

# ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE BETÃO REFORÇADAS COM VARÕES DE FIBRAS DE VIDRO

Luís Calado\* e Carlo A. Castiglioni\*\*

\* Professor Associado, DECivil, Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal

\*\* Professor Associado, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano - Itália



## RESUMO

*Neste artigo são apresentados os resultados de estudos experimentais sobre o comportamento de vigas de betão reforçadas com varões de fibras de vidro. Realizaram-se ensaios de flexão de modo a quantificar a aderência entre dois tipos de varão de fibra de vidro e o betão. Os resultados obtidos foram posteriormente comparados com os de armaduras de aço com características idênticas. Um modelo numérico para simular a aderência entre o betão e os varões de fibra de vidro foi desenvolvido e aplicado aos resultados experimentais. Com base nos estudos de aderência, construíram-se e ensaiaram-se várias vigas de betão reforçadas com varões de fibra de vidro, tendo-se comparado o seu comportamento com o de vigas análogas de betão armado.*

## 1. INTRODUÇÃO

Desde os anos 30, o vidro foi considerado um potencial substituto do aço no reforço ou pré-esforço de estruturas de betão. Limitações detectadas relativamente à ancoragem, protecção superficial, aderência do vidro ao betão e custos envolvidos no seu fabrico actuaram como um retardador ao desenvolvimento da investigação, [Gustafson, 1988], que foi retomada principalmente a partir da década de 70.

Com os desenvolvimentos mais recentes no domínio das fibras, resinas e processos de fabrico, os custos dos plásticos

reforçados com fibra de vidro, (GFRP), foram de tal modo reduzidos que a sua utilização se tornou competitiva quando comparada com soluções tradicionais, como o aço, havendo a considerar tanto os custos iniciais como os associados à durabilidade, manutenção, transporte e manuseamento na obra.

### 1.1. Propriedades gerais

Os varões de fibra de vidro quando sujeitos à tracção apresentam tensão última mais elevada do que a dos varões de aço correntemente utilizados em construção, sem no entanto apresentarem cedência do

material. Estudos experimentais realizados permitiram concluir que o valor da tensão última é função do diâmetro do varão, verificando-se que as fibras localizadas junto ao centro da secção transversal são sujeitas a uma tensão inferior à das fibras que se encontram na periferia do varão, resultando num decréscimo da tensão média e eficiência em varões de grande diâmetro.

O comportamento sob o efeito do fogo demonstra possibilidades interessantes de utilização dos varões de fibra de vidro. Ensaio experimentais [Eshani, 1996] mostraram que após 30 minutos de exposição a temperaturas de 300°C os varões de fibra de vidro se comportam melhor do que os de aço pré-esforçado. No entanto, a temperaturas mais elevadas, a redução de resistência acentua-se, aproximando-se da do aço a cerca de 500°C.

## 1.2. Técnicas de fabrico

Apesar de existirem diversas técnicas de fabrico de materiais compostos com fibra de vidro, a extrusão é o método mais frequentemente utilizado devido à sua rápida realização, fácil controlo de qualidade e equipamento relativamente económico.

Outros métodos de fabrico incluem a impressão de nervuras ou indentações na superfície exterior dos varões, procurando assim aumentar a rugosidade superficial e a aderência ao betão.

## 1.3. Aderência

A aderência entre o betão e as armaduras, um dos principais aspectos do comportamento das estruturas de betão armado e pré-esforçadas, depende de um conjunto de factores de que se destacam: a resistência do betão à compressão e à tracção, a rugosidade da superfície dos varões, o diâmetro, o espaçamento dos varões, a orientação do varão, a sua localização na secção transversal do betão e o recobrimento.

Uma vez que os varões de fibra de vidro não apresentam deformações plásticas, as tensões de aderência associadas à deformação apresentam valores baixos quando comparadas com os valores obtidos para varões de aço. Deste modo, a adesão e a fricção desempenham um papel importante no valor da tensão de aderência dos varões de fibra de vidro.

