

Comportamento à compressão de pilares circulares de betão confinados por sistemas compósitos de FRP híbridos

Filipe Ribeiro¹

José Sena-Cruz²

**Fernando G.
Branco³**

Eduardo Júlio⁴

RESUMO

No presente trabalho apresenta-se um estudo analítico-experimental sobre o comportamento à compressão de provetes circulares em betão encamisados com um inovador sistema compósito de FRP híbrido. No referido sistema procurou-se explorar as vantagens da utilização combinada de uma única matriz epoxídica reforçada com várias mantas constituídas por fibras de reforço de diferentes materiais, nomeadamente carbono de alto módulo de elasticidade, carbono de alta resistência e vidro. No total, foram estudadas 10 combinações de confinamento híbridas em ensaios de compressão uniaxial de cilindros de betão até à rotura.

Contrariamente ao que acontece com os sistemas compósitos de FRP tradicionais (monofibra), é possível observar comportamentos pseudo-dúcteis, resultantes da fragmentação e delaminação dispersa do material de maior módulo de elasticidade, em alguns sistemas compósitos de FRP híbridos. Por outro lado, constata-se que a extensão de rotura das fibras mais rígidas é maior nos sistemas compósitos de FRP híbridos (comparativamente aos valores obtidos com sistemas tradicionais), sendo este fenómeno designado por efeito híbrido. Desta forma, é possível afirmar que as combinações híbridas contribuem para melhorar a eficácia das fibras de maior módulo de elasticidade. Este aspeto é relevante nas aplicações de encamisamento, nas quais se tem vindo a registar diminuição de resistência e extensão última relativamente aos valores registados nos ensaios de tração uniaxial de caracterização do material.

Neste trabalho, foram ainda desenvolvidos modelos analíticos que demonstraram ser adequados para simular a resposta mecânica dos pilares reforçados com sistemas compósitos de FRP híbridos, no que diz respeito à resistência à compressão, curvas tensão-extensão e dilatação. Os modelos referidos foram inicialmente desenvolvidos para prever a resposta à compressão de pilares de betão confinados por sistemas compósitos de FRP não híbridos e foram adaptados, no contexto do presente trabalho, para o caso dos sistemas compósitos de FRP híbridos. Isto foi possível graças a um entendimento adequado do comportamento dos últimos em tração, o que passa pela compreensão dos fatores que contribuem para os diferentes modos de rotura (pseudo-dúctil ou frágil).

Palavras-chave: pilares de betão, confinamento, FRP híbrido, ensaios de compressão, modelação analítica

¹CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal. filipe.t.ribeiro@tecnico.ulisboa.pt

²ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal jsena@civil.uminho.pt

³ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal fjbranco@dec.uc.pt

⁴CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal. eduardo.julio@tecnico.ulisboa.pt

1. INTRODUÇÃO

O reforço por confinamento exterior (muitas vezes também designado por encamisamento) de pilares de betão armado com recurso a sistemas compósitos de polímeros reforçados com fibras (FRP - *fiber reinforced polymers*) permite melhorar tanto a sua resistência como a extensão última. Quando submetido a tensões normais de compressão, o betão expande ortogonalmente (ou lateralmente) por efeito de Poisson. A relação entre a extensão axial e lateral, inicialmente linear, varia à medida que o dano aumenta em virtude do aparecimento e desenvolvimento da fissuração no betão.

A aplicação de sistemas de confinamento restringe a expansão lateral do betão fissurado, levando a que seja possível alcançar maiores valores de resistência e extensão última. Quando se recorre a sistemas compósitos de FRP tradicionais, a tensão de confinamento, promovida pelo comportamento linear-elástico até à rotura do FRP, aumenta linearmente até ao colapso do elemento. Desta forma, a tensão de confinamento gerada pelo FRP depende da extensão lateral do betão [1]. Uma vez que o material confinante não apresenta qualquer ductilidade, a rotura do conjunto (betão confinado) é abrupta, dominada pela rotura do FRP. A falta de ductilidade destes materiais leva a que fatores de segurança significativamente penalizadores devam ser aplicados durante a conceção deste tipo de aplicações.

Neste contexto, os sistemas compósitos de FRP híbridos apresentam-se como uma alternativa interessante, uma vez que permitem obter uma resposta pseudo-dúctil em tração, i.e., uma curva tensão-extensão inicialmente linear, seguindo-se um patamar de “cedência”. Este aspeto contribui para o aumento da segurança deste tipo de aplicações, na medida em que os valores de resistência podem ser atingidos sem que isso signifique o colapso imediato do sistema. No entanto, deve-se notar que a resposta à tração referida é designada de pseudo-dúctil porque o patamar de “cedência” é passível de ser atingido em ensaios monotónicos, não sendo repetível em ensaios cíclicos.

