista, são resistentes a meios agressivos, leves e moldáveis. Os maiores obstáculos à sua generalizada aplicação são o relativo desconhecimento técnico, a heterogeneidade associada ao fabrico e aplicação em obra, a falta de padronização específica, especialmente para ensaios de durabilidade, a relativa falta de técnicas de intervenção simples *in situ* e questões relacionadas com a baixa rigidez estrutural, obstáculos compostos com o parco tratamento dessas matérias nos cursos de engenharia civil [1] e dúvidas sobre custo comparativo.

O reforço estrutural é uma das áreas em que a resistência à corrosão, o baixo peso e a moldabilidade dos compósitos de matriz orgânica contribuem para o continuado interesse no seu uso. Em situações em que aspectos estéticos ou de preservação patrimonial não intrusiva ou de agressividade ambiental sejam fundamentais tem-se popularizado o uso de fibras de

carbono [2], recorrendo-se também a fibras de vidro, em especial do tipo E, como reforço externo [3].

Esta comunicação examina os resultados obtidos no ensaio à compressão uniaxial de uma série de 10 modelos de pilares encamisados com coletes de CFRP, bem como a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos modelos ensaiados.

Os coletes compósitos são constituídos por duas fases: (a) fibras com elevada resistência à tracção, elevado módulo de elasticidade e frágeis, e, (b) matriz polimérica, dúctil, termoendurecível, interligando as fibras. Valores típicos referentes a fibras e a resinas apresentam-se para referência em [4].

O betão é um material muito fissurado no Estado Limite Último, não sendo recomendável que o cálculo seja baseado no Estado Limite Último do colete, porque qualquer perda na pressão de confinamento a extensões superiores a 3,5‰ pode resultar imediatamente num colapso frágil [5]. A presença do colete compósito coloca o betão num estado triaxial de compressão restringindo a sua deformação transversal. As fibras começam a funcionar assim que o betão é sujeito a uma tensão superior à tensão resistente do modelo não confinado, estado a partir do qual aparecem microfissuras no betão e o compósito entra em tensão e provoca o confinamento [6].

O confinamento de pilares com coletes de CFRP aumenta consideravelmente a resistência e a ductilidade do pilar porque impede a deformação transversal até valores muito superiores aos da deformação transversal sem CFRP e impede a encurvadura da armadura longitudinal. Este comportamento traduz as principais vantagens do confinamento do betão e deve ser integrado nos modelos de cálculo, objectivo para o qual se pretende contribuir com uma campanha de ensaios em curso que abrange cerca de 30 modelos de betão armado com diversos níveis de cintagem, reforçados com materiais compósitos à base de fibras de vidro ou de carbono.

2. ENSAIOS À COMPRESSÃO UNIAXIAL DE PILARES CIRCULARES DE BETÃO ARMADO ENCAMISADOS COM CFRP

2.1. Caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados

2.1.1. Aço e betão

Os varões longitudinais de aço utilizados nos modelos ensaiados são da classe A400NR. O betão foi caracterizado utilizando provetes cúbicos de 150mm de aresta. A tensão de rotura à compressão, obtida do ensaio de provetes cúbicos encontra-se indicada no Quadro 1, bem como a respectiva extrapolação para provetes cilíndricos de $\phi 150$ e 300 mm de altura. O ensaio dos provetes de betão coincidiu temporalmente (350 dias após a betonagem) com o ensaio à compressão uniaxial dos pilares da série 1.

Quadro 1 - Tensão de rotura à compressão dos provetes de betão.

Provete N.º	Tensão de rotura f_c (MPa)		Valor médio da tensão de rotura em cilindros f_{cm} (MPa)
	Cubos	Cilindros (*)	
1	46,2	38,4	37,7
2	44,4	36,9	
3	43,3	35,9	
4	47,2	39,2	
5	45,6	37,9	
(*) valor correspondente em cilindros ($f_{cil} = 0.83 * f_{cub}$ [7]).			

2.1.2. Resina

A resina utilizada nos provetes da série 1 foi fornecida pelo fabricante e tem a designação comercial de epotherm-L700W. Por forma a caracterizar esta resina à tracção foram fabricados provetes de 3 mm de espessura e $15 \times 250 \text{mm}^2$ de área. A mistura da resina com o endurecedor foi realizada na proporção de 2:1 conforme especificações do fabricante [8]. Na preparação dos provetes utilizou-se um molde com as dimensões aproximadas de $400 \times 400 \text{mm}^2$. As faces eram de vidro, tendo no contorno placas de perspex com 3 mm de espessura, o que permitiu controlar a espessura da chapa de resina. Este molde foi vedado lateralmente e foi vertida a resina, para o interior do molde e tomadas as devidas precauções para eliminar as bolhas de ar. Após a cura, a chapa de resina foi retirada do molde e cortada de acordo com as dimensões pretendidas.

