

# CONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM VARÕES DE FRP

L. F. P. Juvandes<sup>1</sup>, V. L. F. Reis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LABEST, Lab de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, DEC, FEUP.

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Civil (DEC), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP)



## RESUMO

*Nesta comunicação procura-se expor o estado actual dos conhecimentos em torno da nova técnica de betão armado com varões de FRP (Plásticos Reforçados com Fibras), tendo em vista os recentes “Guidelines” internacionais, o mercado actual de fornecimento de varões de FRP, os critérios de projecto e a análise de custos directos e compostos para a avaliação da viabilidade e desenvolvimento da técnica em Portugal.*

## 1- INTRODUÇÃO

O betão armado tradicional é uma técnica de construção que envolve materiais simples (o betão e o aço) que, pelas suas propriedades individuais e características como material compósito, tem conduzido a grandes edificações estruturais contemporâneas, com sucesso.

Contudo, mesmo com um betão de elevada qualidade, esta técnica exhibe algumas fragilidades que importa realçar (Teles, 2008):

- a corrosão das armaduras;
- baixa resistência quando exposta a ambientes quimicamente agressivos;
- a fendilhação exagerada, associada a agressividade química do ambiente, conduz à sua rápida deterioração;
- Ambientes cujo imperativo é a neutralidade magnética obrigam a requisitos especiais para o betão armado, nomeadamente, tratamento do aço.

A armadura de FRP (Fiber Reinforced Polymer), da família dos Plásticos Reforçados com Fibras, surgiu no mercado como uma solução alternativa para aos problemas descritos com o betão armado clássico. O recurso a este tipo de armadura (sob a forma de varões) é expectável em aplicações próximas de ambientes marítimos, em ambientes químicos agressivos, em elementos estruturais esbeltos e em elementos onde não se pode garantir uma boa qualidade do betão. Além desses, a necessidade do uso de materiais magneticamente neutros em aplicações estruturais específicas, abriu uma janela de oportunidades para o seu emprego na construção civil.

Com estes produtos surgiu uma nova técnica de construção com betão armado de varões de FRP, acrescido da necessidade de requisitos para especificações dos produtos, dimensionamento, construção e controlo de qualidade. Nessa perspectiva, recentemente, começam a surgir propostas

regulamentares, com o formato de “Guidelines”, como o documento do ACI440.1R-06 (ACI, 2006), do Fib bulletin nº 40 (Fib, 2007), do JSCE – Con-crete Engineering Series 23 (JSCE, 1997) e do CNR-DT 203 (CNR 2007), para o uso de varões de FRP em betão armado.

Este trabalho pretende ser um estado actual dos conhecimentos no domínio do betão armado com varões de FRP, identificando os aspectos mais importantes nas fases de dimensionamento e execução, além de uma perspectiva sobre a viabilidade económica da técnica. Surge na sequência de um trabalho em curso no Departamento de Engenharia Civil da FEUP (Reis, 2009).

## 2 - VARÕES COMPÓSITOS DE FRP

### 2.1 - Materiais e processo de fabrico

O varão de FRP é um material compósito constituído por fibras contínuas alinhadas numa direcção e impregnadas com uma resina polimérica. As fibras constituem a estrutura principal do varão, determinando a resistência, a rigidez consoante a sua orientação e a densidade. A resina polimérica é o componente que mantém as fibras unidas, protege-as dos ambientes agressivos, transfere os esforços do betão para as fibras por aderência e dá forma ao varão (Juvandes, 1999).

As fibras mais frequentemente utilizadas no fabrico de varões de FRP são as fibras de vidro (G), de aramida (A), de carbono (C) e, mais recentemente, as fibras de basalto (B). Existem dois tipos de resinas poliméricas, as termoendurecíveis e as termoplásticas.

Os varões de FRP são anisotrópicos, apresentando-se com elevada resistência e rigidez na direcção das fibras e relativamente frágeis na direcção transversal.

Estes produtos podem ser obtidos através de diferentes técnicas como a pultrusão, entrançamento (braiding) ou tecelagem (weaving). Encontram-se, como principais formas de secção transversal, o varão circular (nervurado ou liso) e o varão de secção rectangular.

### 2.2 - Propriedades geométricas

Os varões devem ser distinguidos pelo tipo de tratamento da superfície, o seu diâmetro (nominal) e a correspondente área (ACI, 2006). A geometria da superfície do varão de FRP é muito importante por questões de aderência entre este e o betão envolvente. Como foi anteriormente exposto, existem diferentes processos de fabrico dos varões, cada um deles conduzindo a uma geometria da superfície diferente. De acordo com o ACI (2006), existem três tipos de superfície comercialmente disponíveis, tal como se ilustra na Figura 1. Existem varões com nervuras moldadas na resina final de recobrimento, varões com a superfície coberta de areia e varões com enrolamento helicoidal da fibra. Recentemente, surgiu outro tipo de superfície em consequência da técnica dos varões entrançados (Pereira et al, 2008).

Face a esta diversidade, a literatura técnica aponta para a identificação dos varões de FRP por um diâmetro equivalente ao de um varão liso com área idêntica ao do varão nervurado ou não circular – diâmetro nominal do varão.



Fig. 1 – Superfície dos varões (ACI, 2006).

### 2.3 - Propriedades físicas

A densidade ( $\rho$ ) dos varões de FRP é cerca de um quarto a um sexto da densidade dos varões de aço, podendo, desta forma, reduzir os custos de transporte e de manuseamento. O coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ ) varia na direcção longitudinal ( $\alpha_L$ ) e na direcção transversal ( $\alpha_T$ ), dependendo estes do tipo e do volume de fibra e da resina (ACI, 2006).

Na Tabela 1 estão especificados os valores típicos dessas propriedades, para varões com um volume de fibra ( $V_f$ ) de 50% a 70%, encontrados nos documentos técnicos (Reis, 2009).

