

Varões Compósitos Entrançados para Reforço do Betão

C. Gonilho Pereira¹, R. Fangueiro², Said Jalali³, M. Araújo⁴, P. Pina Marques⁵

RESUMO

A corrosão do aço é o mais grave problema associado às estruturas de betão armado e a deterioração destas afecta não só o tempo de vida útil das estruturas assim como engloba elevados custos associados à manutenção, reabilitação e reparação das mesmas. Neste contexto surgem os varões poliméricos reforçados por fibras e a grande atenção dispensada pela comunidade científica sobre este tema. A grande vantagem do uso destes varões, em relação ao aço, prende-se pela sua elevada resistência à corrosão. O trabalho aqui apresentado prende-se com a utilização de uma tecnologia têxtil convencional – entrançamento – para produzir varões compósitos entrançados nervurados, para reforço de betão. Recorrendo à tecnologia do entrançamento torna-se possível produzir varões compósitos reforçados com um estrutura entrançada nervurada, com reforço axial. Este trabalho apresenta os resultados experimentais de diferentes tipos de varões compósitos entrançados produzidos, fazendo variar o tipo de fibra de elevado desempenho, utilizada no reforço axial da estrutura entrançada. Fibra de vidro, carbono e polietileno de alta tenacidade foram utilizadas em diferentes combinações. O desempenho em tracção dos varões foi avaliado de forma a identificar quais as fibras que contribuem para o melhor comportamento mecânico.

PALAVRAS-CHAVE

Varão, fibras, compósito, corrosão, betão

¹ Universidade do Minho, Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. cristiana.pereira@civil.uminho.pt

² Universidade do Minho, Engenharia Têxtil, 4800-058 Guimarães, Portugal. rfang@det.uminho.pt

³ Universidade do Minho, Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. said@civil.uminho.pt

⁴ Universidade do Minho, Engenharia Têxtil, 4800-058 Guimarães, Portugal. maraujo@det.uminho.pt

⁵ Universidade do Minho, Engenharia Têxtil, 4800-058 Guimarães, Portugal. paula@det.uminho.pt

1. INTRODUÇÃO

A corrosão do aço é uma das mais graves e significativas patologias associada às estruturas de betão armado e a deterioração destas afecta não só o tempo de vida útil das estruturas assim como engloba elevados custos associados à manutenção, reabilitação e reparação das mesmas.

Têm sido desenvolvidas várias técnicas com o intuito de eliminar a corrosão dos elementos de aço, tais como aço inoxidável, galvanizado, revestido a epoxi, etc., contudo nenhuma destas técnicas é eficaz na resolução dos problemas da corrosão. Neste contexto surgem os varões poliméricos reforçados por fibras e a grande atenção dispensada pela comunidade científica sobre este tema. A grande vantagem do uso destes varões, em relação ao aço, prende-se pela sua elevada resistência à corrosão e surgem como solução aos problemas de durabilidade das estruturas de betão reforçadas com o tradicional aço. Os varões poliméricos reforçados por fibras, para além da excelente resistência à corrosão, apresentam como vantagens as propriedades mecânicas semelhantes ao aço, o elevado rácio tensão de rotura-peso, excelente resistência à fadiga, entre outros [1, 2]. Desta forma, a substituição dos varões de aço pelos varões poliméricos reforçados por fibras como a ganhar expressão.

Os varões poliméricos reforçados por fibras são produzidos por pultrusão, dando origem a varões com superfície lisa. Quando utilizados no reforço de betão, a aderência varão-betão é de extrema importância e torna-se necessário efectuar tratamentos na superfície dos varões de forma a dotá-la de nervuras, indentes, ou outras formas de favorecer a aderência mecânica varão-betão. Desta forma, varões poliméricos reforçados por fibras produzidos por pultrusão, para serem utilizados como material de reforço de elementos de betão, são produzidos em duas etapas – produção do varão propriamente dito e tratamento da sua superfície para melhor as condições de aderência ao betão.