O principal objectivo desta investigação foi o estudo da aderência entre varões de fibra de vidro e betão, bem como a análise do comportamento de vigas reforçadas com este tipo de varão. Deste modo, realizaram-se ensaios de flexão para quantificar a aderência entre os varões de fibra de vidro e o betão, e construíram-se vigas reforçadas com varões de GFRP de modo a comparar a sua capacidade resistente e de deformação face a vigas análogas de betão armado.

## 2. CARACTERÍSTICAS DOS VARÕES

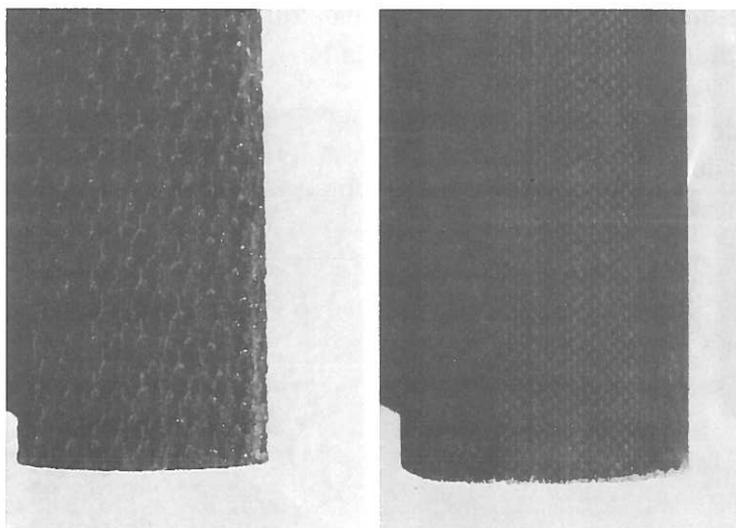
### 2.1. Rugosidade superficial

Foram estudadas experimentalmente as características de aderência de dois tipos de varões de fibras de vidro (Figura 1) produzidos por extrusão, com diferente rugosidade, tendo sido ensaiados oito protótipos de cada tipo:

- tipo A ( $\phi = 22$  mm): superfície com elevada rugosidade;
- tipo B ( $\phi = 24$  mm): superfície com baixa rugosidade.

A altura das indentações foi determinada como a diferença entre cada depressão e o pico seguinte e as indentações foram agrupadas em seis classes (não foram detectadas alturas superiores a 0.50 mm):

- 1)  $0.01 \text{ mm} \leq \eta \leq 0.05 \text{ mm}$
- 2)  $0.05 \text{ mm} \leq \eta \leq 0.10 \text{ mm}$
- 3)  $0.10 \text{ mm} \leq \eta \leq 0.15 \text{ mm}$
- 4)  $0.15 \text{ mm} \leq \eta \leq 0.20 \text{ mm}$
- 5)  $0.20 \text{ mm} \leq \eta \leq 0.25 \text{ mm}$
- 6)  $0.25 \text{ mm} \leq \eta \leq 0.30 \text{ mm}$



Varão do tipo A

Varão do tipo B

Figura 1 - Varões analisados.

Foi admitido que o processo de fabrico não influencia uma possível assimetria da rugosidade na superfície do varão. A