**Tabela 1** – Propriedades físicas.

Propriedades	CFRP	AFRP	GFRP
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,43 a 1,67	1,30 a 1,45	1,73 a 2,18
$\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )	$\alpha_L$	-9,0 a 0,0	6,0 a 10,0
	$\alpha_T$	74,0 a 104,0	60,0 a 80,0

Por serem constituídos por fibras não condutoras e de bom isolamento eléctrico e magnético exibido pelas resinas que as impregnam e revestem, os varões de FRP são um produto adequado para a aplicação em locais sujeitos à acção de campos magnéticos ou onde existam aparelhos eléctricos sensíveis.

## 2.4 - Propriedades mecânicas a curto prazo

Os varões de FRP exibem um comportamento linear elástico à tracção, até à rotura, sem plastificação. A resistência ( $\sigma_{fu}$ ) e a rigidez ( $E_f$ ) dependem das propriedades e do volume dos constituintes (fibras e matriz), da sua interacção química e física, do processo de fabrico e do controlo de qualidade (varões com diâmetros iguais e volumes de fibras diferentes apresentam distintas tensões de rotura). A Tabela 2 resume o intervalo de valores das três propriedades principais à tracção dos varões para  $V_f$  de 50% a 70%.

**Tabela 2** – Propriedades mecânicas à tracção.

Propriedade	CFRP	AFRP	GFRP
$\sigma_{fu}$ (MPa)	600 a 3690	1000 a 2540	450 a 1600
$E_f$ (GPa)	100 a 580	40 a 125	35 a 60
$\epsilon_{fu}$ (%)	0,5 a 1,7	1,9 a 4,4	1,2 a 3,7

De acordo com os documentos analisados não é recomendado o uso dos varões de FRP à compressão.

Os varões de FRP apresentam deficiente resistência a esforços de corte perpendiculares à orientação das fibras. Contudo, é possível aumentar essa resistência quando se enrolam ou entrelaçam fibras para que estas tenham uma componente resistente na direcção do esforço de corte.

A aderência de um varão de FRP depende da geometria da superfície, processo de fabrico, propriedades mecânicas e condições ambientais (ACI, 2006). No

comportamento da ligação dos varões com o betão é admitido que a força de ligação é transferida através da resina para as fibras.

## 2.5 - Comportamento a longo prazo

O comportamento à fluência e à fadiga dos varões está dependente do tipo, da orientação e do volume de fibras. Em geral, as fibras de carbono são menos susceptíveis à rotura por fluência e fadiga, enquanto as fibras de aramida são moderadamente susceptíveis a este fenómeno, embora menos do que as fibras de vidro. Para evitar a rotura por fluência deve limitar-se, no dimensionamento, a tensão prolongada a 60% da resistência a curto prazo (Fib, 2007).

O uso de varões de FRP não é recomendado para estruturas em que a resistência ao fogo é essencial para manter a integridade estrutural pois, apesar de os varões estarem inseridos no betão e não arderem por falta de oxigénio, os polímeros perdem elasticidade com o calor (ACI, 2006). As elevadas temperaturas amolecem as resinas poliméricas provocando a diminuição das propriedades mecânicas e aumentando a susceptibilidade para a absorção de humidade (Fib, 2007). Deve haver alguma preocupação com a zona da amarração dos varões no interior do betão, evitando-se a perda de ancoragem por amolecimento da matriz.

Segundo Karbhari et al. (Fib, 2007), para projecto é recomendado que os varões possuam uma temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) 30°C superior à máxima temperatura esperada no local da obra.

Os factores ambientais como a água, os cloretos, os álcalis, as radiações ultravioletas, a acção térmica, a carbonatação e o ataque pelos ácidos devem ser avaliados para cada obra de modo a se ajustar a resina mais indicada para os varões de FRP. Embora sejam materiais com bom desempenho a longo prazo, em algumas circunstâncias estes factores podem fragilizar a integridade mecânica do FRP (Reis, 2009).

## 2.6 - Varões comerciais

Actualmente existem no mercado vários fabricantes de varões de FRP presentes nos continentes Americano, Asiático e Europeu.

De notar que, em cada continente, existem diâmetros de varões diferentes não havendo, por vezes, correspondência entre eles.

### 2.6.1- *Requisitos para as fichas técnicas*

A necessidade de uniformização das especificações técnicas para os varões impõe que a partir de algumas sugestões dos documentos das “Guidelines” se proponha neste ponto um resumo das propriedades geométricas, físicas, mecânicas e outras consideradas indispensáveis para identificar e controlar os produtos para efeitos de construção.

**Tabela 3** – Propriedades geométricas e físicas.

Característica	Método de ensaio	Requisito
$\phi$ nominal (mm)	ASTM D618	Corresponde ao diâmetro da secção circular equivalente
Área equivalente (mm <sup>2</sup> )	ASTM D618	Corresponde à área da secção circular equivalente
Cor	-	s/i
Perc. de fibra na mistura (%)	ISO 11667	50% ≤ valor ≤ 70%
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	ISO 1183-1	s/i
Tg (°C)	ISO 11357-2 (DSC) ASTM E1640 (DMA)	>95°C
$\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /°C)	ISO 11359-2 ASTM E831/D696	Valor de referência em CNR (2007)
Condutibilidade eléctrica	-	Não condutor
Magnetismo	-	Não magnético
Tipo de acabamento superficial	Em estudo (ACI,2004)	Ver secção 3

Sugerem-se como requisitos para as fichas técnicas dos varões de FRP as especificações geométricas e físicas expostas na Tabela 3 e as especificações mecânicas e outras descritas na Tabela 4 (Reis, 2009).