Para além da pultrusão, os varões poliméricos reforçados por fibras podem ser produzidos pela técnica do entrançamento[3, 4]. O entrançamento é uma técnica têxtil convencional, usada pela indústria da cordoaria, na produção de cordas e cabos. É uma técnica de baixo custo, quer na aquisição dos equipamentos, quer na operação e manutenção, que permite a orientação multiaxial de fibras. Desta forma, a técnica do entrançamento permite a utilização e orientação racional de vários tipos de fibras permitindo uma optimização do produto final [5]. O entrançamento permite também produzir estruturas nervuradas e uma panóplia de produtos com diferentes desempenhos mecânicos podem ser produzidos variando o tipo de fibras utilizadas, nomeadamente as fibras de reforço axial [6, 7]. Contrariamente ao que acontece com a técnica de pultrusão, o entrançamento permite a produção de varões com superfície nervurada numa única etapa.

2. OBJECTIVOS, TRABALHO EXPERIMENTAL E RESULTADOS OBTIDOS

O presente trabalho visa o desenvolvimento de varões compósitos entrançados para aplicação no reforço interno de elementos de betão, substituindo os varões de aço convencionais. Desta forma, varões poliméricos reforçados por fibras são produzidos pela técnica do entrançamento, permitindo, numa única etapa, produzir varões com superfície nervurada.

As propriedades mecânicas dos varões compósitos entrançados são influenciadas, para além de outros factores, pelo tipo de fibra utilizada no reforço axial da estrutura entrançada

O objectivo do trabalho experimental aqui apresentado é a avaliação da influência que o tipo de fibra, utilizada no reforço axial da estrutura entrançada, tem nas propriedades mecânicas do varões. Desta forma, foram produzidos diversos varões compósitos entrançados, variando o tipo de fibras utilizadas no reforço da estrutura entrançada. Fibras de vidro tipo E, carbono e polietileno de alta tenacidade foram utilizadas para reforçar axialmente estruturas entrançadas de fibra de poliéster. A matriz utilizada foi uma resina de poliéster.

2.1 Trabalho experimental e resultados obtidos

2.1.1 Produção dos varões compósitos entrançados

O entrançamento é uma das técnicas mais antigas para produzir estruturas têxteis. Normalmente utilizada pela indústria da cordoaria, utilizada na produção de cabos e cordas, as estruturas entrançadas são muito interessantes para o reforço de materiais compósitos uma vez que permitem uma orientação multi-axial de fibras e apresentam conformidade, estabilidade torsional e resistência ao desgaste, associadas ao baixo custo de operação [6]. O princípio básico do entrançamento é o entrelaçamento de dois sistemas de fios obtendo-se uma estrutura entrançada, tubular ou plana. Quando se pretende efectuar o reforço longitudinal, de uma estrutura entrançada tubular, pode inserir-se um terceiro sistema de fios entre o entrançado, produzindo-se assim uma estrutura triaxial com orientação dos fios a zero graus – estrutura entrançada com reforço axial (fig. 1). Os varões compósitos entrançados resultam da impregnação numa matriz polimérica da estrutura entrançada com reforço axial.



Figura 1. Equipamento utilizado na produção dos varões compósitos entrançados

2.1.2 Materiais utilizados

Foram produzidos sete tipos diferentes de varões compósitos entrançados neste estudo. A estrutura entrançada foi produzida com fibra de poliéster e para reforço da estrutura entrançada foram utilizadas fibras de vidro-E, carbono e polietileno de alta tenacidade. A matriz polimérica utilizada foi uma resina de poliéster.

Os sete varões compósitos entrançados foram produzidos matendo constante a geometria e densidade linear do entrançado e fazendo variar o tipo de fibras utilizadas no reforço axial da estrutura entrançada, de acordo com o quadro 1.

As estruturas entrançadas foram reforçadas axialmente com um único tipo de fibra, bem como com dois ou três tipos de fibras, em diferentes combinações. O objectivo foi o de avaliar de que forma é que cada tipo de fibra, e sua percentagem, influenciam o desempenho mecânico dos varões compósitos entrançados. O quadro 1 apresenta a composição dos sete varões compósitos produzidos, nomeadamente a percentagem de cada tipo de fibra na densidade linear total do reforço axial.

