

Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2016
FCTUC – 2 a 4 de novembro de 2016

Resposta à tração uniaxial de sistemas FRP híbridos



Filipe Ribeiro¹



José Sena-
Cruz²



Sandra Nunes³



Fernando G.
Branco⁴



Eduardo Júlio⁵

Resumo

Hoje em dia, encontra-se amplamente reconhecido que o desempenho à compressão do betão, no que se refere tanto à sua resistência como à sua ductilidade, pode ser significativamente melhorado através do seu confinamento com sistemas compósitos de FRP. Esta solução tem particular interesse no reforço de pilares, sendo bastante eficaz no caso de pilares de secção circular, uma vez que a tensão de confinamento mobilizada é uniforme em toda a secção. No entanto, diversos autores têm reportado que a extensão de rotura dos sistemas de FRP utilizados no confinamento é bastante inferior à extensão última obtida nos correspondentes ensaios de tração de provetes planos. A redução de eficácia referida chega, por vezes, aos 50%, nos casos em que se recorre a fibras de maior módulo de elasticidade.

No presente trabalho, recorreu-se a diferentes tipos de fibras, com valores distintos em termos de módulo de elasticidade, resistência, extensão última e custo, dando origem a um sistema híbrido (constituído por diferentes materiais de reforço na mesma matriz). A hibridização está associada à obtenção de um sistema FRP otimizado, em termos de resistência, extensão na rotura, módulo de elasticidade e custo, comparativamente a sistemas FRP tradicionais. Acredita-se que a hibridização pode ser muito vantajosa no caso particular do confinamento de betão, uma vez que permite uma utilização mais eficaz das fibras, em particular as de maior módulo, levando a que estas rompam mais tarde.

As diversas combinações foram ensaiadas à tração, de acordo com a norma EN ISO 527-5. Os resultados obtidos permitiram constatar um efeito positivo nas combinações híbridas, traduzido num aumento entre 8 e 25%, em termos de extensão de rotura das fibras mais rígidas, num aumento entre 5 e 15 %, em termos de extensão última e numa redução do custo entre 28 e 62%, comparativamente aos sistemas FRP não híbridos de referência. Em contrapartida, registaram-se nas combinações híbridas perdas de resistência à tração entre 19 e 55% e de módulo de elasticidade entre 30 e 56%. Constatou-se que a redução de módulo de elasticidade é proporcional à diminuição de custo do produto final.

Palavras-chave: FRP híbrido, ensaios de tração uniaxial, confinamento de pilares

¹ CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal; e-mail: filipet.ribeiro@gmail.com

² ISISE, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal; e-mail: jsena@civil.uminho.pt

³ CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal; e-mail: snunes@fe.up.pt

⁴ INESC-Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal; e-mail: fjbranco@dec.uc.pt

⁵ CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal; e-mail: eduardo.julio@tecnico.ulisboa.pt

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de sistemas FRP híbridos (constituído por diferentes materiais de reforço na mesma matriz), fabricados “in-situ” através da técnica “hand lay-up”, na reabilitação/reforço de estruturas de betão tem vindo a despertar o interesse da comunidade científica. Os trabalhos desenvolvidos até ao momento têm-se centrado, sobretudo, nos elementos de betão estrutural submetidos a esforços de flexão e corte. No caso particular do confinamento de betão, o estado atual de conhecimento, no que diz respeito a esta matéria, ainda se encontra numa fase bastante preliminar. No entanto, os poucos estudos já realizados [1-3] levam a considerar a aplicação dos FRP híbridos como muito promissora.

Neste trabalho recorreu-se a diferentes tipos de fibras com valores distintos em termos de módulo de elasticidade, resistência, extensão última e custo com o intuito de avaliar o seu desempenho combinado à tração. Desta forma, foi possível obter a caracterização das propriedades mecânicas elementares de vários tipos de FRP híbrido. Estes resultados servirão de base para o trabalho que se segue – de otimização de sistemas FRP híbridos destinados ao confinamento de betão.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Confinamento de pilares com sistemas FRP

Hoje em dia, sabe-se que o confinamento lateral do betão (restrição ao desenvolvimento da expansão lateral por efeito de Poisson) permite melhorar tanto a sua resistência à compressão como a sua ductilidade.

No caso dos pilares de secção circular, considera-se que a tensão de confinamento mobilizada pelo FRP, f_l , (que fica submetido essencialmente a tensões de tração) é constante em toda a secção, ver Figura 1. Por norma, este tipo de sistemas de confinamento é designado de passivo, uma vez que a tensão de confinamento surge como resultado da expansão lateral do betão sujeito a compressão axial. No entanto, existem já alguns exemplos de implementação de soluções de confinamento ativas.

Tendo por base a hipótese de compatibilidade de deformações entre o FRP e o betão, a tensão de confinamento última, f_{lu} , tem sido calculada de acordo com a capacidade de extensão última das fibras à tração, ε_f , segundo a Equação (1).