Com o intuito de identificar os diferentes tipos de varões de FRP, tal como acontece com o aço, o ACI (2006) propõe que cada produtor deve fornecer a seguinte informação na embalagem:


 - G#4 - F100 - E6.0 - 0.63

**Tabela 4** – Propriedades mecânicas e outras.

Característica	Método de ensaio	Requisito
$\sigma_{fu}$ longitudinal (MPa)	ISO 527-4,5 Ensaio (B.2.) ACI(2004)	≥ 400 MPa (1)(2)
$E_f$ longitudinal (GPa)	ISO 527-4,5 Ensaio B.2.) ACI(2004)	GFRP ≥ 35GPa AFRP ≥ 65GPa CFRP ≥ 100GPa (1)(2)
$\epsilon_{fu}$ (%)	ISO 527-4,5 Ensaio (B.2.) ACI(2004)	≥ 0.5% (2)
Resistência ao corte	Ensaio (B.4.) ACI(2004)	Em estudo
Aderência ao betão	Ensaio(B.3.) ACI(2004)	Em estudo
Fadiga	Ensaio (B.7.) ACI(2004)	Em estudo
Fluência	ISO 899-1 Ensaio (B.8.) ACI(2004)	Em estudo
Relaxação	Ensaio (B.9.) ACI(2004)	Em estudo
Reciclagem	Segundo LAGA	Classe Z0
Reacção ao fogo	-	Euroclasse
Resistência Química	Ensaio (B.6.) ACI(2004)	Muito boa

(1) Proposto pelo CNT-DT 203; (2) Proposto pelo ACI.1R-06.

onde

- , representa o símbolo do fabricante;
- G#4, representa o varão de fibra de vidro No. 4 [12mm];
- F100, representa o nível de resistência à tracção de pelo menos 100ksi ( $\sigma_{fu}^* > 100\text{ksi}$ ) [689MPa];
- E6.0, representa o nível de módulo de elasticidade de pelo menos 6000ksi [41GPa];
- 0.63, representa, no caso de um diâmetro fora dos diâmetros standardizados, a máxima dimensão exterior do varão, em polegadas [mm].

### 2.6.2- *Produtos actuais*

A pesquisa de mercado dos produtores de varões de FRP permitiu concluir que estes se encontram em países onde já existem propostas de “Guidelines” para o dimensionamento de estruturas de betão armado com varões de FRP. Nestes locais, à excepção do Japão, os varões de fibra de vidro (GFRP) são os mais utilizados. Esta

situação é demonstrada pela elevada informação existente relativa a estes varões, em detrimento dos varões de fibra de carbono (CFRP) e de fibra de aramida (AFRP). Na Tabela 5, resume-se os principais produtos comerciais, com indicação da sua designação, da fibra, do produtor e do país.

Em Portugal, esta técnica está em fase embrionária, a despertar para a investigação, realçando-se a representação local dos varões ASLAN e um investimento no uso de varões de FRP produzidos através do entrançamento de fibras (Pereira et al, 2008).

**Tabela 5** – Varões comercialmente disponíveis.

Referência	Fibra	Produtor	País
Aslan 100	GFRP	Hughes	EUA
Aslan 200	CFRP	Brothers	(Portugal)
Arapree	AFRP		
Carbopree	CFRP	SIREG	Itália
Glasspree	GFRP		
Combar	CFRP	SHOECK	Alemanha
FibraROD	AFRP	FIBEX	Japão
V-ROD	CFRP	PULTRALL	Canadá
	GFRP		

### 3- BETÃO ARMADO COM VARÕES FRP

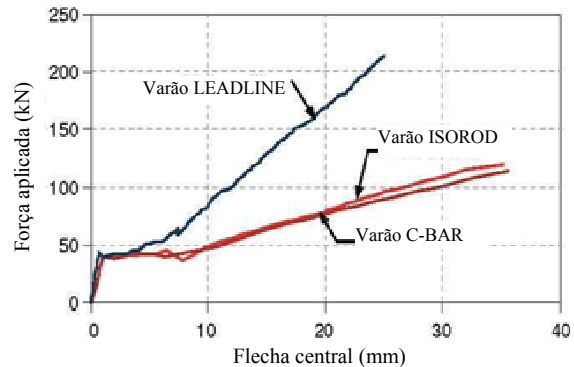
#### 3.1 - Introdução

De um modo geral, os “Guidelines” propostos para regulamentação do comportamento de estruturas de betão armado com varões de FRP referem que este se aproxima do comportamento corrente de elementos de betão armado com varões de aço (ACI 2006; Fib 2007; CNR 2007; JSCE 1997). Contudo, todos eles mencionam aspectos particulares a reter que resultam das diferenças de comportamento dos varões de FRP face aos equivalentes em aço.

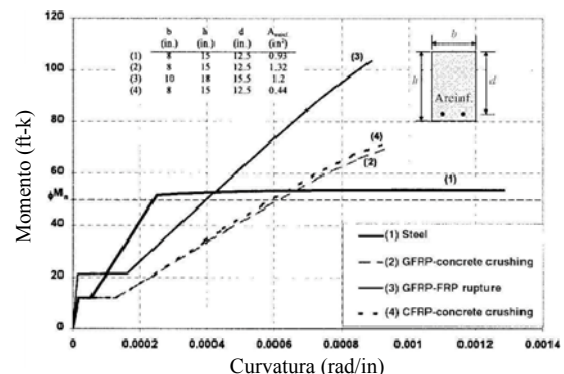
#### 3.2 - Comportamento à flexão

Dependendo do modo de ruína atingido, geralmente, o comportamento de vigas de betão armado com FRP apresenta o desenvolvimento ilustrado nas Figuras 2 e 3 (ACI, 2006), quer em termos de diagrama experimental carga vs flecha (Wegian et al, 2005) quer na forma diagrama teórico momento vs curvatura (ACI, 2006). Demarca-se uma fase inicial linear até à

abertura da 1ª fenda, idêntica ao do betão clássico, seguindo-se uma deformação acentuada da secção, face ao baixo módulo de elasticidade do FRP. Com o aumento de carga, a peça responde com uma relação linear carga vs deformação até ocorrer a ruína. Este último ramo não exhibe deformação plástica como ocorre com o aço, após este atingir a extensão de cedência do material (Reis, 2009).