Quadro 1. Composição dos varões compósitos entrançados

Varão	Fibra de reforço - tipo		
	Vidro-E [%]	Carbono [%]	Polietileno de alta tenacidade [%]
1	100	-	-
2	77	23	-
3	53	47	-
4	-	100	-
5	50	45	5
6	52	45	3
7	75	22	3

O tipo de fibra e respectiva quantidade foi escolhida de forma a permitir as seguintes comparações do comportamento mecânico dos diferentes varões: os varões compósitos 1, 2, 3 e 4 permitem identificar a influência da presença das fibras de vidro-E e de carbono no comportamento à tracção; os varões 2 e 7 permitem identificar a influência da presença das fibras de polietileno de alta tenacidade no comportamento à tracção; a influência da quantidade de fibra de polietileno de alta tenacidade, no comportamento à tracção dos varões, pode ser avaliada recorrendo aos varões 3, 5 e 6.

2.1.3 Avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos varões compósitos entrançados

A avaliação da fracção mássica, relativa ao reforço axial da estrutura entrançada, dos varões compósitos foi efectuada de acordo com a Norma Portuguesa 2216/1988 (determinação da perda de massa por calcinação de materiais plásticos reforçados com fibra de vidro). O quadro 2 apresenta os diâmetros dos varões compósitos produzidos bem como a sua fracção mássica, relativa às fibras de reforço axial.

Quadro 2. Propriedades físicas dos varões compósitos entrançado (valores médios)

Varão	Diâmetro [mm]	Fracção mássica (fibras de reforço) [%]
1	5,50	40,6
2	5,27	35,3
3	5,75	31,8
4	6,40	33,3
5	6,00	35,6
6	5,98	32,7
7	5,78	33,7

O diâmetro dos varões compósitos varia entre 5.26 e 6.40mm e a fracção mássica, relativa às fibras de reforço axial da estrutura entrançada, varia entre 31.8 e 40.6%. De acordo com a figura 2, parece não existir relação entre o diâmetro dos varões compósitos e a sua fracção mássica. A quantidade de resina varia de varão para varão.

Aquando da produção dos varões compósitos entrançados e durante a cura da resina de poliéster, em laboratório à temperatura de cerca de 20°C, as fibras de reforço axial da estrutura entrançada foram sujeitas a uma pré-tensão de 100N.

De forma avaliar o desempenho mecânico dos varões compósitos entrançados, foram realizados ensaios de tracção uniaxial de acordo com a norma ASTM D 3916-94 (velocidade de ensaio de 5 mm/min). O ensaio de tracção foi realizado após aplicação de uma pré-tensão de 50KN aos varões. O quadro 3 apresenta os valores médios obtidos com o ensaio de tracção para cada varão.

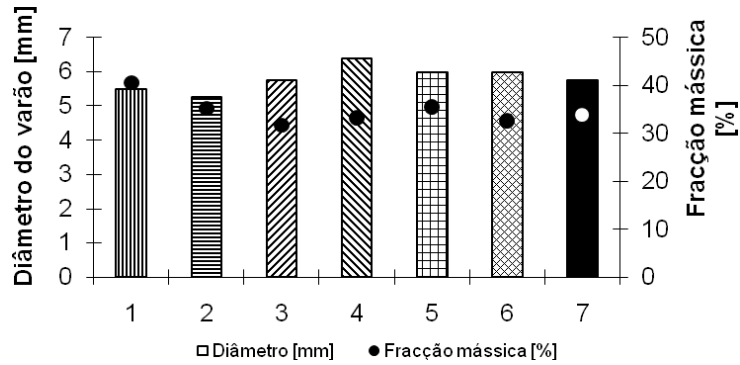


Figura 2. Diâmetro e fracção mássica dos varões compósitos entrancados

Quadro 3. Resultados do ensaio de tracção (valores médios)