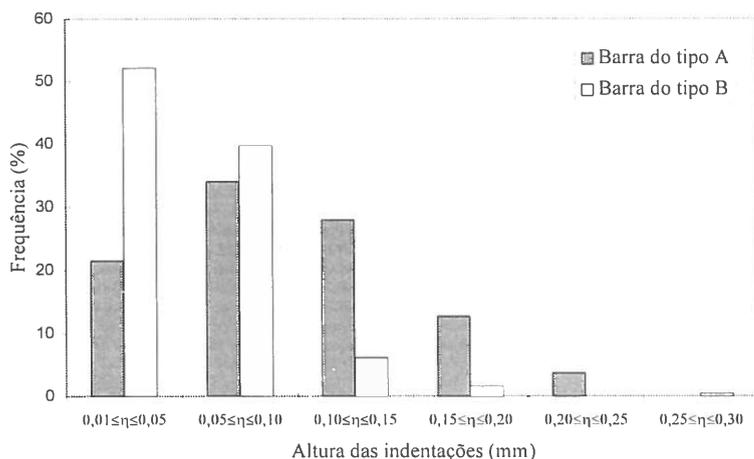


Figura 2 - Distribuição das indentações.

distribuição dos resultados das indentações obtidos experimentalmente para os dois tipos de varão são apresentados na Figura 2.

Verifica-se que os varões do tipo A apresentam uma altura média das indentações dupla da dos varões do tipo B, sendo de prever que possam desenvolver uma tensão de aderência superior.

## 2.2. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos varões estudados foram determinadas através de

ensaios de tracção uniaxial. Durante os ensaios surgiram dificuldades relacionadas com a fixação dos varões, tendo-se obtido resultados pouco satisfatórios, face às características do material indicadas pelo fabricante:

- o colapso ocorreu na zona de fixação dos varões devido a danos na superfície das fibras após a aplicação da pressão para fixar os varões às garras de amarração;
- os protótipos mantiveram-se intactos na zona central;
- a tensão última não excedeu 135 KN, um valor muito mais baixo do que o esperado com base nas indicações do fabricante.

Foi, por esta razão, necessário melhorar o sistema de fixação dos protótipos à máquina (Fig. 3), de modo a evitar danos nos varões por compressão excessiva das garras e a permitir, simultaneamente, uma melhor distribuição das tensões na zona de amarração.

A Tabela 1 sintetiza os valores médios das principais propriedades mecânicas dos varões dos tipos A e B obtidos através de ensaios de tracção.

Tabela 1 - Valores médios das propriedades mecânicas dos varões de GFRP.

Tipo de barra	A	B
Número de ensaios	11	4
Tipo de rugosidade	alta	baixa
Diâmetro (mm)	22	24
Módulo de elasticidade (GPa)	50.2	23.0
Tensão última à tracção (MPa)	534.4	229.9

Por comparação dos valores obtidos para varões do tipo A com as propriedades mecânicas dos varões de aço, verifica-se

que os varões de fibra de vidro apresentam tensão última mais elevada, mas módulo de elasticidade de cerca de 25% do dos varões de aço. Os valores para os varões de fibra de vidro do tipo B são cerca de metade dos do tipo A.

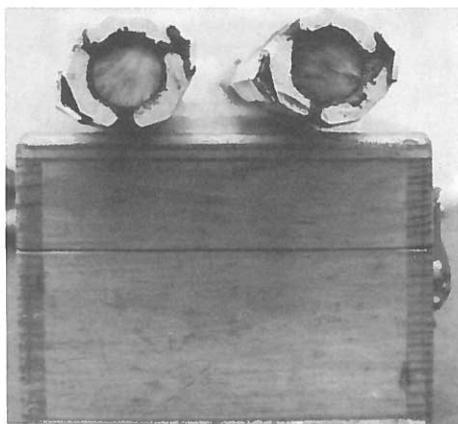
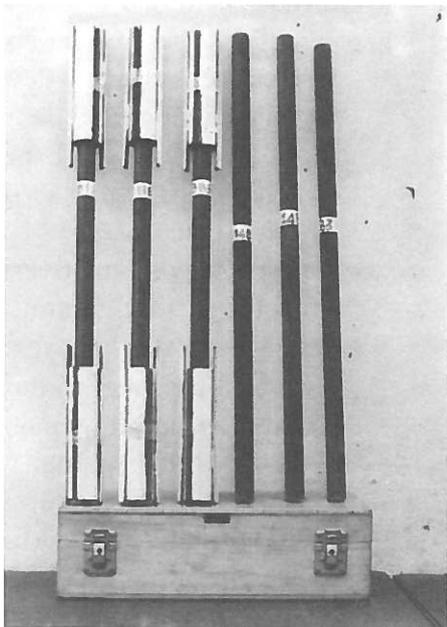


Figura 3 - Sistema de fixação desenvolvido.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados respectivamente o modo de rotura e um diagrama força - deslocamento, obtidos durante o ensaio de um varão do tipo A.