**Fig. 2** – Diagrama força vs flecha de vigas.



**Fig. 3** – Curvas teóricas momento vs curvatura para secções com varões de aço / FRP.

A verificação de segurança à flexão em estado limite último (ELU) impõe considerar três modos de ruína de elementos armados com FRP: a rotura da armadura do FRP, o esmagamento do betão e perda de aderência betão-varão FRP (ACI, 2006). A rotura do FRP é repentina e catastrófica. Contudo, há aviso de rotura iminente na forma de extensa fendilhação e de grande deformação devido à extensão experimentada pela armadura de FRP. O desejável é o modo de ruína por esmagamento do betão porque as peças exibem algum comportamento plástico antes da rotura. O terceiro modo de ruína ocorre quando a tensão que se consegue

mobilizar para garantir a aderência betão-varão é inferior à tensão máxima actuante na armadura em estado limite último (subaproveitamento do FRP).

### 3.3 - Comportamento ao corte

A resistência ao corte é determinada pela contribuição da zona comprimida do betão não fendilhado, da interligação mecânica do agregado, do corte da armadura por “efeito de ferrolho” e, quando existir, da armadura de esforço transverso. O progresso destes mecanismos básicos depende das características do betão, das propriedades do material que constitui a armadura de reforço e do tipo de interacção entre estes dois no elemento estrutural.

A activação dos referidos mecanismos de resistência ao corte depende sobretudo das seguintes características do FRP: valor relativamente baixo do módulo de elasticidade; resistência transversal ao corte baixa; elevada resistência última à tracção, sem plastificar; resistência à tracção de varões dobrados ser bastante inferior à dos varões rectos; e natureza anisotrópica do compósito. Quando se usa armadura de FRP à flexão a resistência ao corte oferecida pelo efeito “dowel action” pode ser desprezada devido à reduzida rigidez axial dos materiais de FRP (Reis, 2009).

A forma mais comum de aumentar a resistência ao corte é o recurso a estribos, permitindo a transferência das forças através das fendas inclinadas, não só para os estribos mas também para o betão fendilhado. Os varões de FRP vêm a sua resistência largamente reduzida depois de dobrados (o estribo é normalmente dobrado), a tensão resistente a considerar no dimensionamento corresponde à resistência do varão dobrado. Investigadores recomendam uma tensão máxima de 40% a 50% da tensão máxima do compósito (Fib, 2007).

O colapso das estruturas devido a modos de ruína por corte é sempre precedido da formação de fendas inclinadas relativas ao eixo longitudinal do elemento. Estas fendas podem resultar numa das duas ruínas tipo: rotura por corte-tracção (rotura da armadura de corte de FRP); rotura por corte-compressão (esmagamento das escoras do

betão) (ACI 2006). O primeiro modo é mais frágil e resulta em maiores deformações, sendo que o segundo apenas depende das características do betão.

### 3.4 - Aderência betão-varão

Nos varões de FRP, por apresentarem baixo módulo de elasticidade e ondulação superficial (depende do tipo de acabamento superficial do varão), o mecanismo de aderência tem mais carácter friccional do que no aço. Este facto conduz a que a rotura por aderência seja, geralmente, originada por ruína parcial do betão com dano superficial no FRP, em contrapartida com a ruína por esmagamento do betão entre nervuras no caso dos varões de aço.

A Figura 4 ilustra as componentes da tensão de aderência em torno de um varão nervurado de FRP, com particular incidência na importância da resistência à fricção entre a nervura e o betão. A componente horizontal da resultante das tensões representa a “resistência efectiva à aderência” (Hao et al, 2008). A investigação neste domínio aponta para que se avalie experimentalmente essa resistência efectiva através de ensaios de “pull-out”, pelo facto de envolver simultaneamente o contributo da forma e geometria do varão e a classe do betão de ancoragem.

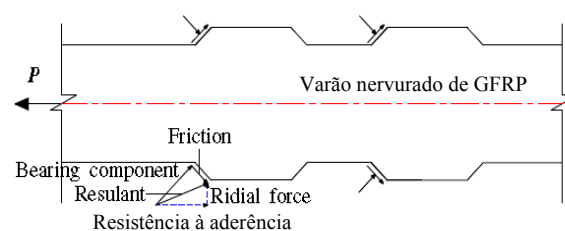


Fig. 4 – Componentes da tensão de aderência betão-FRP (Hao et al, 2008).

### 3.5 - Procedimentos para dimensionamento

O sucesso desta técnica de construção depende do desenvolvimento de especificações dos produtos, de ensaios normalizados (secção 2) e de critérios de dimensionamento. Actualmente, a investigação deu origem a alguns documentos (em fase experimental)

contendo orientações para projecto onde se destacam os “Guidelines” já mencionados.

Nestes documentos, constata-se que as recomendações para dimensionamento passam pela adaptação dos actuais códigos de verificação de segurança para estruturas de betão armado clássico (com varões de aço) aos novos estados limite de cálculo (último e de serviço) do betão com varões de FRP. As alterações são resultado das propriedades mecânicas do compósito FRP e do seu efeito no comportamento frágil da ligação betão-FRP.

O trabalho desenvolvido na FEUP por Reis (2009) permitiu obter uma visão global sobre os assuntos abordados por esses documentos, bem como, as matérias por eles omissas. Constatou-se que o ACI (2006) é, de todos, o mais completo. Por esse motivo, na Tabela 6, resume-se os procedimentos de dimensionamento segundo essa proposta de “Guideline”.

### 3.6 - Procedimentos de construção

Os procedimentos de construção associados a esta técnica são muito próximos da generalidade dos procedimentos de construção para betão armado com varões de aço. Contudo, os varões de FRP não podem ser dobrados em obra, tal como acontece com os varões de aço. Este facto implica que os varões sejam produzidos em fábrica com as dobras pretendidas.