Varão	Tensão de rotura [MPa]	Extensão na rotura	Tensão de rotura a 0.2% de extensão [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]
1	485,35	0,01701	110,73	55,36
2	766,70	0,01416	157,05	78,52
3	740,41	0,01178	148,96	74,48
4	747,77	0,01183	192,58	96,29
5	679,45	0,01105	167,84	83,92
6	652,77	0,01098	162,17	81,09
7	690,99	0,01438	146,40	73,20

Analisando as tensões de rotura dos varões compósitos entrancados, pode concluir-se que o varão 2 apresenta a maior capacidade de carga. Os varões 3 e 4, quando comparados com o varão 2, apresentam uma diminuição da tensão de rotura de cerca de 3%. O varão 1 apresenta a tensão de rotura mais baixa (fig. 3).

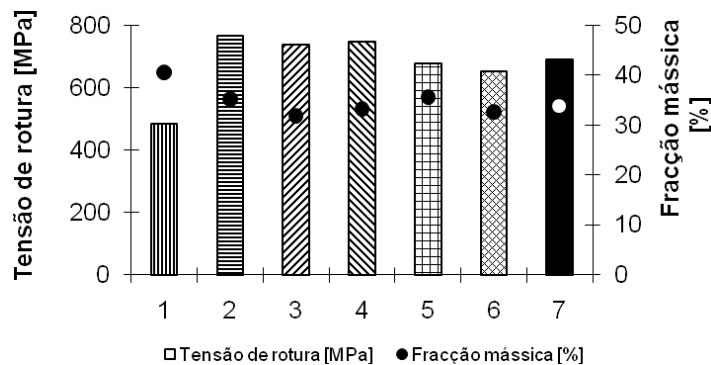


Figura 3. Influência do tipo de fibra de reforço na tensão de rotura dos varões compósitos entrancados. No que diz respeito à extensão na rotura, verifica-se que o varão 1 apresenta o valor mais elevado enquanto o varão 6 apresenta a menor extensão na rotura (fig. 4).

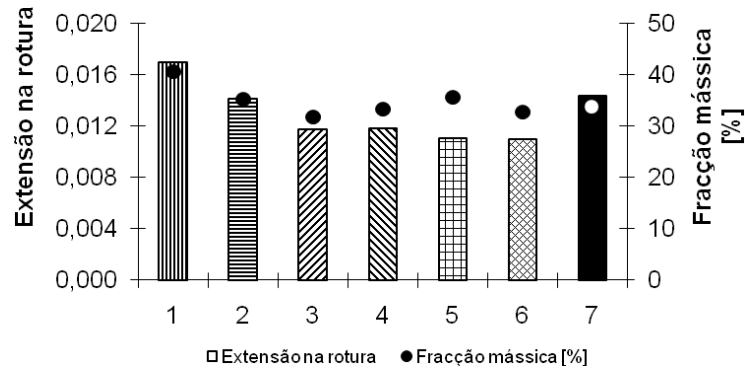


Figura 4. Influência do tipo de fibra de reforço na extensão na rotura dos varões compósitos entrançados.

Para o aço, a tensão de cedência está definida como a tensão que conduz a extensões de 0.2%. Desta forma, a figura 5 apresenta as tensões correspondentes nos varões compósitos entrançados. O varão 4 apresenta, para uma extensão de 0.002, a tensão mais elevada enquanto o varão 1 apresenta a tensão mais baixa (varão 100% carbono e varão 100% vidro, respectivamente).

A figura 6 apresenta os módulos de elasticidade, determinados para uma extensão de 0.002. Como esperado, é o varão 4 (100% carbono) que apresenta o módulo de elasticidade mais elevado. É novamente o varão 1 (100% fibra de vidro) que apresenta o módulo de elasticidade mais baixo.