Da constituição dos sistemas compósitos de FRP híbridos fazem parte uma única matriz polimérica e, pelo menos, dois tipos de fibras de reforço. Importa salientar que, embora seja possível obter comportamentos pseudo-dúcteis em tração com estes sistemas, nenhum dos materiais constituintes apresenta capacidade de deformação plástica. Por regra, as fibras utilizadas nos sistemas compósitos de FRP híbridos devem apresentar diferenças significativas nas suas extensões de rotura, de forma a tirar o maior partido da hibridização. Por essa razão, costuma-se diferenciá-las como fibras de elevada extensão última – “high strain” (HS) ou como fibras de baixa extensão última – “low strain” (LS). A hibridização pode ser feita a diferentes níveis, nomeadamente camada a camada, intracamada ou intrafibra. No presente trabalho é estudada a primeira abordagem.

Para além da vantagem atrás referida, tem sido evidenciado em diversos trabalhos uma segunda vantagem relacionada com um aumento aparente da extensão de rotura das fibras LS em tração. Este aumento pode atingir, em certos casos, os 50%, e.g. [2, 3]. Este fenómeno tem sido descrito como “efeito híbrido” e tem sido justificado pela restrição promovida pelas fibras HS ao desenvolvimento de fraturas consecutivas de fibras LS, por efeito de redistribuição de tensões, a partir do momento em que a primeira fratura ocorre.

Com o advento dos FRP's, muitos estudos têm sido desenvolvidos no campo do confinamento de betão com sistemas compósitos [4]. Hoje em dia, existe um grande número de modelos analíticos para prever o comportamento à compressão do betão confinado. Neste contexto, os *analysis-oriented models* (AOM) destacam-se porque, ao contrário de outro tipo de modelos, são capazes de prever toda a curva tensão-extensão, assim como a relação entre a extensão axial e a extensão lateral.

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de 10 combinações de sistemas de FRP híbridos no confinamento de betão simples submetido a ensaios de compressão uniaxial. Os sistemas referidos foram fabricados por laminação manual, através da aplicação de diversas camadas de mantas secas e resina epoxídica, a qual desempenhou funções adesivas e de impregnação das fibras. Demonstrou-se que o efeito híbrido permite melhorar a eficácia das fibras LS e que é possível explorar a pseudo-ductilidade no confinamento de betão. Para além disso, desenvolveu-se um AOM para betão confinado

por sistemas de FRP híbridos. Isto passou pela modificação do método de cálculo da tensão de confinamento, existente na literatura e usado no presente trabalho, nomeadamente o modelo de Lim e Ozbakkaloglu [1, 5].

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

2.1.1 Betão

O betão utilizado foi fornecido por uma central de betão pronto respeitando os seguintes requisitos (de acordo com o eurocódigo 2 [6]): (i) classe de resistência C25/30, (ii) classe de exposição XC2, (iii) dimensão máxima do agregado de 12.5 mm, e (iv) classe de abaixamento S4. No ensaio de abaixamento foi registado um valor de 160 mm, o que indica que o betão fornecido estava conformidade com a classe requisitada, para a qual se define um abaixamento entre 160 e 210 mm [7]. Vinte e oito dias após a betonagem, o betão foi caracterizado à compressão. Para tal, recorreu-se a 6 cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Registou-se um módulo de elasticidade [8] de 30.8 GPa (CV = 2.84%) e uma resistência à compressão [9] de 33.4 (CV=4.33%).

Durante a campanha experimental dedicada ao estudo do betão confiando, a idade do betão variou entre 294 e 315 dias. Até à data do ensaio, o betão foi sujeito às condições de cura existente do laboratório. No final da campanha experimental, 3 cilindros de betão simples foram ensaiados com o intuito de avaliar o módulo de elasticidade e resistência. Os valores obtidos foram 30.3 GPa (CV = 6.57%) e 33.5 MPa (CV = 1.33%), respetivamente, para as duas propriedades referidas.

2.1.2 Fibras e resina

Recorreu-se a três tipos de manta, com uma gramagem de aproximadamente 400 g/m²: (i) carbono de elevado módulo de elasticidade (comercialmente designada de S&P C-Sheet 640), (ii) carbono de alta resistência (S&P C-Sheet 240) e (iii) vidro do tipo E (S&P G-sheet E 90/10), aqui referidos com as siglas “CHM”, “C” e “G”, respetivamente. Na Tabela 1 apresenta-se a comparação entre a massa volúmica, gramagem e espessura das diferentes mantas usadas.

Na produção dos sistemas compósitos de FRP foi utilizada uma resina epoxídica (S&P Resin Epoxy 55). De acordo com o fornecedor, a resina apresenta as seguintes propriedades à tração: (i) resistência de 35.8 MPa, (ii) extensão de rotura de 2.3% e (iii) módulo de elasticidade de 2.6 GPa.

Com recurso a uma ou três camadas de manta de cada material de reforço, foram produzidos laminados unidirecionais não híbridos. Estes laminados, cujos detalhes podem ser encontrados em [2], foram sujeitos a ensaios de tração uniaxial de conformidade com a norma [10]. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

2.2 Preparação dos provetes e configuração de ensaio

Neste trabalho, foram preparados 30 cilindros de betão confinados por sistema de FRP híbridos. Cada provete tinha 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. As combinações híbridas aplicadas no confinamento eram simétricas e tinham 3 ou 5 camadas de material de reforço. Desta forma, foram estudadas combinações com aproximadamente os seguintes volumes de fibras LS: 20%, 33%, 40%, 60% e 66%. Devido às diferenças na massa volúmica de cada material, o volume exato de fibras LS teve que ser corrigido, sendo apresentado nas secções seguintes deste artigo.