**Tabela 6** – Procedimentos de dimensionamento segundo o ACI (Reis 2009).

Procedimentos
1. Pré-dimensionamento: altura limite-critério da deformação
2. Acções: esforços condicionantes em ELU e ELS
3. Materiais: propriedades de cálculo
4. ELU: Cálculo da armadura $\phi M_n > M_u$ , modos de ruína
5. ELS
5.1 Verificação da fendilhação
5.2 Verificação da deformação
5.3 Verificação das tensões nos materiais
6. ELU: verificação da segurança ao corte
7. Disposições construtivas
7.1 Armadura longitudinal mínima
7.2 Comprimento de amarração

#### 3.6.1- Manuseamento e armazenamento

De forma a minimizar a danificação dos varões e a evitar ferimentos nos operadores, os documentos e fichas de fabricantes consultados propõem as seguintes regras:

- devem ser manuseados com luvas;
- devem ser colocados sobre paletes de forma a mantê-los limpos;
- devem ser armazenados num ambiente seco ao abrigo de elevadas temperaturas e de raios ultravioleta;
- não devem ser arrastados pelo chão;
- Substâncias que reduzam a aderência devem ser removidas limpando os varões com solvente;
- pode ser necessário o uso de espaçadores para que os varões de FRP possam ser içados sem grande deformação.

Quando for necessário o corte dos varões, este deve ser feito por um disco de elevada velocidade ou uma lâmina de serrote fina. Durante esta operação, o operador deve usar máscara de pó, luvas e óculos de protecção.

#### 3.6.2 - Colocação

Em geral, os varões de FRP são colocados como os varões de aço. Por isso, as práticas comuns na construção civil podem ser aplicadas, mas com as seguintes excepções:

- a armadura de FRP deve ser colocada e sustentada por suportes tipo cavalete que devem ser consistentes com a armadura;
- a armadura de FRP é leve e deve estar convenientemente amarrada com arame revestido por plástico ou fio de nylon de forma a prevenir a flutuação durante a betonagem e vibração do betão.
- a armadura de FRP não deve estar em contacto com a armadura de aço;
- não deve ser permitido dobrar varões de FRP termoendurecíveis em obra;
- sempre que é necessária a continuidade da armadura devem ser usados comprimentos de sobreposição.

#### 3.6.3 - Controlo de qualidade e inspecção

O controlo de qualidade deverá ser processado, para além das fases exigidas

habitualmente à técnica de execução do betão armado, a mais dois níveis relativos aos varões de FRP: a fase de produção e a fase de aplicação em obra.

Na fase de produção, o controlo de qualidade deve ser levado a cabo através da realização de ensaios aos varões de FRP quer pelo fabricante quer por laboratórios certificados para estes serviços, em conformidade com os requisitos especificados para as “fichas técnicas” dos varões (secção 2.6.1).

Em fase de obra, deve exigir-se a certificação dos produtos encomendados em conformidade com os requisitos especificados no caderno de encargos. Caso contrário, é recomendado a determinação, pelo menos, da resistência, módulo de elasticidade e extensão última à tracção na direcção das fibras para um lote de varões Reis (2009).

### 3.7 - Análise de custos

Neste trabalho procurou-se avaliar e comparar os custos de construção com varões de FRP e com varões de aço. Desta análise será possível extrair conclusões sobre a viabilidade económica dos varões de FRP no betão armado. A análise de

custos foi realizada a dois níveis: o custo directo e o custo composto.

#### 3.7.1- *Custo directo*

A comparação do custo directo de um varão de FRP e de um varão de aço corrente é essencial para esclarecer uma das razões pela qual não tem sido corrente, no nosso país, o recurso a esta técnica.

O custo directo consiste em avaliar o custo de aquisição de um varão no mercado, considerando as seguintes hipóteses:

- ser recto (varão sem dobras);
- ter um acabamento superficial (fibra entrelaçada, colagem de areia, forma na moldagem, etc.);
- com diâmetros de  $6\text{mm} \leq \phi \leq 32\text{mm}$ ;
- sujeitos a taxas locais obrigatórias (País).

Comparando os preços dos diferentes diâmetros como se expõe na Tabela 7 e se ilustra na Figura 5, os valores anunciados pelo fabricante Alemão do varão COMBAR são quase o dobro dos fornecidos pelo fabricante Canadiano do varão V-ROD. De notar que o preço deste último varão é o preço praticado na América do Norte

**Tabela 7** – Análise do preço dos varões (por diâmetro) Reis (2009).

$\phi$ (mm)	GFRP				AFRP			Aço		
	Aslan 100	V-ROD <sup>(1)</sup>		Combar	Glasspre	Fibra <sup>(2)</sup>	S400	S500	Inox	Revestido com epoxy
		Standard	HM							
Diâmetros correntes no Aço (Preço €/m)										
6	s/i	0.42	s/i	-	-	-	0.16	0.16		
8	-	-	-	1.22	-	-	0.27	0.28		
10	s/i	0.64	s/i	-	-	-	0.41	0.41		
12	-	-	-	2.74	s/i	-	0.56	0.58		
16	s/i	1.70	2.22	4.87	s/i	-	0.99	1.01	15.78	4.67 (S500)
20	-	-	-	-	-	-	1.55	1.58		
25	8.48	5.59	5.59	11.88	s/i	-	2.47	2.52		
32	10.65	-	13.03	19.46	s/i	-	4.28	4.36		
Outros Diâmetros para FRP (Preço €/m)										
3	-	-	-	-	-	1.87				
5	-	-	-	-	-	3.00				
7	-	-	-	-	-	5.25				
9	-	-	-	-	-	6.75				
11	-	-	-	-	-	9.37				
13	s/i	1.06	1.46	-	-	13.49				
15	-	-	-	-	-	17.99				
19	5.35	2.69	s/i	-	-	-				
22	s/i	3.68	5.07	-	-	-				
29	9.70	-	-	-	-	-				
Preço €/kg (Valores médios)										
Valor médio	8.01	4.94	6.30	11	s/i	113.70	0.66	0.67	10	2.96

(1) Taxa de conversão em euros de 1.39Dólares à data de 18 de Junho de 2009; (2) Taxa de conversão em euros de 133.39Yen à data de 18 de Junho de 2009; s/i - sem informação até à data desta publicação.



estando, naturalmente, sujeito a despesas de exportação.