De um modo geral, o colapso foi atingido bruscamente, não apresentando o provete uma separação em duas partes como acontece nos ensaios de tracção do aço. Após o colapso das fibras externas,

registou-se uma diminuição da carga máxima aplicada.

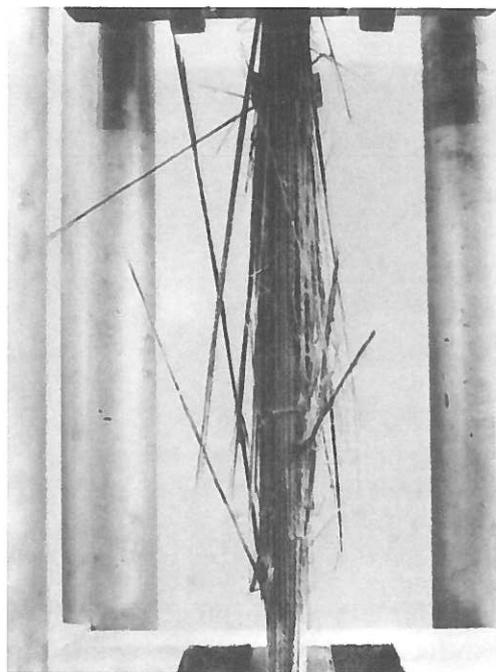


Figura 4 - Modo de rotura típico de um varão de fibra de vidro.

A recarga do provete provocou, ao fim de alguns segundos, a ruptura de mais algumas fibras externas, com a concomitante diminuição da carga máxima. O colapso foi caracterizado pela rotura das fibras superficiais e escorregamento da fibras internas.

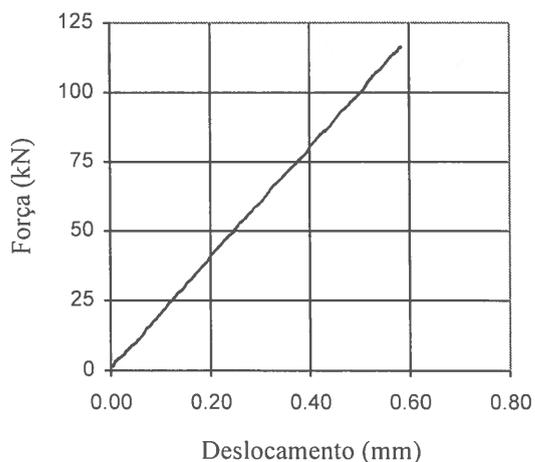


Figura 5 - Diagrama força - deslocamento típico de um varão de fibra de vidro.

O gráfico da Figura 5 apresenta uma linearidade notável entre o deslocamento e a força aplicada. A ligeira dispersão dos resultados observada junto da origem pode ser explicada por um pequeno escorregamento da zona de amarração.

A análise dos resultados obtidos permite concluir, que tal como previsto, os varões de fibra de vidro não apresentam deformação plástica antes do colapso, pelo que o comportamento pode ser considerado frágil.

### 3. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA

Os métodos de ensaio mais utilizados para o estudo da aderência entre os varões e o betão são os de arranque [ASTM, 1991] e os de flexão [RILEM, 1978].