No entanto, diversos autores [4-8] têm reportado que a extensão de rotura, $\varepsilon_{h,rupt}$, dos sistemas de FRP utilizados no confinamento (designada na literatura internacional como “hoop rupture strain”) é bastante inferior à extensão última obtida nos ensaios à tração de provetes planos de FRP. Este fenómeno tem sido atribuído a diversos fatores, tais como: (i) diferenças entre o modo de produção de provetes planos e do confinamento, o que origina variações no produto final; (ii) presença de uma zona de sobreposição no confinamento, o que conduz a uma distribuição não-uniforme de tensões no FRP; (iii) fissuração do betão, o que promove o aparecimento de zonas de concentração de tensões no FRP; e (iv) o facto de, no confinamento, o FRP não se encontrar sujeito a um estado de tração puro.

A relação entre a “hoop rupture strain”, $\varepsilon_{h,rupt}$, e a extensão de rotura das fibras à tração, ε_f , foi inicialmente estudada por Pessiki et al. [9], que propuseram a introdução de um fator de redução, k_ε , definido pela Equação (2). Mais tarde, Lam e Teng [10] sugeriram que a tensão de confinamento última, $f_{lu,a}$, (designada na literatura internacional como “actual confining pressure”) deveria ser calculada tendo em conta o fator de redução, conforme traduzido pela Equação (3).

No trabalho de Lim e Ozbakkaloglu [7] foi estudado de que modo o módulo de elasticidade das fibras influencia a extensão de rotura do FRP quando utilizado no confinamento de pilares. Neste trabalho foram ensaiados 36 provetes, tendo-se variado a classe de resistência do betão, o tipo de fibras

utilizadas (carbono, vidro e aramida) e o número de camadas de confinamento. Para além disso, consideraram-se os resultados de 357 ensaios efetuados por outros autores. Lim e Ozbakkaloglu [7] propuseram a adoção de um fator de redução, k_ε , definido de acordo com a Equação (4).

De acordo com a Equação (4), no confinamento de um betão de resistência à compressão de 25 MPa (betão corrente) com fibras com módulos de elasticidade de 500, 250 e 72.5 GPa, correspondendo a valores típicos das fibras de carbono de alto módulo, fibras de carbono “standard” e fibras de vidro, respetivamente, os correspondentes valores de k_ε são 0.47, 0.66 e 0.79. Estes valores demonstram uma diminuição de eficácia muito acentuada da resistência do FRP, que chega a ser superior a 50% no caso das fibras de carbono de alto módulo.

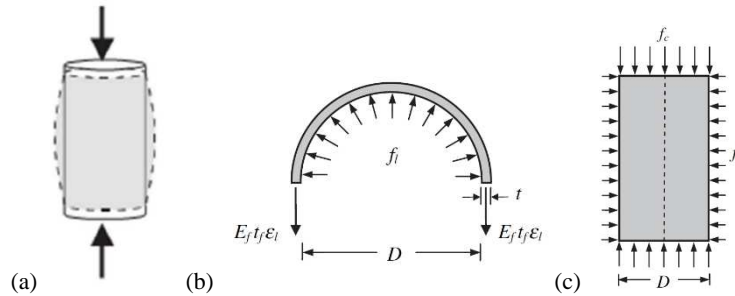


Figura 1. Ação de confinamento mobilizada pelo FRP em pilares circulares: (a) representação esquemática da expansão lateral por efeito de Poisson; (b) diagrama de esforços no FRP; (c) ações sobre núcleo de betão. [8, 11]

$$f_{lu} = \frac{2E_f t_f \varepsilon_f}{D} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{h,rup} = k_\varepsilon \varepsilon_f \quad (2)$$

$$f_{lu,a} = \frac{2E_f t_f \varepsilon_{h,rup}}{D} \quad (3)$$

onde E_f é o módulo de elasticidade das fibras, t_f a espessura do reforço e D o diâmetro da secção transversal do pilar.

$$k_\varepsilon = 0.9 - 2.3f'_{co} \times 10^{-3} - 0.75E_f \times 10^{-6} \quad (4)$$

onde f'_{co} é a resistência à compressão do betão não confinado (em MPa) e E_f o módulo de elasticidade das fibras (em MPa).

2.2. Sistemas FRP híbridos

O tema da hibridização tornou-se particularmente popular durante as décadas 70 e 80 do século passado [12-17]. Ao longo do tempo foram produzidas, pelo menos, três revisões de literatura sobre este assunto, nomeadamente, em 1978 [12], 1987 [18] e 2014 [19]. No primeiro caso, Summerscales e Short [12] apresentam uma ideia consolidada sobre este tipo de solução e explicam que a incorporação de dois ou mais materiais de reforço na mesma matriz é um processo conhecido como hibridização e que o material resultante é normalmente referido como “hybrid” ou “hybrid composite”.

A ideia base deste tipo de soluções é que a hibridização possibilita um maior controle do produto final, permitindo encontrar um equilíbrio entre as vantagens e desvantagens inerentes a cada material constituinte [13]. Tradicionalmente, as fibras utilizadas nos FRP híbridos apresentam diferenças significativas nas suas extensões de rotura e, por essa razão, costumam ser diferenciadas como fibras de elevada extensão última – “high elongation” (HE) ou fibras de baixa extensão última – “low elongation” (LE).

Tradicionalmente, os FRP híbridos podem apresentar diferentes configurações [12, 17, 19]. As três mais comuns encontram-se esquematizadas na Figura 2. No entanto, é possível obter configurações mais complexas, por exemplo, combinando os diferentes casos [19].