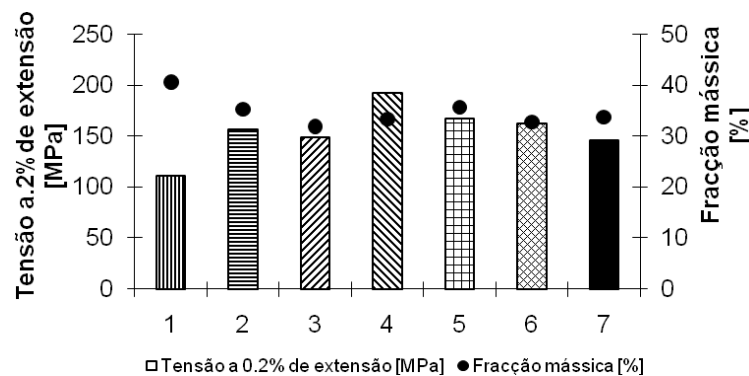


Figura 5. Influência do tipo de fibra de reforço na tensão a 0.2% dos varões compósitos entrançados.

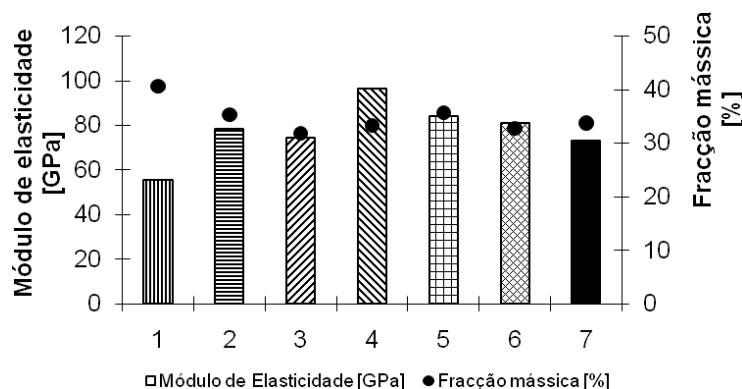


Figura 6. Influência do tipo de fibra de reforço módulo de elasticidade dos varões compósitos entrançados.

2.1.4 Varões compósitos entrançados e varões de aço

Com base nos resultados obtidos – diâmetro, fracção mássica, tensão de rotura, extensão na rotura,

tensão a 0.2% de extensão e módulo de elasticidade – algumas conclusões podem ser tiradas.

O varão 4 (100% fibra de carbono) apresenta o comportamento mecânico mais interessante enquanto o varão 1 (100% fibra de vidro-E) apresenta o comportamento menos interessante, ainda que seja o varão com fracção mássica mais elevada.

Os varões 2 e 7 embora tenham na sua composição a mesma quantidade de fibra de vidro-E e de fibra de carbono, apresentam comportamento mecânico diferente, devido à presença de fibra de polietileno de alta tenacidade e diferente fracção mássica.

Nos varões 3, 6 e 5, com a mesma quantidade de fibra de vidro-E e carbono, a presença de fibra de polietileno de alta tenacidade e aumento da fracção mássica promove um melhor desempenho mecânico do varão.

Ainda que o comportamento à tracção dos varões compósitos entrançados seja afectado pela fracção mássica das fibras de refoço axial da estrutura entrançada, pode concluir-se que o(s) tipo(s) de fibra utilizadas tem influência muito mais significativa.

Quando comparados com os varões de aço, usados na construção corrente, os varões compósitos entrançados, reforçados por fibra de vidro-E, carbono e polietileno de alta tenacidade, apresentam tensão de rotura à tracção mais elevada (quadro 4). Os aços correntes, A235NL, A400NR/ER and A500NR/ER, apresentam valores de tensão de rotura de 360 MPa, 460 MPa, and 550 MPa, respectivamente. O varão 1 (100% fibra de vidro-E) é o único varão que apresenta tensão de rotura à tracção mais baixa do que 550MPa. Contudo, os varões compósitos entrançados apresentam módulo de elasticidade mais baixo do que o apresentado pelos varões de aço, 210 GPa (quadro 4).