Da análise dos diâmetros idênticos, conclui-se que os preços por metro dos varões de FRP são cerca de 2,3 a 4,7 vezes superiores aos dos varões de aço corrente, quando comparados os preços fornecidos pelo fabricante Canadiano e Alemão, respectivamente (comparação ilustrada na Figura 6) Reis (2009).

Quando o termo de comparação se trata da força resistente os custos dos varões de FRP aproximam-se bastante dos exibidos pelos varões de aço (valores médios de 0.76 a 1.00 para o S400 e S500, respectivamente). Contudo, quando é comparada a rigidez dos varões que mobilizam a mesma força resistente, os varões de FRP exibem uma rigidez que varia entre 8% e 16% da rigidez dos varões de aço (valores médios de 9.17 a 12.57 para o S400 e S500, respectivamente).

### 3.7.2- *Custo composto*

O custo composto é o custo total dos elementos de betão armado e que engloba o custo dos materiais, o custo da mão-de-obra e o custo de transporte dos materiais (Fonseca, 2005).

No que diz respeito ao custo dos materiais, este encontra-se dividido sobretudo entre os custos do betão, custos da cofragem e custos da armadura. Admite-se que os custos do betão e da cofragem são idênticos para os elementos armados com FRP e com aço. Os primeiros, poderão ser menores se se atender às vantagens apresentadas

pelo FRP relativas à resistência a meios agressivos e ao facto de os requisitos relativos ao betão poderem ser menos severos no betão armado com FRP face ao tradicional.

O custo da mão-de-obra está dividido em custos com o betão (produção e colocação), custos da cofragem (construção) e custos de armadura (preparação e colocação). Os dois primeiros custos são idênticos para os dois tipos de construção, variando apenas os custos com a mão-de-obra da armadura que tende a ser menor no caso do FRP. Tal acontece porque a armadura de FRP não pode ser dobrada, os estribos e os ganchos de amarração têm que ser pré-fabricados facilitando, assim, as operações de montagem.

Por último, o custo de transporte dos materiais, nomeadamente, do betão, cofragem e armadura são idênticos com excepção deste último, uma vez que o menor peso dos varões de FRP conduz a menores custos de transporte.

O estudo de Reis (2009) indica que o custo composto final vai depender, essencialmente, da armadura usada, FRP ou aço. Concluiu-se que existe muito mais informação relativa a varões de GFRP do que a varões de AFRP e CFRP.

## 4 - CASOS ESTUDADOS

De forma a obter uma comparação e percepção das diferenças entre o dimensionamento de estruturas de betão armado com aço e estruturas de betão

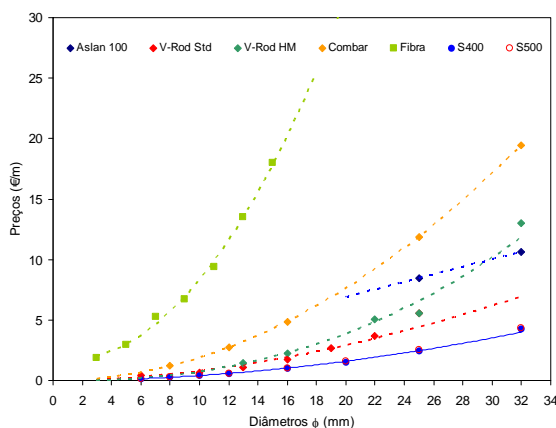


Fig. 5 – Curvas de variação dos preços com o diâmetro, com o fornecedor e com o material.

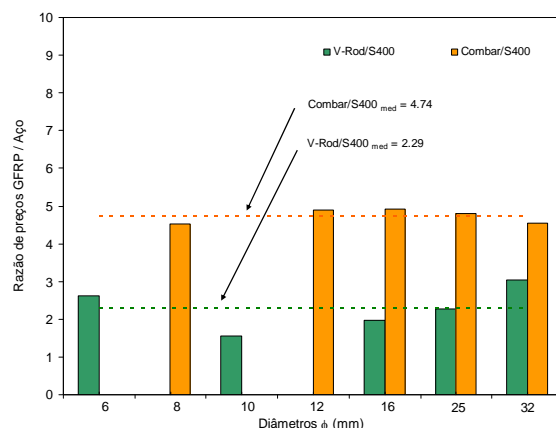


Fig. 6 – Análise da razão de preços GFRP / Aço S400 em termos de valor médio.

armado com FRP recorrendo aos critérios sugeridos nos “Guidelines” mencionados neste trabalho (ver secção 3.5), de seguida, expõe-se o dimensionamento de uma viga e de uma laje armada com os dois tipos de materiais. De forma a extrair conclusões sobre a viabilidade da construção com esta técnica, procede-se a uma análise de custos, sobretudo o custo composto (Reis 2009).

#### 4.1 - Caso 1: Laje

Para o dimensionamento da laje de betão armado, considerou-se que se tratava de uma laje vigada armada numa direcção, com um vão de 5m e simplesmente apoiada, que descarrega os esforços actuantes na viga a dimensionar.

##### Acções:

- Acções permanentes:  $G_k=2.0\text{kN/m}^2$ , excepto peso próprio;
- Acções variáveis:  $Q_k=4\text{kN/m}^2$ , com um  $\psi_2=0.4$ ;

##### Materiais:

- Betão C25/30;
- Aço: S500;
- GFRP: ASLAN 100 (Para  $\phi 13$  vem  $\sigma_{fu}^*=690\text{MPa}$  e  $\epsilon_{fu}^*=0.015$ ).