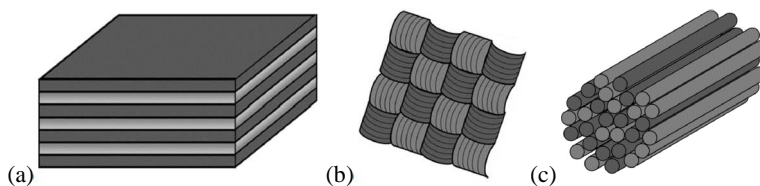


Figura 2. Configurações híbridas: (a) intercamada ou camada-a-camada; (b) intracamada; (c) intrafibra. [19]

É comum referir-se que a hibridização tem a vantagem de promover um aumento da extensão de rotura das fibras LE (ver Figura 3), comparativamente a um sistema de referência constituído pelas mesmas fibras isoladamente [20-22].

Para além disso, a hibridização pode proporcionar um maior controle da rotura do sistema de FRP, na medida em que, por vezes, a rotura deste tipo de sistemas é pseudo-dúctil. Este comportamento faz lembrar a resposta dos metais à tração [19]. Os FRP são conhecidos por serem materiais frágeis e por apresentarem uma rotura repentina. A possibilidade de conceder ductilidade a este tipo de materiais pode revelar-se uma grande vantagem.

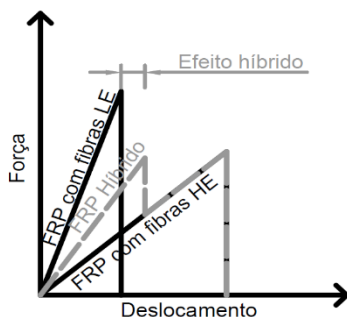


Figura 3. Ilustração do “efeito híbrido”.

De uma forma geral, o módulo de elasticidade dos FRP híbridos pode ser previsto satisfatoriamente recorrendo à “regra das misturas” (designada na literatura internacional como “rule of mixtures”) (ROM) (equação (5)) [18-20, 23, 24]. No trabalho de Kretsis [18] faz-se um levantamento dos resultados experimentais obtidos por diversos autores. Concluiu-se que a ROM permite prever o módulo de elasticidade dos FRP híbridos com erros na ordem dos 10%.

Em contrapartida, a ROM demonstrou ser inapropriada para a prever a resistência dos FRP híbridos [18, 19, 24], devido ao facto dos diferentes tipos de fibras atingirem o seu pico de resistência para extensões diferentes.

$$E_H = \sum_{i=1}^n E_i V_i \text{ em que } \sum_{i=1}^n V_i = 1 \quad (5)$$

onde n é número de materiais constituintes e E_i e V_i são o módulo de elasticidade e a fração de volume de cada material constituinte no FRP híbrido.

Atualmente, os fatores que conduzem ao aparecimento do “efeito híbrido” ainda não se encontram totalmente compreendidos. Para além disso, o conhecimento relativo à aplicação de sistemas FRP híbridos no confinamento de betão é ainda limitado. É necessário perceber como otimizar/controlar as propriedades elementares dos FRP híbridos à tração, e estabelecer a ligação entre este comportamento e o seu desempenho no confinamento pilares.

3. Programa Experimental

Neste trabalho foram analisadas todas as combinações possíveis de 4 materiais de reforço, ou seja, 15 combinações. Recorreu-se a basalto (B) (UD Basalt 400 g/m²), fornecido pela Dalla Betta Group s.r.l. e vidro do tipo AR (G) (G-Sheet AR 90/10 440g/m²), carbono – *standard modulus* (C) (C-Sheet 240 400 g/m²) e carbono – alto módulo (C-HM) (C-Sheet 640 400g/m²), fornecidos pela S&P Clever Reinforcement. Para materialização da matriz, recorreu-se a uma resina epóxi (S&P Resin Epoxy 55), fornecida pela S&P Clever Reinforcement. Os materiais de reforço adotados apresentam um desenvolvimento unidirecional das fibras (sendo habitualmente designados por mantas).

Para cada combinação foram ensaiados 4 provetes à tração, de acordo com a norma ISO 527-5 [25]. No total, a campanha contemplou 60 provetes. Foram estudadas combinações de dois, três e quatro materiais de reforço. As extensões foram medidas com recurso a extensómetros TML FLK-6-11, aplicados na zona central de cada provete e, simultaneamente, na camada de fibras com maior capacidade de extensão. Para registo da carga, recorreu-se a uma célula de carga com capacidade de 200 kN. As zonas de amarração de cada provete foram protegidas com “tabs” em liga metálica.

O processo fabrico dos provetes iniciou-se com a aplicação de uma camada de resina sobre uma superfície plana em Teflon (que assumiu a função de molde) e, de seguida, pela colocação de uma camada de fibras sobre essa camada inicial de resina. A última foi pressionada, com recurso a um rolo de borracha, de forma a expulsar o excesso de resina e algum do conteúdo de ar da mesma. O processo foi repetido para aplicação de camadas de reforço sucessivas. Por fim, aplicou-se uma camada de resina com função protetora. Este tipo de técnica de fabrico é normalmente designado por “hand lay-up”.