Cada camada de manta aplicada tinha 300 mm de altura e 620 mm de comprimento. Desta forma, foi possível obter uma zona de sobreposição de 150 mm. O sistema de confinamento foi produzido por laminação manual de acordo com as recomendações da CNR-DT200 [11]. Todos os provetes foram mantidos à temperatura ambiente durante 230 dias.

Na execução dos ensaios, recorreu-se a uma prensa com uma capacidade de carga máxima de 2000 kN. O ensaio foi executado com controlo de deslocamento, 1.20 mm/min, até ocorrer o colapso do provete. As deformações axiais foram registadas com recurso a 3 transdutores de deslocamento (LVDT) (com

campo de medida de ± 20 mm e um erro $\pm 10\%$ F.S.). Os LVDTs foram posicionados (igualmente espaçados) em torno do provete cilíndrico, entre os pratos de carregamento e de suporte do equipamento de ensaio. A extensão lateral do sistema compósito de FRP foi registada com recurso a extensómetros unidireccionais (TML YEFLA-5-3L com um campo de medida de 5 mm). Foi utilizado um extensómetro por cada camada de material aplicada. A localização de cada um dos extensómetros encontra-se identificada na Figura 1.

Tabela 1 – Propriedades das mantas secas e sistemas compósitos de FRP não híbridos.

Séries (1)	Mantas			Sistemas compósitos de FRP [2]		
	Massa volúmica [g/m ³]	Gramagem [g/m ²]	Espessura, t_f [mm/camada]	Módulo de elasticidade [GPa] (CoV [%])	Resistência à tração [MPa] (CoV [%])	Extensão de rotura [%] (CoV [%])
1G	2.60	400	0.154	81.6 (7.39)	1671.2 (8.59)	2.31 (3.78)
3G	2.60	400	0.154	80.6 (10.10)	1254.8 (15.05)	2.00 (13.95)
1C	1.79	400	0.223	231.3 (12.50)	2565.9 (10.18)	1.09 (8.81)
3C	1.79	400	0.223	227.6 (5.80)	2363.2 (7.44)	1.02 (6.02)
1CHM	2.10	400	0.190	624.1 (11.13)	1749.4 (24.39)	0.27 (19.61)
3CHM	2.10	400	0.190	588.2 (3.97)	1073.9 (18.27)	0.18 (15.84)

(1) O número colocado na designação da série indica o número de camadas.

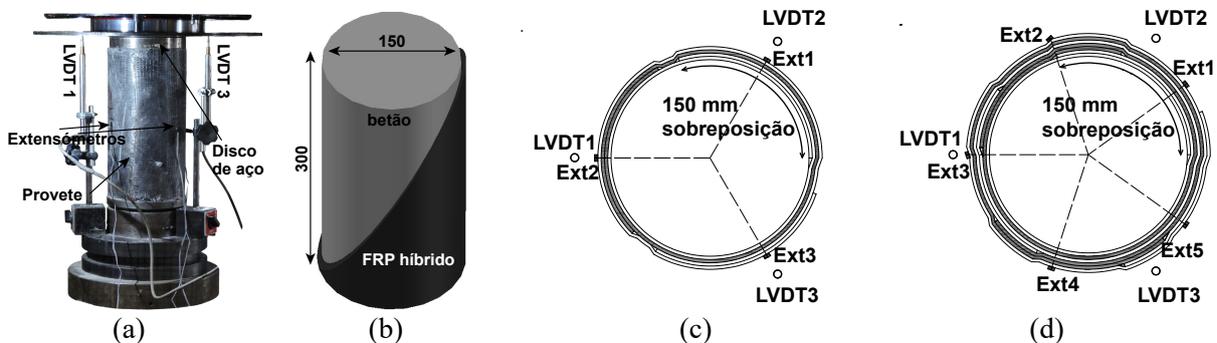


Figura 1 – Ensaio de compressão uniaxial: (a) configuração de ensaio; (b) geometria do provete (dimensões em mm); (c) posicionamento dos LVDTs e extensómetros nos provetes confinados por sistemas constituídos por 3 camadas; (d) posicionamento dos LVDTs e extensómetros nos provetes confinados por sistemas constituídos por 5 camadas.