Na figura 1 apresenta-se um pormenor do ensaio de um provete de resina com a máquina de tracção universal (Zwick) utilizada no laboratório de ensaios mecânicos do DECivil na UNL.



Figura 1: Pormenor do ensaio de um provete de resina.

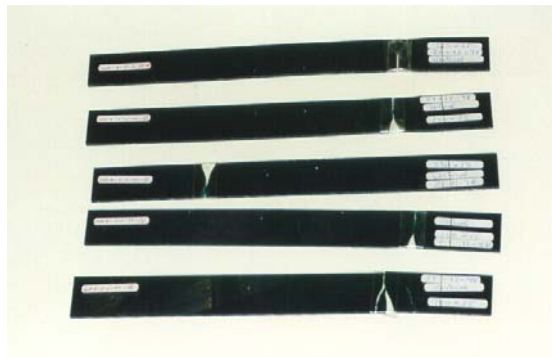


Figura 2 : Provetes ensaiados nesta série.

A resina foi ensaiada à tracção aos 30 dias após a fabricação, tendo-se obtido para cada um dos provetes a curva força-extensão, a tensão de rotura e o módulo de elasticidade. Na figura 2 podem observar-se os cinco provetes de resina ensaiados e na figura 3 os respectivos diagramas força-extensão obtidos.

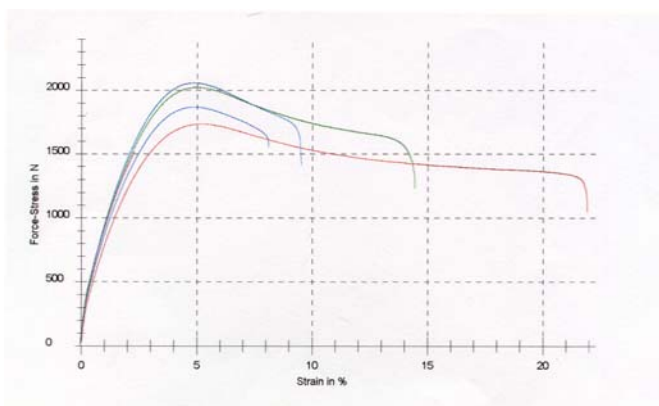


Figura 3 : Diagramas força -extensão da Resina – série ccr8.

No quadro 2 indica-se para cada provete ensaiado, a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$), a tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$), o m3dulo de elasticidade (E), a extens3o para a força m3xima ($\epsilon_{Fm\acute{a}x}$), a extens3o 3ltima (ϵ_u) e os respectivos valores m3dios.

Quadro 2 : Resultados obtidos no ensaio dos provetes de Resina – s3rie ccr8.

ENSAIO	ccr8-1	ccr8-2	ccr8-3	ccr8-4	Ccr8 _{med}
$F_{m\acute{a}x}$ (N)	1737	2024	1871	2058	1.923
$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	20,1	25,8	23,3	25,5	23,7
E (GPa)	1485	1890	1773	1923	1768
$\epsilon_{Fm\acute{a}x}$ (%)	5,09	5,02	4,95	4,90	4,99
ϵ_u (%)	21,94	14,5	8,13	9,56	13,53

2.1.3. CFRP

A fibra de carbono utilizada foi fornecida pela *Mitsubishi Chemical Corporation* e tem a designa3o comercial de *Replark 30*. De acordo com os dados indicados pelo fabricante [8] a fibra de carbono tem uma resist3ncia 3 trac3o de 3400 Mpa, um m3dulo de elasticidade de 230 GPa e espessura de c3lculo de 0,167 mm por camada. Para a caracteriza3o da fibra de carbono foram fabricadas diversas placas de CFRP com uma (03), duas (03/03) e tr3s camadas (03/903/03), com 300 mm de largura por 250mm de comprimento. Para a execu3o das placas foi utilizada uma superf3cie de vidro como base, sobre a qual se come3ou por dar uma primeira passagem com um rolo impregnado em resina; em seguida colocou-se a primeira camada de fibra orientada a 03 e aplicou-se outra camada de resina. No caso das placas com duas ou tr3s camadas de fibra aguardou-se cerca de 60 minutos para que pudesse haver impregna3o total da resina e repetiu-se o procedimento anterior at3 3 3ltima camada, ou seja, ap3s a coloca3o da resina colocou-se a camada de fibra com a orienta3o pretendida, 03 no caso das placas com duas camadas de fibra ou 903 no caso das placas com tr3s camadas, at3 se terminar o processo com a camada final de resina.