Através do processo atrás indicado, foram produzidos manualmente laminados com 80 mm de largura e 270 mm de comprimento (ver Figura 4 (a)). Estes laminados permitiram, através do seu corte (ver Figura 4 (b)), obter provetes (com 250 mm de comprimento, 15 mm de largura e 150 mm de comprimento entre “tabs”) destinados aos ensaios de tração (ver Figura 4 (c) e (d)). Teve-se o cuidado de obter cada provete a partir da zona mais central dos laminados originais de forma a evitar possíveis efeitos de fronteira.

No Quadro 1 apresentam-se as combinações de materiais de reforço analisadas.

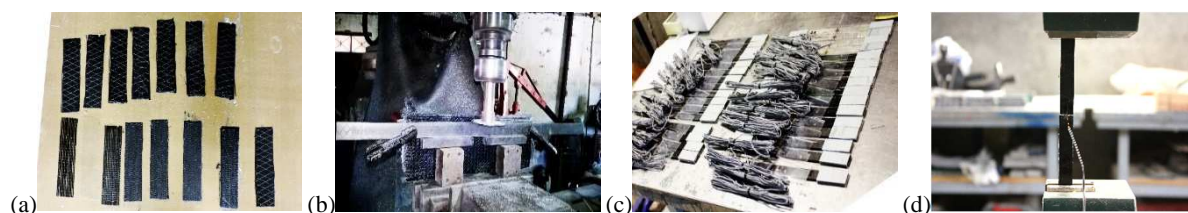


Figura 4. Sequência de produção dos provetes: (a) laminados híbridos originais; (b) obtenção dos provetes através do corte; (c) provetes finalizados; (d) ilustração do ensaio de tração.

Quadro 1. Combinações analisadas - distribuição em volume.

| Comb. Mat. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---------------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| B | 100% | 0% | 50% | 0% | 40% | 0% | 29% | 0% | 44% | 0% | 31% | 0% | 26% | 0% | 21% |
| G | 0% | 100% | 50% | 0% | 0% | 40% | 29% | 0% | 0% | 44% | 30% | 0% | 0% | 26% | 21% |
| C | 0% | 0% | 0% | 100% | 60% | 60% | 43% | 0% | 0% | 0% | 0% | 54% | 40% | 40% | 31% |
| C-HM | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 56% | 56% | 39% | 46% | 34% | 34% | 27% |

De referir que, cada combinação foi materializada recorrendo sempre a apenas uma camada de cada material de reforço. As mantas utilizadas possuíam uma gramagem teórica próxima dos 400 g/m². No entanto, nos ensaios registaram-se pequenas variações deste valor, particularmente notórias nas fibras de carbono. Neste caso a gramagem revelou-se ligeiramente superior à de referência. Essas variações foram tidas em consideração na determinação da distribuição dos volumes.

Como se pode observar no Quadro 1, algumas das combinações correspondem a sistemas FRP não híbridos, nomeadamente as combinações 1, 2, 4 e 8. Para estes casos apresentam-se no Quadro 2 os resultados médios obtidos nos ensaios de tração.

Quadro 2. Resposta experimental dos sistemas FRP não híbridos.

| Material | Resistência à tração [MPa] | Extensão última [%] | Módulo de elasticidade [GPa] |
|----------|----------------------------|---------------------|------------------------------|
| B | 1790.16 | 2.14 | 83.44 |
| G | 1341.16 | 1.87 | 85.01 |
| C | 2727.07 | 1.06 | 251.30 |
| C-HM | 2109.36 | 0.33 | 597.99 |

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nas Figuras 5 a 7 apresentam-se os resultados experimentais obtidos para todas as combinações híbridas estudadas, em termos de tensão *versus* extensão. Cada ensaio é identificado com uma numeração do tipo X_y , onde X é número da combinação identificada no Quadro 1 e y o número do provete em causa.

De uma forma geral, é possível observar que as combinações híbridas, representadas com linhas coloridas, apresentaram resistências e módulos de elasticidade sempre inferiores às combinações não híbridas, representadas em tons de cinza. As combinações 5, 6 e 7 apresentaram uma resposta híbrida onde se pode identificar dois picos de tensão (que correspondem aos pontos de rotura das fibras LE e HE). No entanto, a maioria das combinações (9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15) apresentaram comportamentos pseudo-dúcteis. A combinação 3 revelou-se linear até à rotura. Acredita-se que este comportamento teve lugar devido à proximidade das propriedades mecânicas dos materiais utilizados.