3. MODELO ANALÍTICO

Os *analysis-oriented models* (AOM) recorrem a modelos destinados a betão confinado ativamente (ou seja, por tensão de confinamento constante) para determinar cada ponto das curvas tensão-extensão axial e extensão axial-extensão lateral do betão confinado pelos sistemas compósitos de FRP. Desta forma, para obtenção das referidas curvas tensão-extensão adota-se o seguinte procedimento:

- i. Admite-se uma extensão lateral (ϵ_l) como parâmetro de entrada para estimar a tensão de confinamento (f_l) promovida pelo sistema compósito de FRP;

- ii. ε_l e f_l são utilizados para estimar a extensão axial (ε_c) do betão confinado por sistemas compósitos de FRP recorrendo a um modelo analítico que estabelece a relação entre a extensão axial e extensão lateral;
- iii. Simultaneamente, f_l é utilizado para definir a curva tensão-extensão do betão confinado por tensão constante (a mesma determinada no ponto i);
- iv. A curva definida no ponto anterior é utilizada na determinação da tensão de compressão do betão confinado pelo sistema compósito de FRP, tendo em conta a extensão axial definida no ponto ii.

Tendo por base a hipótese de compatibilidade de deformações entre o sistema compósito de FRP e o betão, a tensão de confinamento aplicada, no caso de se recorrer a sistemas de FRP não híbridos, pode ser calculada de acordo com a equação (1):

$$f_l = \frac{2E_f t_f \varepsilon_l}{D} \quad (1)$$

em que E_f é o módulo de elasticidade do sistema compósito de FRP, t_f é espessura total do sistema compósito de FRP, ε_l é a extensão lateral e D é o diâmetro do provete de betão.

Deve-se referir que, uma vez que os sistemas de confinamento foram produzidos por laminagem manual, o volume de resina não foi diretamente controlado durante a aplicação. Por essa razão, a espessura total do sistema de FRP foi assumida como igual à espessura total das mantas utilizadas neste trabalho. Este procedimento está de acordo com as atuais recomendações, e.g. CNR-DT200 [11].

Nas equações (2) e (3) apresenta-se o modelo que descreve o comportamento à compressão do betão confinado por tensão constante [5]:

$$f_c = \frac{f_{cc}^* \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}^*} \right)^r}{r-1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}^*} \right)^r}, \text{ if } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}^* \quad (2)$$

$$f_c = \frac{f_{cc}^* - f_{c,res}}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}^*}{\varepsilon_{c,i} - \varepsilon_{cc}^*} \right)^{-2}}, \text{ if } \varepsilon_c > \varepsilon_{cc}^* \quad (3)$$

em que f_{cc}^* e ε_{cc}^* são a tensão e extensão de pico, ε_c é a extensão axial, r é a fragilidade, $f_{c,res}$ é a tensão residual e $\varepsilon_{c,i}$ é a extensão axial correspondente ao ponto de inflexão do ramo de amolecimento da curva tensão-extensão [5]:

$$f_{cc}^* = f_{c0} + 5.2 f_{c0}^{0.91} \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right)^a \text{ em que } a = f_{c0}^{-0.06} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cc}^* = \varepsilon_{c0} + 0.045 \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right)^{1.15} \quad (5)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - f_{cc}^* / \varepsilon_{cc}^*} \quad (6)$$

$$f_{c,res} = 1.6 f_{cc}^* \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right)^{0.24} \text{ e } f_{c,res} \leq f_{cc}^* - 0.15 f_{c0} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{c,i} = 2.8 \varepsilon_{cc}^* \left(\frac{f_{c,res}}{f_{cc}^*} \right) f_{c0}^{-0.12} + 10 \varepsilon_{cc}^* \left(1 - \frac{f_{c,res}}{f_{cc}^*} \right) f_{c0}^{-0.47} \quad (8)$$

Na equação (14), E_c é o módulo de elasticidade do betão simples [5]:

$$E_c = 4400 \sqrt{f_{c0}} \quad (9)$$

Tanto para as combinações híbridas como para as não híbridas, a relação entre a extensão axial e a extensão lateral do betão confinado pode ser determinada através da equação (10) [1]:

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_l}{v_i \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_l}{v_i \varepsilon_{c0}} \right)^n \right]^{1/n}} + 0.04 \varepsilon_l^{0.7} \left[1 + 21 \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right)^{0.8} \right] \quad (10)$$

em que v_i é o coeficiente de Poisson inicial ($\varepsilon_l/\varepsilon_c$):

$$v_i = 8 \times 10^{-6} f_{c0}^2 + 0.0002 f_{c0} + 0.138 \quad (11)$$

ε_{c0} é a extensão de pico do betão simples:

$$\varepsilon_{c0} = (-0.067 f_{c0}^2 + 29.9 f'_{c0} + 1053) \times 10^{-6} \quad (12)$$

n é fator de forma:

$$n = 1 + 0.03 f_{c0} \quad (13)$$

Relativamente aos sistemas de confinamento de FRP híbrido, propõe-se que a tensão de confinamento seja determinada de acordo a seguinte modificação à equação (1):

$$f_l = \frac{2\sigma_h t_f}{D} \quad (14)$$

em que σ_h é a tensão de tração do sistema composto de FRP híbrido para uma determinada extensão axial.

A curva tensão-extensão do sistema composto de FRP teórica pode ser determinada com o modelo de Jalalvand *et al.* [12], como se descreve de seguida. Neste caso, assume-se que a extensão de tração é igual à extensão lateral do betão.