ccr3-1	0°	8.420	8.790	3.177	3.361	223	208	1,9	2,1	2,3	2,3
ccr3-2	0°	9.079		3.498		204		2,2		2,3	
ccr3-3	0°	8.870		3.407		197		2,1		2,2	
ccr4-1	0°/0°	18.134	17.793	3.327	3.317	217	210	3,2	2,8	3,3	3,0
ccr4-2	0°/0°	16.787		3.214		212		2,5		2,6	
ccr4-3	0°/0°	18.459		3.412		200		2,8		2,9	
ccr5-1	0°/90°/0°	14.803	14.815	2.711	2.744	197	213	2,4	2,2	2,5	2,4
ccr5-2	0°/90°/0°	14.511		2.738		227		2,1		2,4	
ccr5-3	0°/90°/0°	15.129		2.782		216		2,3		2,4	
ccr6-1	0°/90°/0°	20.939	22.108	2.397	2.559	219	199	2,4	2,6	---	2,9
ccr6-2	0°/90°/0°	22.820		2.811		216		2,8		2,8	
ccr6-3	0°/90°/0°	24.362		2.720		173		3,0		3,0	
ccr6-4	0°/90°/0°	20.313		2.309		191		2,4		3,0	

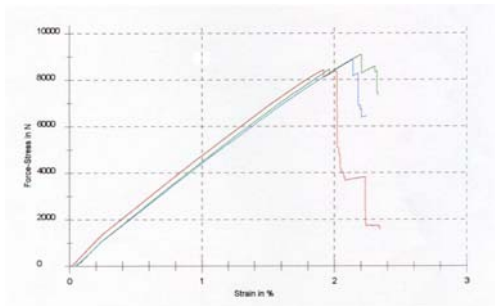


Figura 6 : Diagrama força-extensão - ccr3

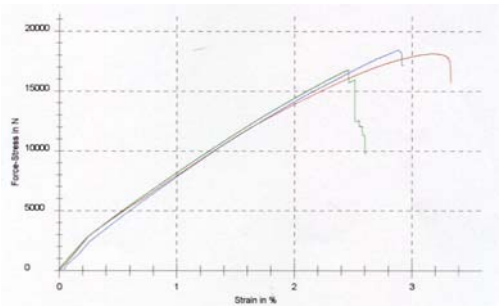


Figura 7 : Diagrama força-extensão - ccr4

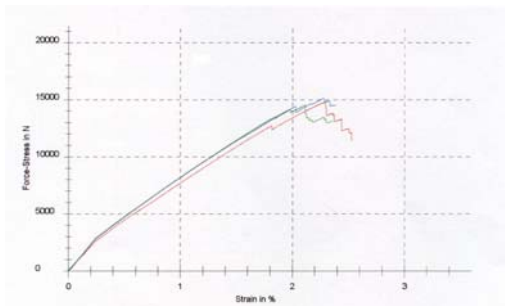


Figura 8 : Diagrama força-extensão - ccr5

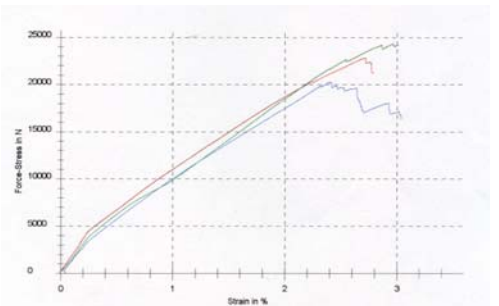


Figura 9 : Diagrama força-extensão - ccr6

Os resultados destes ensaios apresentam-se no quadro 3 e os respectivos diagramas força-extensão apresentam-se nas figuras 6 a 9.

Nos ensaios realizados verifica-se que o módulo de elasticidade da fibra varia entre 199GPa e 213GPa, valores que se encontram um pouco abaixo dos 230GPa referidos pelo fabricante [8].

No quadro 3 é possível observar que os provetes de CFRP apresentam valores médios da tensão de rotura à tracção entre os 2559MPa (0°/90/0°) e os 3361Mpa (0°), enquanto as extensões verificadas para a tensão máxima oscilam entre os 2 e os 3%.

A variabilidade obtida (24%) em termos de tensões máximas verifica-se principalmente nos provetes de CFRP com duas camadas orientadas a 0° e uma outra camada orientada a 90°. Esta situação parece originar uma rotura precoce dos provetes de CFRP.