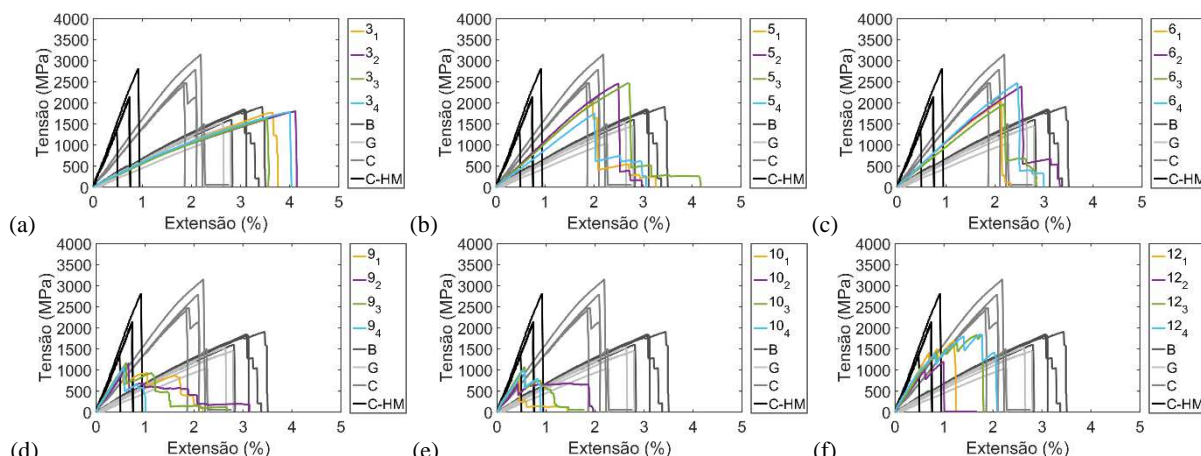


Figura 5. Respostas à tração das combinações híbridas de 2 materiais.

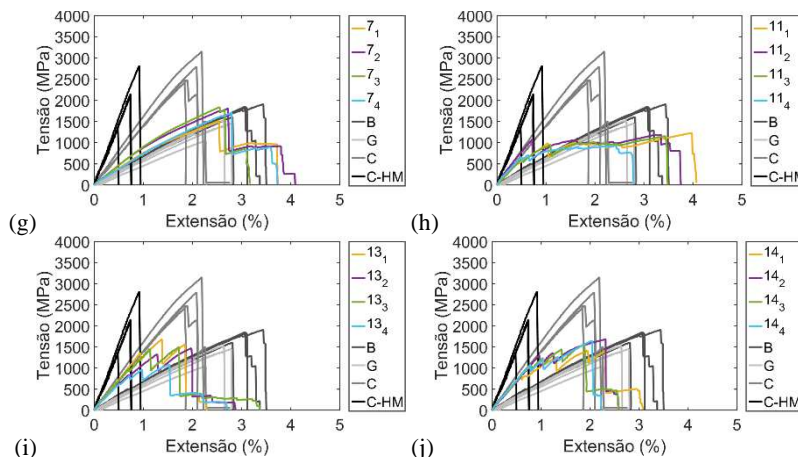


Figura 6. Respostas à tração das combinações híbridas de 3 materiais.

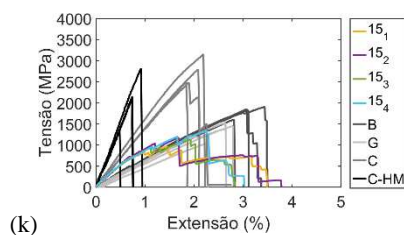


Figura 7. Respostas à tração das combinações híbridas de 4 materiais.

Verificou-se que as previsões da resistência, segundo a ROM, apresentaram um erro relativo de 32%, em média (ver Quadro 3), relativamente aos resultados experimentais. Este valor, apesar de elevado, é concordante com o esperado, uma vez que a bibliografia indica a inadequação da ROM para prever esta propriedade. Já no que diz respeito ao módulo de elasticidade, o erro relativo entre as previsões e os resultados experimentais situou-se nos 6 %, em média (ver Quadro 3). Este resultado está igualmente de acordo com o que consta na bibliografia. Confirma-se, portanto, a adequabilidade da ROM para prever o módulo de elasticidade dos FRP híbridos.

Quadro 3. Resultados teóricos vs resultados experimentais.

| Combinações | Resistência à tração | | | Módulo de elasticidade | | |
|-------------|----------------------|--------------|------|------------------------|--------------|------|
| | Teórico (ROM) | Experimental | Erro | Teórico (ROM) | Experimental | Erro |
| C-HM C | 2442.9 | 1377.6 | 44% | 410.8 | 437.2 | -6% |
| B G | 1565.7 | 1739.7 | -11% | 84.2 | 80.6 | 4% |
| C-HM G | 1771.4 | 895.4 | 49% | 372.2 | 330.0 | 11% |
| C-HM B | 1968.9 | 1090.7 | 45% | 371.6 | 350.7 | 6% |
| C G | 2172.7 | 2217.9 | -2% | 184.8 | 162.2 | 12% |
| C B | 2352.3 | 2164.0 | 8% | 184.2 | 176.8 | 4% |
| C G B | 2080.7 | 1712.6 | 18% | 156.9 | 141.7 | 10% |
| C-HM G B | 1780.0 | 929.9 | 48% | 284.6 | 269.8 | 5% |
| C-HM C B | 2273.5 | 1000.4 | 56% | 325.5 | 305.8 | 6% |
| C-HM C G | 2156.7 | 1050.3 | 51% | 325.9 | 318.4 | 2% |
| C-HM C G | 2072.5 | 1144.6 | 45% | 274.7 | 254.9 | 7% |
| Média | | | 32% | | | 6% |
| Desv. Pad. | | | 24% | | | 5% |

Relativamente às combinações de 2 materiais, os resultados obtidos permitiram verificar a existência de uma relação entre o “efeito híbrido” e o “*HE/LE strain ratio*”, definido como o quociente entre a extensão última das fibras HE e a extensão última das fibras LE. Constatou-se que há uma tendência para uma diminuição do “efeito híbrido” à medida que o “*HE/LE strain ratio*” aumenta (ver Figura 8). Nos casos em que o “*HE/LE strain ratio*” se apresentou mais elevado o “efeito híbrido” revelou-se negativo. De referir que a combinação C-HM C produziu um “efeito híbrido” nulo.