Para cada configuração híbrida, três níveis de tensão podem ser calculados: (i) a tensão em que a primeira fratura ocorre no material LS ($\sigma@LS$), (ii) a tensão em que a delaminação entre o material LS e HS ocorre ($\sigma@del$) e (iii) a tensão que conduz à rotura do material HS ($\sigma@HS$). Os referidos níveis de tensão podem ser calculados de acordo com as equações (15), (16) e (17):

$$\sigma@LF = S_L \frac{\alpha\beta+1}{\alpha(\beta+1)} \quad (15)$$

$$\sigma@del = \frac{1}{1+\beta} \sqrt{\left(\frac{1+\alpha\beta}{\alpha\beta} \right) \left(\frac{2G_{IIc} E_H}{t_H} \right)} \quad (16)$$

$$\sigma@HF = \frac{1}{(1+\beta)} \frac{S_H}{K_t m_H \sqrt{V}} \quad (17)$$

em que S_L é resistência de referência do material LS, α e β são os quocientes do módulo de elasticidade e da espessura entre as fibras LS e HS, respetivamente, G_{IIc} é a rigidez de fratura da interface entre a camada LS e HS, E_H é o módulo de elasticidade das fibras HS, t_H é metade da espessura da camada de fibras HS, m_H é o módulo da distribuição de Weibull relativo às fibras HS, S_H é a resistência das fibras HS, K_t é fator de concentração de tensões no material HS e V é o volume do provete.

O cálculo dos três níveis de tensão definidos anteriormente torna possível a identificação do modo de rotura do sistema composto de FRP híbrido, que pode ocorrer de 4 formas distintas: (i) rotura prematura das fibras HS, (ii) delaminação não controlada, (iii) fragmentação do material LS, (iv) fragmentação e delaminação controlada do material LS. Depois da determinação dos modos de rotura é possível obter a relação tensão-extensão dos sistemas compostos de FRP híbridos, conforme se detalha no trabalho de Jalalvand *et al.* [12].

Os sistemas compostos de FRP híbridos que aqui foram aplicados no confinamento foram ensaiados à tração previamente, o que possibilitou a calibração dos modelos analíticos que simulam o seu

comportamento em tração. Os provetes apresentavam um comprimento de 150 mm e uma largura 15 mm. Assumiu-se $m_H = 29.3$ e $K_t = 0.97$. A G_{IC} foi determinada de modo a que nas combinações onde ocorreu fragmentação e delaminação controlada fosse esse efetivamente o modo analiticamente previsto. Mais detalhes podem ser encontrados em [2].

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de tração para cada combinação híbrida, incluindo o módulo de elasticidade, a resistência e a extensão de rotura das fibras LS. Para além disso, são também apresentados os resultados de diversas propriedades registadas nos ensaios de compressão, nomeadamente a tensão de pico (f_{cc}), a extensão de pico (ε_{cc}), a extensão de rotura das fibras LS, a extensão lateral e a extensão lateral no pico e o fator de redução k_e , que é quociente entre a extensão de rotura lateral das fibras LS e a extensão de rotura obtida em ensaio de tração.

Em três combinações ocorreram fraturas múltiplas, i.e., a rotura das fibras LS não promoveu o colapso do sistema compósito de FRP: 2G/1CHM/2G, 1G/1CHM/1G, e 1G/1CHM/1G/1CHM/1G. Todas as combinações referidas têm em comum o uso fibras CHM. Também é possível observar que existe uma tendência para o aumento de k_e à medida que o volume de fibras LS diminui e efeito híbrido aumenta. Em alguns casos, o k_e é superior a 1 o que indica que a hibridização permite eliminar por completo a redução de eficácia associada às fibras LS.

Tabela 2 – Propriedades dos sistemas compósitos de FRP híbridos e resultados dos cilindros confinados