2.2 Ensaio de Pilares

Os ensaios discutidos fazem parte de programa mais extenso, já descrito em [4]. Os provetes referentes a esta série (diâmetro 150mm e altura de 750mm) foram fabricados em betão simples e em betão armado (armadura longitudinal 6φ6 - A400NR), com cintas φ3//0.10m e coletes de CFRP.

Os modelos foram ensaiados à compressão uniaxial numa prensa do LNEC (capacidade 5000kN) e a aquisição de dados realizada através de DataLogger UPM60 da HBM e de um pentium a 166Mhz portátil, com 32Mb de memória.

A instrumentação utilizada foi a seguinte: i) três transdutores de deslocamento vertical (TML-CDP100) colocados em torno do modelo; ii-a) quatro extensómetros colocados a meia altura do modelo, dois para medirem a deformação vertical e outros dois para medirem a deformação transversal; ou, ii-b) doze extensómetros, em apenas três dos provetes, colocados a ¼, ½ e ¾ da altura do modelo com o objectivo de verificar a variação das deformações ao longo da altura.

Os modelos foram levados até à rotura a uma velocidade de ensaio de 10μ/s, continuando-se o ensaio após a rotura por forma a obter o andamento da curva σ-ε até valores da força na ordem dos 50kN.

2.3 Resultados

Os principais resultados resumem-se no quadro 4 e Figura 12. As Figuras 10 e 11 mostram alguns dos tipos de rotura observados nos modelos, respectivamente, de betão simples, betão armado sem encamisamento, betão simples com encamisamento e betão armado com encamisamento. A Figura 11-i) mostra o comportamento atribuível ao colete de material compósito em modelos sem armaduras (C4 e C5) e a Figura 11-ii) em modelos com armaduras (C10 e C11).

Quadro 4 – Resultados do ensaio à compressão uniaxial dos modelos C1 a C11.

Mod.	Confinamento	Armad. Transv.	f_c	f_{cc}
C1	Sem	Sem	23,1	--
C2	Sem	Sem	24,4	--

C3	Sem	Sem	32,2	--
C4	CFRP	Sem	--	73,6
C5	CFRP	Sem	--	68,3
C7	Sem	$\phi 3 // 0,10$	26,4	--
C8	Sem	$\phi 3 // 0,10$	30,1	--
C9	Sem	$\phi 3 // 0,10$	24,8	--
C10	CFRP	$\phi 3 // 0,10$	--	81,4
C11	CFRP	$\phi 3 // 0,10$	--	74,6



i)



ii)

Figura 10: Fotos de alguns modelos sem CFRP após ensaio:
i) sem armaduras; ii) com armaduras



i)



ii)

Figura 11: Fotos de alguns modelos com CFRP após ensaio:
i) sem armaduras; ii) com armaduras

A figura seguinte mostra os diagramas tensão axial (f_c)- extensão longitudinal (ϵ_z) e tangencial na superfície cilíndrica (ϵ_t), para provetes representativos de cada um dos casos ilustrados nas Figuras 10 e 11.

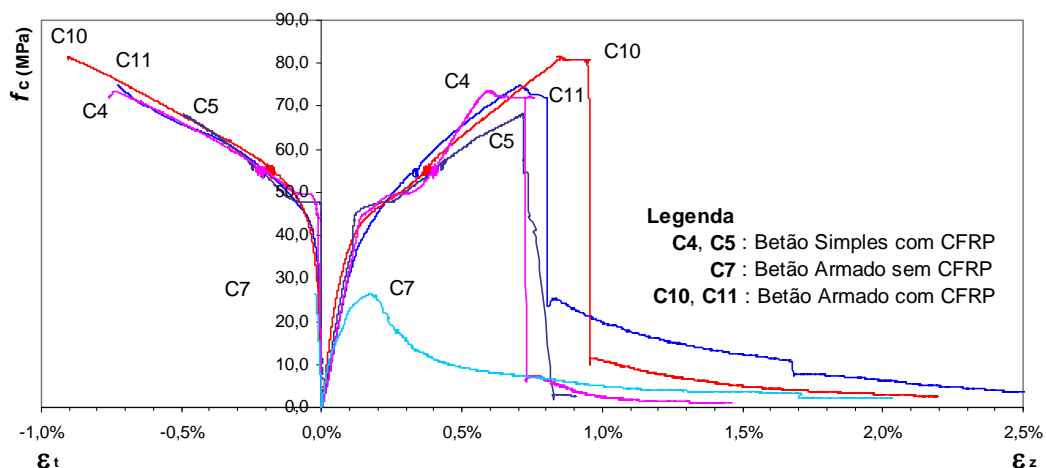


Figura 12 : Diagramas σ - ϵ_t ou ϵ_z relativos aos modelo C4, C5, C7, C10 e C11.