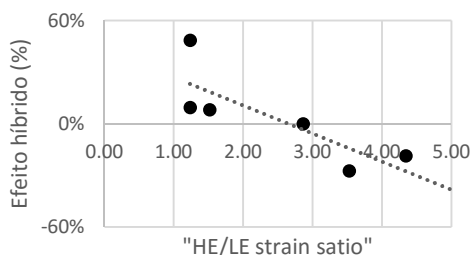


Figura 8. “Efeito híbrido” em função do “*HE/LE strain ratio*” (mistura de $\approx 50\%+50\%$, em volume).

Os resultados relativos ao “efeito híbrido”, alcançados nos provetes constituídos por C e G, C e B, C-HM e G e C-HM e B, encontram-se representados na Figura 9. Identificou-se a existência de duas tendências distintas para cada um dos tipos carbono utilizados.

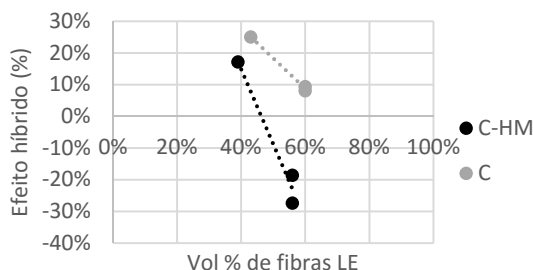


Figura 9. “Efeito híbrido” em função do volume de fibras LE.

Na Figura 10 (a) pode-se observar que a combinação de B ou G com os dois tipos de carbonos (C-HM ou C) promove o aparecimento de “efeitos híbridos” muito semelhantes. No caso das combinações com C-HM, o “efeito híbrido” revelou-se negativo, entre -19 e -27%, o que indica que C-HM atinge a rotura antes do que aconteceria no FRP não híbrido. Já no caso das combinações com C, o “efeito híbrido” foi positivo, entre 8 e 9%, indicando um melhor comportamento do FRP híbrido comparativamente aos casos não híbridos. Na Figura 10 (b) pode-se observar que a diminuição do volume dos carbonos, de 56-60% para 39-43% do produto final, (ver Quadro 1) permitiu aumentar consideravelmente o “efeito híbrido”, até a um máximo de 25%.

Na Figura 11 pode observar-se que hibridização promoveu igualmente aumentos da extensão última, relativamente às fibras HE. As variações observadas acompanharam aquilo que se referiu anteriormente para o “efeito híbrido”.

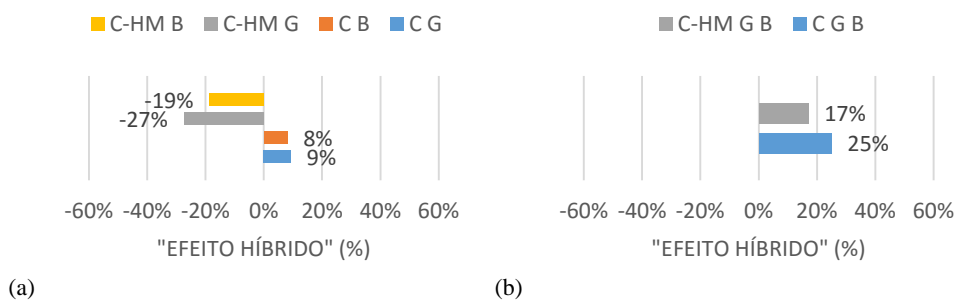


Figura 10. “Efeito híbrido”: (a) 56-60% de LE; (b) 39-43% de LE.

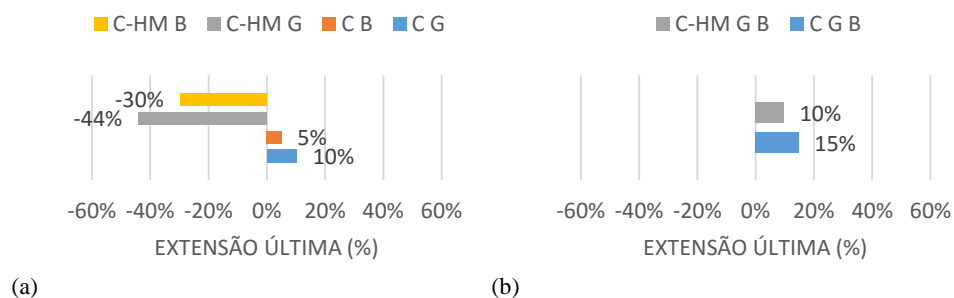


Figura 11. Variação da extensão última: (a) 56-60% de LE; (b) 39-43% de LE.

As melhorias promovidas pelo “efeito híbrido” revelaram estar associadas a perdas de resistência e de módulo de elasticidade. Na Figura 12 e na Figura 13 é possível observar que as perdas referidas são bastante semelhantes no que respeita às duas propriedades.