Combinação	Séries ⁽¹⁾	Volume de fibras LS [%]	Propriedades dos sistemas compósitos de FRP híbridos em tração [2]			Propriedades do betão confinado por sistemas compósitos de FRP híbridos				k_e relativo à rotura das fibras LS
			Módulo de elasticidade de [GPa] (CV [%])	Resistência à tração [MPa] (CV [%])	Extensão de rotura das fibras LS [%] (CV [%])	f_{cc} [MPa] (CV [%])	ε_{cc} [%] (CV [%])	ε_l na rotura das fibras LS [%] (CV [%])	ε_l no pico [%] (CV [%])	
C/G	1C/1G/1C	74.3	201.7 (9.63)	2176.9 (8.55)	1.04 (1.92)	81.7 (1.48)	1.23 (6.00)	0.86 (22.99)	--	0.83
	1G/3C/1G	68.5	202.4 (2.64)	2216.0 (8.77)	1.09 (6.26)	119.4 (2.66)	2.13 (19.54)	1.19 (1.35)	--	1.09
	1G/1C/1G/1C/1G	49.1	148.9 (11.75)	1776.3 (10.55)	1.19 (3.68)	108.3 (7.53)	1.60 (8.27)	1.29 (12.66)	--	1.08
	1G/1C/1G	42.0	146.7 (5.92)	1856.0 (5.67)	1.27 (2.72)	77.5 (5.00)	1.23 (12.19)	1.27 (15.16)	--	1.00
	2G/1C/2G	26.6	110.8 (10.21)	1244.4 (1.74)	1.18 (8.27)	98.3 (2.43)	1.64 (23.68)	1.44 (15.90)	--	1.22
CHM/G	1CHM/1G/1CHM	71.2	454.5 (11.95)	1168.9 (19.49)	0.26 (11.66)	54.7 (9.00)	0.39 (29.22)	0.21 (46.47)	--	0.81
	1G/3CHM/1G	64.9	439.2 (7.35)	1053.5 (10.14)	0.24 (6.43)	74.5 (6.12)	0.72 (11.63)	0.24 (8.31)	--	1.04
	1G/1CHM/1G/1CHM/1G	45.1	318.7 (7.33)	1105.8 (9.18)	0.35 (5.02)	76.6 (1.98)	0.77 (24.58)	0.37 (32.84)	0.90 (4.71)	1.06
	1G/1CHM/1G	38.2	252.0 (8.55)	1054.7 (9.11)	0.30 (2.39)	63.7 (1.70)	0.85 (13.86)	0.38 (7.71)	1.27 (14.54)	1.27
	2G/1CHM/2G	23.6	214.3 (8.45)	1164.7 (14.47)	0.33 (14.65)	80.5 (3.93)	1.22 (20.72)	0.39 (5.96)	1.49 (9.11)	1.18

⁽¹⁾ O número colocado na designação da série indica o número de camadas.

As curvas tensão-extensão obtidas são apresentadas na Figura 2 e na Figura 3. Deve referir-se que alguns resultados considerados como *outliers* foram por esta razão ignorados.

Em geral, é possível constatar que as curvas tensão-extensão apresentam um comportamento aproximadamente bilinear. O primeiro ramo é semelhante para todos os casos, e depende das propriedades do betão simples, e o segundo ramo (de endurecimento) depende da tensão de confinamento e, conseqüentemente, do sistema compósito de FRP utilizado. A partir do ponto que corresponde à resistência à compressão do betão simples (f_{c0} , ε_{c0}), representado com uma linha tracejada, ocorre fissuração, o que leva a um aumento mais significativo da extensão lateral e, portanto, perda de rigidez. É ainda possível observar que, quanto maior é o módulo de elasticidade do sistema compósito de FRP híbrido, maior é a inclinação do segundo ramo da curva.

Em dois casos ocorreu fragmentação e delaminação controlada do sistema compósito de FRP híbrido (Figura 2 (a) e Figura 2 (b)). Nestas combinações é possível observar um patamar na curva tensão-extensão. Tendo por base os resultados expostos na Tabela 2, é possível verificar que a extensão das fibras LS na rotura atinge os valores 0.39% e 0.38% e a extensão lateral de pico é 1.49% e 1.27% para as combinações 2G/1CHM/G e 1G/1CHM/1G, respetivamente. Desta forma, o patamar entre o ponto de rotura das fibras LS e a extensão de colapso é de 1.10% e 0.89%, para as mesmas combinações.