#### 4.2 - Caso 2: Viga

A viga, onde descarrega a laje, é constituída por dois tramos com continuidade entre eles, com um vão de 4m cada um, descarregando em pilares. O dimensionamento destes últimos sai fora do objectivo do presente trabalho.

Acções: As acções a que a viga está sujeita correspondem às acções actuantes na laje multiplicadas pela largura de influência desta:

- Acções permanentes:  $G_k= (2+pplaje)$  kN/m, excepto peso próprio da viga;
- Acções variáveis:  $Q_k=10\text{kN/m}$ , com um  $\psi_2=0.4$ ;

##### Materiais:

- Betão C25/30;
- Aço: S500;
- GFRP: ASLAN 100 (Para  $\phi 19$  vem  $\sigma_{fu}^*=620\text{MPa}$  e  $\epsilon_{fu}^*=0.015$ ).

#### 4.3 - Dimensionamento

O dimensionamento dos elementos armados com aço foi realizado com base no EC 2 (2004), enquanto o dimensionamento dos elementos armados com FRP foi realizado com base no documento proposto pelo ACI (Reis 2009).

O resultado final do dimensionamento da laje e da viga encontra-se esquematizado nas figuras 7 e 8.

#### 4.4 - Análise de custos

Esta análise incide sobretudo na avaliação do custo composto para as duas técnicas de betão armado. O estudo do custo composto total e do custo composto por metro cúbico estão detalhados no trabalho de Reis (2009).

A Figura 9 ilustra a comparação do custo composto por metro cúbico das diferentes técnicas para a laje e viga.

Quando se compara o custo composto total (Laje+Viga), a construção com varões de FRP é muito dispendiosa sendo, neste caso, quase duas vezes superior ao da construção com varões de aço corrente. A diferença de custos é mais significativa na viga do que na laje. O condicionante é o preço da armadura de FRP.

Contudo, quando se avalia o peso do custo da armadura no custo total dos elementos de betão armado, constata-se que o custo da armadura de FRP é cerca de 55% do custo total, enquanto o custo da armadura de aço é cerca de 26% do custo total. Esta situação deve-se ao facto da menor rigidez apresentada pela armadura compósita conduzir a uma maior espessura de betão para cumprir o critério da deformação em serviço. Por conseguinte, além da diferença de custos da armadura, existe uma parcela de custos associados à maior quantidade de betão exigida pelos elementos armado com FRP e que não pode ser marginalizada.

## 5 - CONCLUSÕES

A técnica de construção de betão armado com varões de FRP é uma realidade na construção civil. As recentes propostas de “Guidelines” (algumas em versão provisó-

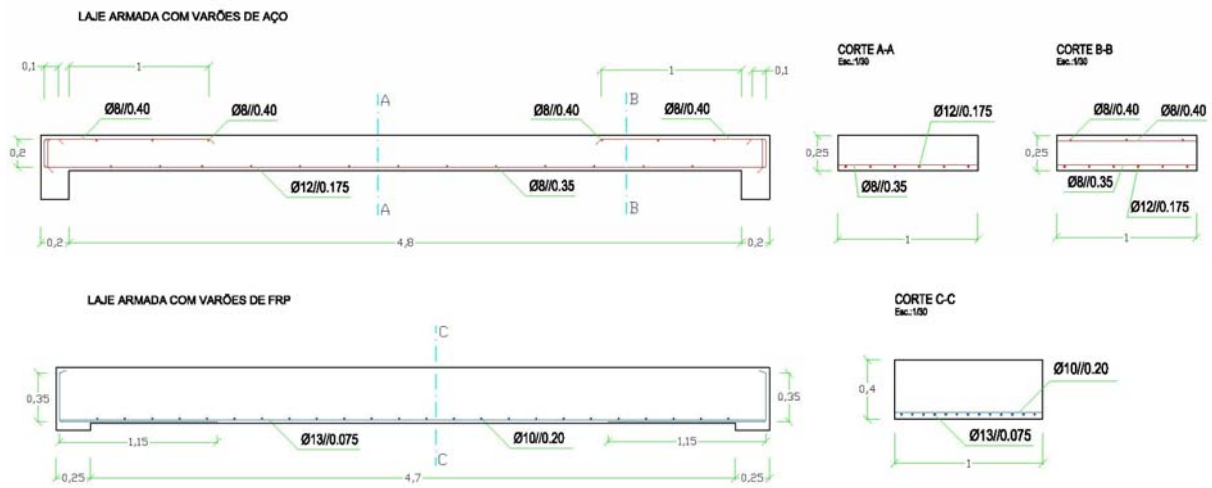


Fig. 7 – Desenho das Lajes armadas com aço e FRP.