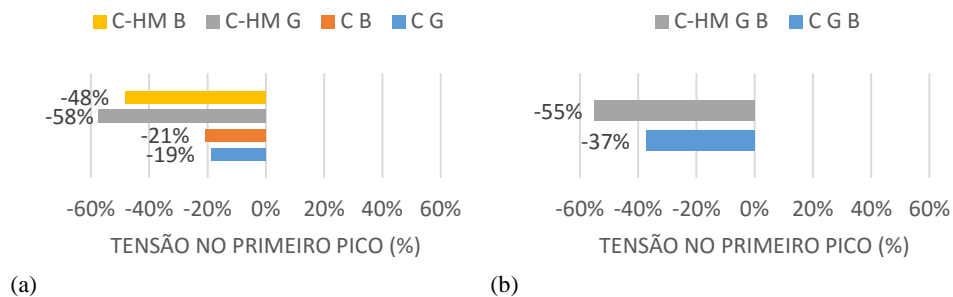


Figura 12. Variação da tensão de pico: (a) 56-60% de LE; (b) 39-43% de LE.

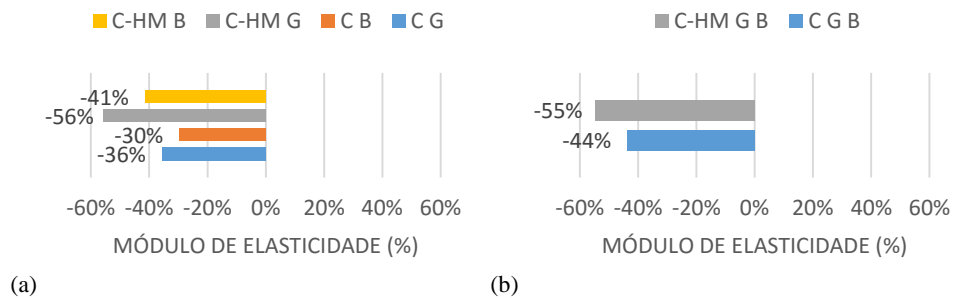


Figura 13. Módulo de elasticidade: (a) 56-60% de LE; (b) 39-43% de LE.

As diminuições de módulo atrás enunciadas apresentaram uma relação linear com a diminuição do custo do produto final. As reduções de custos foram determinadas de acordo com o preço de venda ao público indicado pelos fabricantes. Essa relação encontra-se ilustrada na Figura 14.

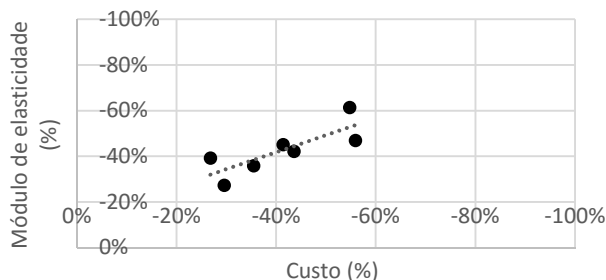


Figura 14. Perda de módulo de elasticidade em função da diminuição do custo.

5. CONCLUSÕES

Diversos autores têm relatado que a extensão de rotura dos sistemas de FRP utilizados no confinamento de betão é bastante inferior à extensão última obtida nos ensaios à tração de provetes planos de FRP. Este fenómeno é mais acentuado quando se recorre a fibras de maior módulo de elasticidade. Neste caso, as reduções de extensão última e, conseqüentemente, de resistência podem ser superiores a 50%. A hibridização revela-se como uma solução que pode contribuir para atenuar esta perda de desempenho, uma vez que permite uma utilização mais eficaz das fibras de maior módulo (levando a que estas rompam mais tarde).

Neste trabalho foram ensaiadas à tração 15 combinações de 4 materiais de reforço, nomeadamente: (i) basalto, (ii) vidro, (iii) carbono *standard modulus* e (iv) carbono de alto módulo, com o objetivo de obter a caracterização elementar deste tipo de materiais. O trabalho desenvolvido permitiu obter as seguintes conclusões:

1. A hibridização, quando eficaz, permite tirar maior partido das fibras LE e, simultaneamente, reduzir o custo do produto final;

2. Os FRP's híbridos apresentam menor resistência e módulo de elasticidade do que os correspondentes casos não híbridos;
3. Quanto maior o efeito híbrido, maior a perda de resistência e módulo de elasticidade;
4. Na grande maioria dos casos, a hibridização promove uma resposta pseudo-dúctil;
5. A ROM demonstra-se adequada para prever o módulo de elasticidade dos FRP's híbridos, mas não a resistência;
6. Quanto maior o "HE/LE Strain Ratio", menor o "efeito híbrido";
7. Quanto maior o volume de fibras LE, menor o "efeito híbrido";
8. Nas combinações de carbono e vidro, ou de carbono e basalto, uma camada extra de basalto ou vidro aumenta significativamente o "efeito híbrido";
9. As combinações com carbono apresentam maiores "efeitos híbridos" do que as combinações com carbono de alto módulo;
10. Em todas as variáveis de resposta analisadas, a utilização do basalto ou do vidro produziram resultados muito semelhantes;
11. A combinação de carbono *standard* com carbono de alto módulo produziu um efeito híbrido nulo;
12. Quanto maior a perda de módulo de elasticidade, maior é a redução de custo.