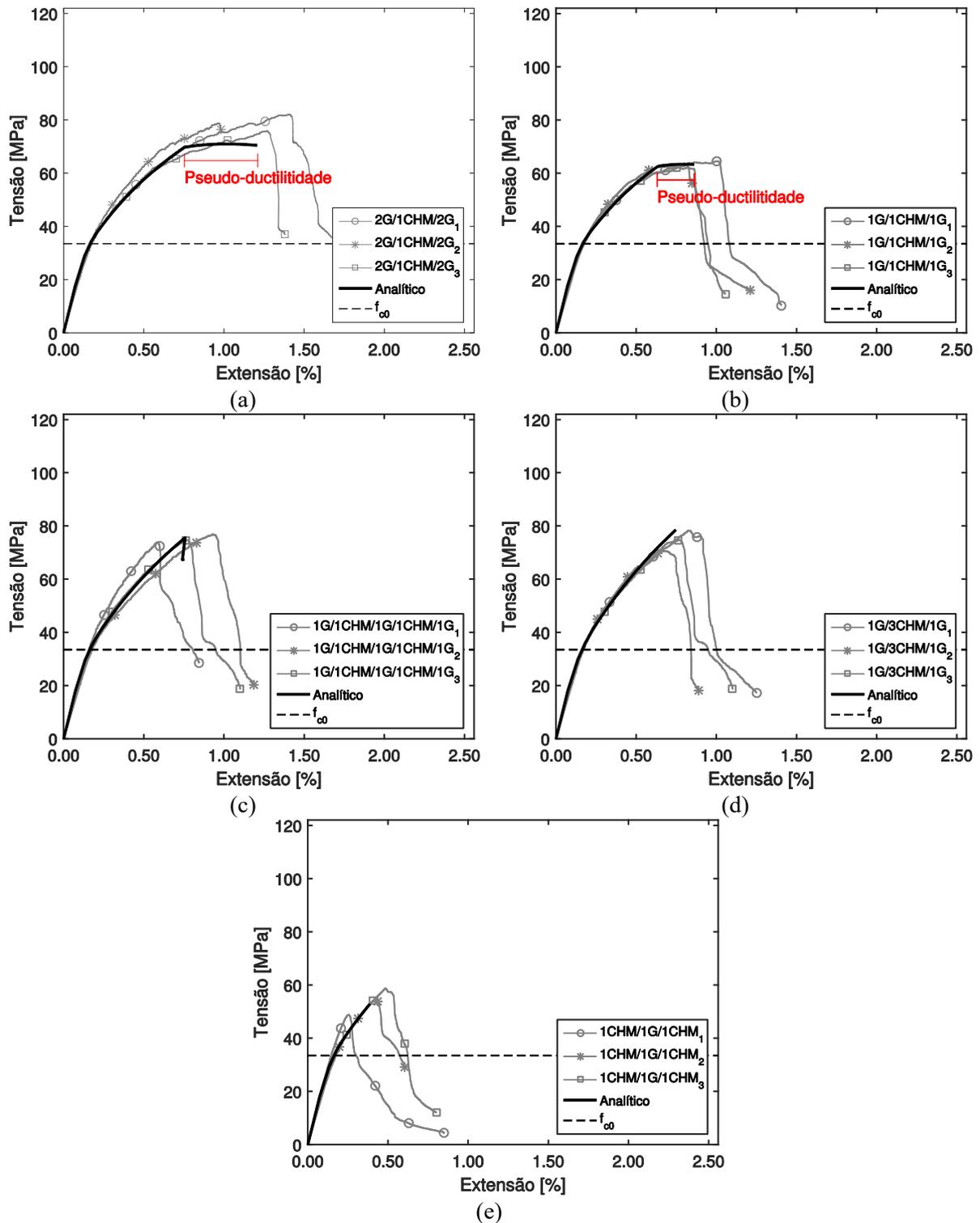


Figura 2 – Curvas tensão-extensão obtidas para as combinações com fibras CHM e G: experimental *versus* analíticas.