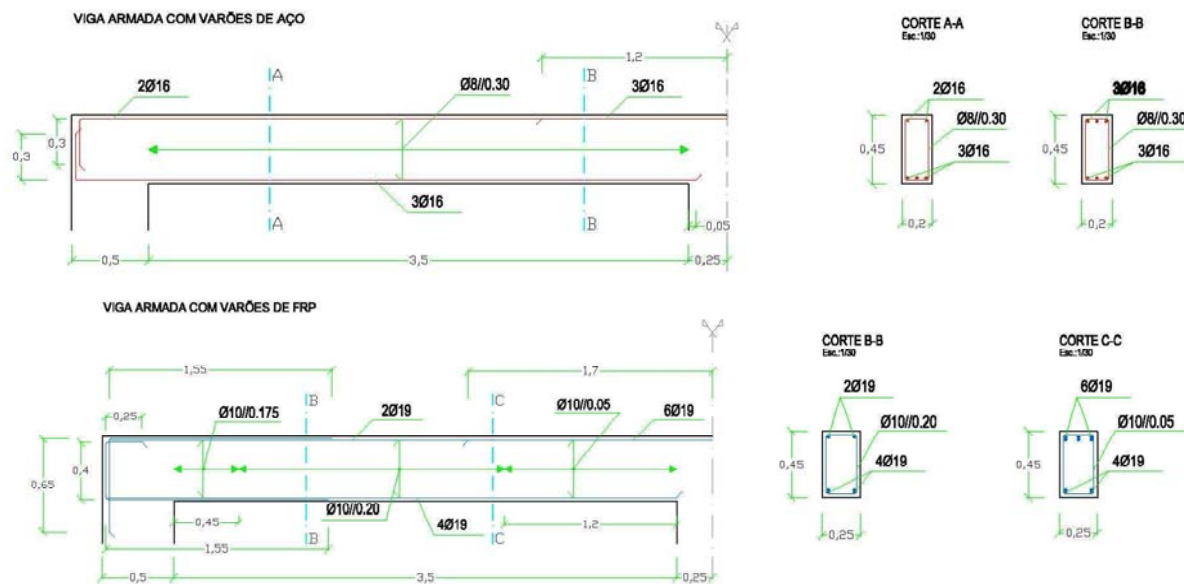


Fig. 8 – Desenho das Viga armadas com aço e FRP.

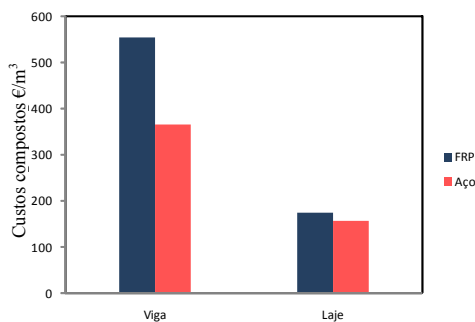


Fig. 9 - Custo composto de cada elemento estrutural (€/m³).

ria) são um bom exemplo do interesse nesta técnica. Constatou-se que o ACI (2006) é o mais completo, por isso o adoptado nos casos estudados neste trabalho.

Os varões de FRP podem ser produzidos por diferentes técnicas como a pultrusão, o entrançamento ou a tecelagem que, juntamente com as propriedades, volume e distribuição dos seus constituintes (fibras e matriz), fazem variar as suas propriedades geométricas, físicas e mecânicas.

O dimensionamento de estruturas de betão armado com varões de FRP é semelhante ao dimensionamento de estruturas armadas com varões de aço. Contudo, as diferenças mecânicas entre os dois tipos de varões impõem alterações nas expressões dos diversos estados limites (ELU e ELS).

O dimensionamento dos modelos teóricos permitiu evidenciar as grandes diferenças entre as duas técnicas:

- A menor rigidez dos varões de FRP, quando comparados com os varões de aço tem implicações na diferença de espessuras dos elementos, sobretudo das lajes;
- A impossibilidade da redistribuição de esforços leva a uma grande diferença entre a necessidade de armadura de flexão no apoio intermédio e a armadura de flexão a meio vão, conduzindo, ainda, a uma maior área de armadura de corte uma vez que o esforço transversal no apoio intermédio é muito superior;
- O facto da tensão mobilizável pelo estribo de FRP estar limitada ao menor valor entre a resistência do varão dobrado e a extensão limite conduz a uma resistência do estribo de FRP menor do que a exibida pelo estribo de aço, levando à necessidade de uma área de armadura de corte de FRP superior;
- Os varões de FRP não podem ser dobrados, sendo necessário determinar os ganchos e os respectivos comprimentos de sobreposição. Estes conduzem a uma parcela de custos que não existe na construção com varões de aço.

O preço/kg dos varões de GFRP é 7 a 16 vezes superior ao preço dos varões de aço corrente. Uma vez que o peso destes varões é cerca de 25% a 28% do peso dos varões de aço, o preço/m dos varões de FRP é 2,3 a 4,7 vezes superior ao preço dos varões de aço. Quando o termo de comparação consiste na força resistente, os preços dos varões de GFRP aproximam-se bastante dos apresentados pelos varões de aço chegando mesmo a uma razão preço GFRP/ preço aço de 1.0, para o aço S 500.

A análise do custo composto conduziu a um custo total dos elementos armados com varões de GFRP de quase o dobro dos elementos de betão tradicional. Esta conclusão obriga a reflectir sobre a viabilidade da aplicação desta técnica em aplicações correntes, sem exigências ambientais restritivas. Para situações correntes, a técnica com FRP é muito dispendiosa. Para situações particulares, onde o aço requer um tratamento especial para cumprir determinadas funções, os varões de FRP apresentam vantagem em termos de custos e na própria facilidade de construção.

## 6 - REFERÊNCIAS

- ACI 2004. ACI 440.3R-04- Guide Test Methods for Fiber Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. ACI Committee 440.
- ACI 2006. ACI 440.1R-06 - Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI Committee 440.
- CNR 2007. CNR-DT 203 - Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. CNR - Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Italian National Research Council, Roma
- Fib 2007. FIB Bulletin 40 - FRP Reinforcement in RC Structures. Technical report, Federation Internationale du Béton, Task Group 9.3, fib (versão provisória).
- Hao, Q., Wang Y., He Z., Ou J. 2008. Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete. Elsevier, , 865 - 871, Construction and Building Materials 23.
- JSCE 1997. Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials. Concrete Engineering Series 23, Japan Society of Civil Engineers.
- Juvandes, L.F.P. 1999. Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP, Tese de Doutoramento, FEUP, Porto.
- Pereira, C. G., Figueiro R., Jalali S., Araújo, M. e Marques, P. P. 2008. Varões Compósitos Entrançados para Reforço do Betão. Acta de Conferencia, Encontro Nacional BE2008, UM.
- Reis, V.L.F. 2009. Construção de Estruturas de Betão Armado com Varões de FRP, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Ramo de Especialização de Materiais e Processos de Construção, FEUP, Porto.
- Teles, M. 2008. Patologia do Betão. Apontamentos de Patologia dos Materiais, FEUP, Porto.
- Wegian, F. M., Abdalla H.A. 2005. Shear capacity of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymers. Elsevier, 13/02/05, pp. 130 - 138, Composite Structures.