Quadro 4. Resultados do ensaio de tracção obtidos com os diferentes varões compósitos entrançados

Varão	Tensão de rotura [MPa]	Tensão de cedência /Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% [MPa]	Tensão de rotura a 0.2% de extensão[MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]
1	485,35		110,73	55,36
2	766,70		157,05	78,52
3	740,41		148,96	74,48
4	747,77		192,58	96,29
5	679,45		167,84	83,92
6	652,77		162,17	81,09
7	690,99		146,40	73,20
A 235 NL	360	235		210
A 400 NR/ER	460	400		210
A 500 NR/ER	550	500		210

A – Aço; N – Nervurado; L – Laminado a quente; R – Endurecido a frio

3. CONCLUSÕES

O diâmetro dos varões compósitos entrançados varia devido ao tipo de fibras de reforço axial utilizadas na sua composição e devido a percentagem de resina presente. Parece não existir relação entre o diâmetro do varão compósito e a sua fracção mássica, relativa às fibras de reforço axial da estrutura entrançada.

O varão compósito reforçado com 77% de fibra de vidro-E e 23% de carbono apresenta a tensão de rotura à tracção mais elevada. A tensão de rotura mais baixa foi obtida com o varão compósito reforçado com 100% fibra de vidro-E.

No que diz respeito à extensão na rotura, o varão reforçado com 52% de fibra de vidro-E, 46% de fibra de carbono e 3% de fibra de polietileno de alta tenacidade apresenta a mais baixa extensão e, mais uma vez, o varão reforçado com 100% fibra de vidro-E apresenta o valor mais elevado.

É o varão reforçado com 100% fibra de carbono o que apresenta tensão a 0.2% de extensão mais elevada e, consequentemente, o módulo de elasticidade mais elevado. O Varão reforçado com 100% fibra de vidro-E apresenta o mais baixo valor, em ambos parâmetros.

Os varões compósitos entrançados que apresentam o comportamento mecânico mais interessante são aqueles que têm, na sua composição, menor quantidade de fibra de vidro-E. De entre os varões com a mesma quantidade de fibra de vidro-E e fibra de carbono, são os varões com maior percentagem de fibra de polietileno de alta tenacidade aqueles que apresentam melhor comportamento mecânico.

O tipo de fibras, e sua quantidade, utilizadas como fibras de reforço axial da estrutura entrançada tem maior influência nas propriedades mecânicas dos varões do que a fracção mássica, relativa às fibras de reforço.

Quando comparados com o aço, os varões compósitos entrançados apresentam tensão de rotura à tracção mais elevada e módulo de elasticidade mais baixo que os 210 GPa apresentado pelo aço.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento concedido, pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, ao projecto POCI/CTM/6086/2004, “Development of braided reinforced composite elements for concrete reinforcement and monitoring”.

REFERÊNCIAS

- [1] ALSAYED, S.H. et al - Performance of glass fibre reinforced plastic bars as a reinforcing material for concrete structures, Composites, Part B: Engineering, 31, 2000, pp 555-567
- [2] LEES, J. M. - Fibre reinforced polymers in reinforced and prestressed concrete applications: moving forward, Prog. Struct. Engng. Mater., No. 3, 2001, pp 122-131.
- [3] KADIOGLU, F. Et al - Composite rebars shape effect in reinforced structures, Composite Structures, No. 67, pp 19-26. Composite Structures, Vol. 67, 2005, pp 19-26
- [4] SAIKIA, B. Et al - Performance of hybrid rebars as longitudinal reinforcement in normal strength concrete, Materials and Structures, 38, 2005, pp 857-864
- [5] SOEBROTO, H.B. et al - Engineering design of braided structural fibreglass composite, Structural Composites: Design and Processing Technology, 6th Annual Conference, Advanced Composites, 1990, Detroit
- [6] FANGUEIRO, R. et al - Development of braided fabrics for concrete reinforcements, 4th World Textile Conference Autex 2004, Czech Republic.

[7] FANGUEIRO, R., et al - Core reinforced composite armour as a substitute to steel in concrete reinforcement, International Symposium Polymers in Concrete – ISPIC2006, 2 – 4 April 2006, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.