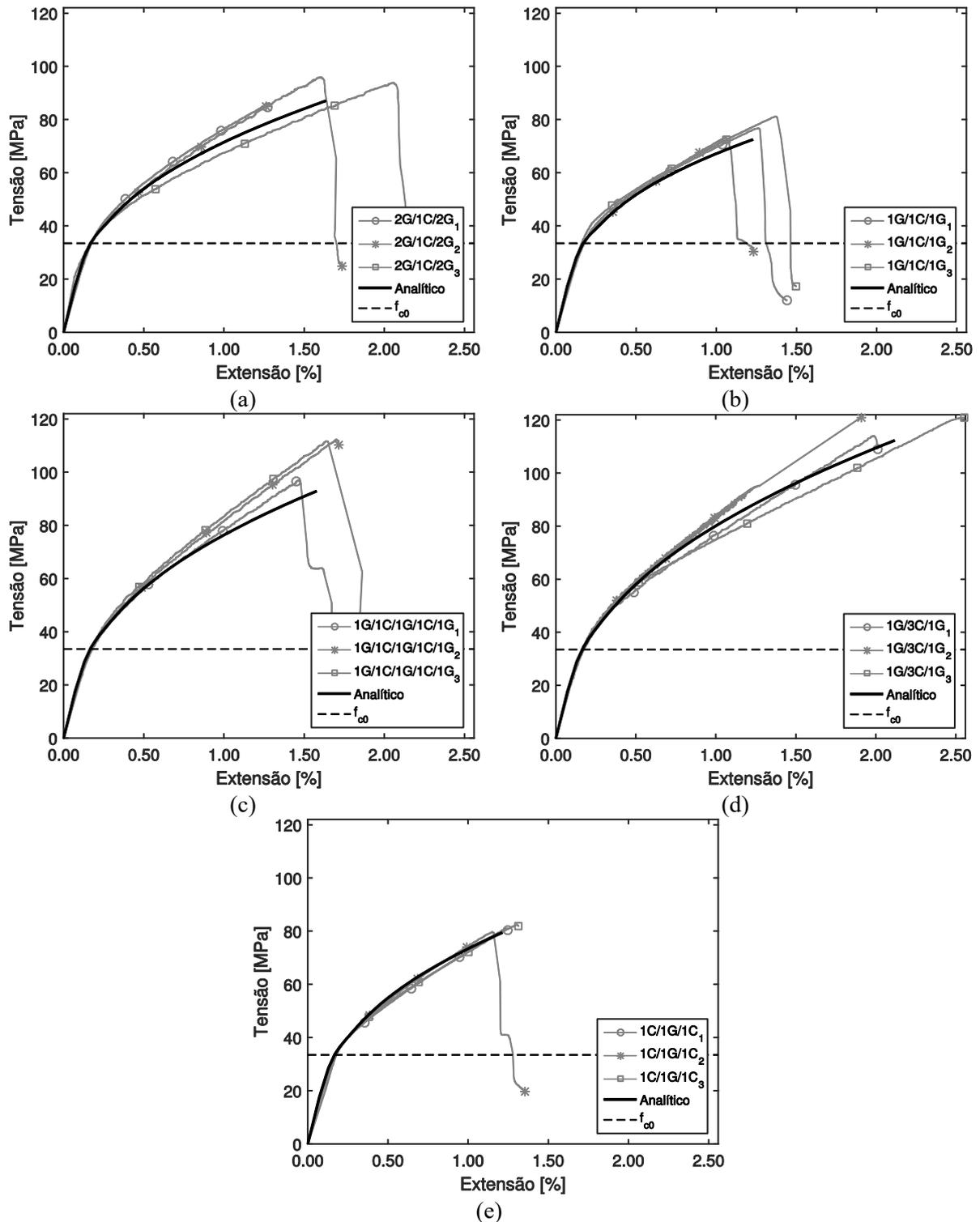


Figura 3 – Curvas tensão-extensão obtidas para as combinações com fibras C e G: experimental versus analíticas.

Nas Figuras 2 e 3 são ainda apresentadas as curvas analíticas obtidas. Comparando os resultados experimentais e analíticos é possível concluir que o modelo sugerido é capaz de prever de forma muito satisfatória a curva tensão-extensão do betão confinado por sistemas de FRP híbridos.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo apresenta-se um estudo sobre comportamento à compressão uniaxial de betão confinado por diversos sistemas de FRP híbridos. Todos os sistemas de confinamento foram fabricados por laminagem manual com recurso a resina epoxídica e mantas de reforço de três materiais distintos: carbono de alto módulo, carbono de alta resistência e vidro do tipo E.

Demonstrou-se que é possível aumentar o coeficiente de eficácia relativo às fibras LS. Para além disso, foi possível obter comportamentos pseudo-dúcteis em duas combinações híbridas utilizadas no confinamento: 2G/1CHM/G e 1G/1CHM/1G. Analisando as curvas tensão – extensão à compressão do betão confinado para as combinações referidas, é possível observar claramente um patamar de cedência. Estes patamares representam uma variação de extensão de 1.10% e 0.89%, nos casos das combinações 2G/1CHM/G e 1G/1CHM/1G, respetivamente.

Por último, destaca-se que os modelos analíticos desenvolvidos permitiram simular de forma satisfatória os resultados experimentais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para Ciência e a Tecnologia – FCT o apoio concebido através da bolsa de doutoramento PD/BD/52660/2014, enquadrada no programa doutoral ‘Eco Construção e Reabilitação’ (EcoCoRe). Este trabalho foi também apoiado por fundos nacionais através novamente da FCT e cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Fatores de Competitividade e Internacionalização (POCI) e do Programa Regional de Lisboa no âmbito dos projetos FRPLongDur POCI-01-0145-FEDER-016900 (PTDC/ECM-EST/1282/2014). Agradece-se também à S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda o fornecimento dos materiais utilizados na campanha experimental.

REFERÊNCIAS

- [1] Lim JC, Ozbakkaloglu T. Lateral Strain-to-Axial Strain Relationship of Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*. 2014;141(5).
- [2] Ribeiro F, Sena-Cruz J, Branco FG, Júlio E. Hybrid effect and pseudo-ductile behaviour of unidirectional interlayer hybrid FRP composites for civil engineering applications. *Construction and Building Materials*. 2018;171:871-90.
- [3] Swolfs Y, Gorbatiikh L, Verpoest I. Fibre hybridisation in polymer composites: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014;67:181-200.
- [4] Ozbakkaloglu T, Lim JC, Vincent T. FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress–strain models. *Engineering Structures* 2013;49 1068–88.
- [5] Lim JC, Ozbakkaloglu T. Unified Stress-Strain Model for FRP and Actively Confined Normal-Strength and High-Strength Concrete. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, ISSN 1090-0268/04014072 (14). 2014.
- [6] CEN. Eurocode 2: Design of concrete structures. EN 1992-1-1:2004 E, Comité Européen de Normalisation, Bruxelles. 2004.
- [7] IPQ. Concrete. Part 1: Specification, performance, production and conformity. NP EN 206-1, Portuguese Quality Institute, Lisbon, Portugal. 2005.
- [8] LNEC. Concrete — Determination of the elasticity young modulus under compression. E397-1993, National Laboratory of Civil Engineering, Lisbon, Portugal. 1993.
- [9] IPQ. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens. EN 12390-3, Portuguese Quality Institute, Lisbon, Portugal. 2011.
- [10] ASTM. D 3379 – 75 - Standard Test Method for Tensile Strength and Young’s Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials. 1989.
- [11] CNR-DT200. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, National Research Council, Rome, Italy. 2013.
- [12] Jalalvand M, Czél G, Wisnom MR. Damage analysis of pseudo-ductile thin-ply UD hybrid composites – A new analytical method. *Composites: Part A*. 2015;69:83–93.