3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

No gráfico da figura 12 é possível observar o comportamento distinto dos modelos C5, C7 e C11 representativos dos modelos de betão simples com CFRP e de betão armado com e sem CFRP. Não se faz referência ao comportamento dos modelos C4 e C10 por serem de certa forma comparáveis aos modelos C5 e C11 respectivamente. De igual forma não se apresentou o andamento das curvas dos modelos C8 e C9 (betão armado sem CFRP) por serem do mesmo tipo da apresentada pelo modelo C7, em que a ruptura se dá a uma tensão comparativamente baixa e com escassa dissipação de energia.

O valor da tensão máxima de compressão no modelo C7 que não foi encamisado com CFRP é de cerca de 35% do valor de C11. Após a tensão máxima, o comportamento dos diversos modelos é bastante distinto. No caso de C7 o ramo da curva descendente é relativamente suave entre a tensão máxima e a ruptura da primeira cinta (ϵ_z entre 2‰ e 17‰); no caso de C11 a tensão máxima dá-se a uma extensão de 7‰ e a ruptura da primeira cinta dá-se igualmente a 17‰, enquanto o ramo da curva descendente tem uma queda acentuada por volta dos 8‰, correspondendo à ruptura do encamisamento. O modelo passa, a partir deste momento, a ter uma capacidade residual semelhante à do modelo C7, mas para deformações bastante superiores. Pelo contrário, o modelo C5 que tem CFRP mas não tem armaduras apresenta a partir da tensão máxima uma queda brusca no ramo da curva descendente que corresponde à ruptura total do modelo e conseqüente perda de qualquer capacidade residual.

4. NOTA FINAL

Os resultados obtidos e apresentados correspondem à primeira fase de programa que está em curso e que permitirá estudar outros parâmetros importantes e diminuir as incertezas associadas a estudos experimentais com um número de ensaios ainda reduzido. O

confinamento conferido pelos coletes, por exemplo, vai ser comparado com o conferido para cintas de aço com espaçamentos diferentes para se verificar a partir de que espaçamento há real benefício de ductilidade e de resistência.

O estudo dos efeitos ambientais de humidade, raios ultravioleta e meios ácidos estão a ser iniciados experimentalmente, prevendo ensaiar-se a degradação da ligação na interface compósito-betão nos próximos meses. A análise dos efeitos de fluência e de acções cíclicas está igualmente planeada, bem como o ensaio à flexão composta de pilares de 1.60m de altura e 0.25m de diâmetro.

Os resultados do conjunto destes ensaios e estudos deverão permitir estabelecer recomendações úteis para projecto e obra e serão divulgados ao longo do programa.

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento parcial dos trabalhos aqui descritos através do Projecto PRAXIS XXI – CEG 3/3.1/2572-95. Ao Engº Rui Neves, pela importante ajuda nos ensaios realizados no LNEC. À Engª. Raquel de Paula e ao Sr. Gaspar pela ajuda na preparação e realização dos ensaios efectuados no LNEC e na UNL.

6 . REFERÊNCIAS

- [1] “The Development and Introduction of FRP Composites into Civil Engineering” Composite News:Infrastructure, 17 Junho 1994.
- [2] Meier, U. e A. Winistorfer, “Retrofitting of structures through external bonding of CFRP sheet”, 55, 2nd Int’l RILEM Symp., Agosto 1995.
- [3] Saadatmanesh, H., “Wrapping with composite materials”, 2nd Int’l RILEM Symp., Agosto 1995.
- [4] Silva, M. G.; Rodrigues, C. C.; “Encamisamento de pilares de betão armado com FRP: efeitos nas relações constitutivas e na ductilidade”. VI Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional, Aveiro, Abril 2000.
- [5] Lillistone, Duncan; Jolly Colin K.. “Concrete-Filled Fibre Reinforced Plastic Circular Columns” International conference: “Composite Construction – conventional and Innovative”, Innsbruck, Austria, Setembro/1997.
- [6] Karbhari , Vistasp M.; Gao, Yanqiang. “Composite Jacketed Concrete Under Uniaxial Compression – Verification of Simple Design Equations”. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 9, nº 4, Novembro /1997, Paper nº 13873
- [7] Leonhardt, F.; Mönning, E.; "Construções de Concreto"; vol.1, Livraria Interciência, 1ª edição, Rio de Janeiro, 1977.
- [8] “Replark System Procedure Instruction”. Mitsubishi Chemical Corporation.