Faz parte dos objetivos dos autores desenvolver um sistema FRP híbrido otimizado de forma a tirar o maior partido destes materiais no confinamento de pilares de betão. Este trabalho consiste numa primeira aproximação ao tema. As conclusões alcançadas permitirão definir a melhor a estratégia a seguir para atingir esse fim.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas S&P Clever Reinforcement e Dalla Betta Group s.r.l o apoio prestado ao nível do fornecimento dos materiais destinados à campanha experimental. Este trabalho foi também apoiado por fundos nacionais através 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). Os autores agradem ainda a disponibilidade e a colaboração do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST). O primeiro autor agradece à FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia – o apoio concebido através da bolsa de doutoramento PD/BD/52660/2014, enquadrada no programa doutoral 'Eco Construção e Reabilitação' (EcoCoRe).

REFERÊNCIAS

- [1]. Long Y-L, Zhu J (2014) Experimental Study on Concrete Columns with Various Sizes Confined by BFRP and hybrid FRP under Axial Compression. *Advanced Materials Research* Vols. 838-841 pp 407-411.
- [2]. Li L-J, Xu S-D, Zeng L, Guo Y-C (2013) Study on mechanical behavior of circular concrete columns confined by HFRP under axial compressive load. *Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation* – Zingoni (Ed.) ISBN 978-1-138-00061-2.
- [3]. Xu S, Li L, Guo Y (2012) Study on experimental behavior of concrete circular column confined by HFRP under axial compression. *Advanced Materials Research* Vols. 450-451 pp 491-494.
- [4]. Csuka B (2012) Axially loaded FRP confined reinforced concrete cross-sections. PhD, Budapest University of Technology and Economics.
- [5]. Cui C (2009) Behaviour Of Normal And High Strength Concrete Confined With Fibre Reinforced Polymers (FRP). PhD, Department of Civil Engineering University of Toronto.

- [6]. Wu Y-F, Jiang J-F (2012) Effective strain of FRP for confined circular concrete columns. *Composite Structures* 95 479–491.
- [7]. Lim J, Ozbakkaloglu T (2014) Hoop strains in FRP-confined concrete columns: experimental observations. *Materials and Structures* DOI 10.1617/s11527-014-0358-8.
- [8]. Ozbakkaloglu T, Lim JC, Vincent T (2013) FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress–strain models. *Engineering Structures* 49 1068–1088.
- [9]. Pessiki S, Harries K, Kestner J, Sause R, Ricles J (2001) The axial behavior of concrete confined with fiber reinforced composite jackets. *ASCE J Compos Constr* 5(4):237–45.
- [10]. Lam L, Teng J (2003) Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete. *Constr Build Mater* 17(6–7):471–89.
- [11]. Masuelli M (2013) *Fiber Reinforced Polymers - The Technology Applied for Concrete Repair*. INTECH <http://dx.doi.org/10.5772/54629>.
- [12]. Summerscales J, Short D (1978) Carbon fibre and glass fibre hybrid reinforced plastics. *Composites*;9(3):157–66.
- [13]. Marron G, Fisher S, Tuler FR, Wagner HD (1978) Hybrid effects in composites: conditions for positive or negative effects versus rule-of-mixtures behaviour *Journal of Materials Science*; 13(7):1419–26.
- [14]. Phillips LN (1969) Improving racing-car bodies. *Composites* 1 No 1 pp 50-51.
- [15]. Zweben C (1977) Tensile strength of hybrid composites. *Journal of Materials Science* 12 1325-1337.
- [16]. Kirk JN, Munro M, Beaumont PWR (1978) The fracture energy of hybrid carbon and glass fibre composites. *Journal of Materials Science* 2197-2204.
- [17]. Hancox NL, Wells H (1979) Aluminum/Carbon Fiber Hybrid Composites. *Polymer Engineering and Science*, Vol.19, No. 13.
- [18]. Kretsis G (1987) A review of the tensile, compressive, flexural and shear properties of hybrid fibre-reinforced plastics. *Composites* Volume 18. No 1 January 1987.
- [19]. Swolfs Y, Gorbatiikh L, Verpoest I (2014) Fibre hybridisation in polymer composites: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 67 p. 181-200.
- [20]. Manders PW, Bader MG (1981) The strength of hybrid glass/carbon fibre composites - Part 1. *Journal of Materials Science* 16 2233-2245.
- [21]. Fukunaga H, Chou T-W, Peters PWM, Schulte K (1984) Probabilistic Failure Strength Analyses of Graphite/Epoxy Cross-Ply Laminates. *Journal Of Composite Materials* , Vol. 18.
- [22]. Harlow BG (1983) Statistical Properties of Hybrid Composites. I. Recursion Analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A* 389, 67-100.
- [23]. Pan N, Postle R (1996) The tensile strength of hybrid fibre composites: a probabilist analysis of hybrid effects. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 354, 1875-1897.
- [24]. Shan Y, Liao K (2002) Environmental fatigue behavior and life prediction of unidirectional glass–carbon/epoxy hybrid composites. *International Journal of Fatigue* 24 847–859.
- [25]. ISO 527-5 (2009) *Plastics — Determination of tensile properties; Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*. European committee for standardization.