O ensaio de arranque é por vezes olhado com cepticismo devido às tensões de compressão existentes no betão junto ao extremo do varão. Apesar deste estado de tensão ser mais preocupante no caso dos varões de aço do que nos varões de fibra de vidro, verifica-se que a existência desta tensão reduz a possibilidade de fissuração do betão e aumenta a tensão de aderência. Pelo contrário, nos ensaios de flexão o betão que envolve os varões está sujeito a tracção, causando fissuração e redução da tensão de aderência, apesar do confinamento provocado pelos estribos. Os resultados dos ensaios de flexão afiguram-se, por isso, mais próximos da realidade uma vez que simulam melhor o comportamento real dos elementos estruturais.

O estudo realizado sobre a tensão de aderência entre varões de fibra de vidro e betão foi baseado em ensaios de flexão de acordo com preconizado pela RILEM (1978).

### 3.1. Sistema de ensaio

Os ensaios de flexão foram realizados consistiram em dois blocos rectangulares de betão ligados no topo por uma rótula metálica e na base pelo varão a estudar. Este conjunto foi colocado sobre dois apoios, um móvel e outro fixo, e solicitado por duas forças concentradas iguais, como representado na Figura 6. O comprimento da ancoragem  $l_d$  depende do diâmetro do varão  $\phi$  sendo igual a 10 vezes este. Nas extremidades de cada bloco de betão existiam tubos de plástico a envolviam o varão de modo a que aderência se desse

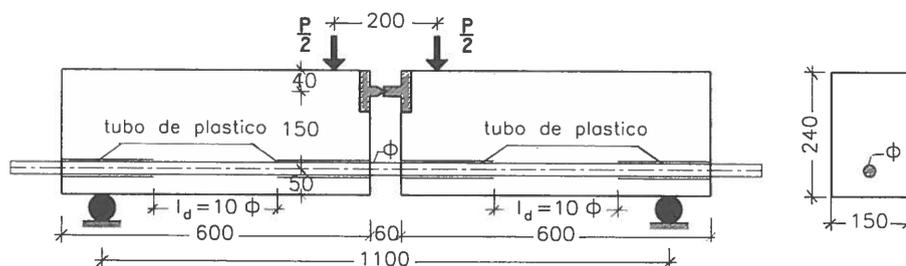


Figura 6 - Esquema do ensaio de flexão.

unicamente na zona de comprimento  $l_d$ .

### 3.2. História de carregamento

De acordo com o preconizado pela RILEM (1978), a força é aplicada ao protótipo por incrementos, de modo a que a tensão  $\sigma_s$  no varão aumente 40 Mpa de cada vez. Cada incremento de carga consiste de duas fases:

- uma fase de aumento da força, com duração de 30 segundos;
- uma fase estacionária, até à estabilização do escorregamento, com duração até 2 minutos.

O ensaio termina quando é atingida a tensão de aderência máxima. Durante o ensaio, o escorregamento é medido nos topos do varão utilizando transdutores.

### 3.3. Resultados experimentais

Para cada ensaio foi registado o gráfico força - escorregamento em ambas as

extremidades do varão, tendo-se observado que o escorregamento ocorria unicamente numa das extremidades. Nas Figuras 7 e 8 apresenta-se, respectivamente, o gráfico

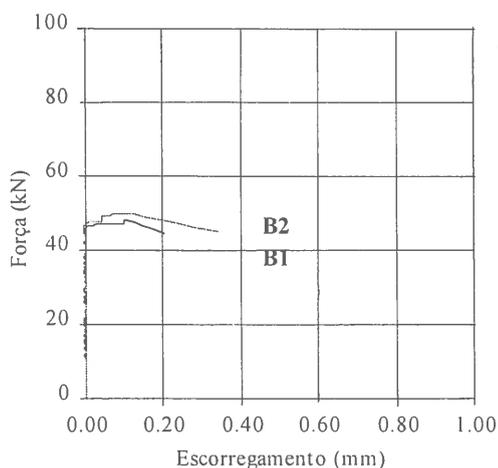
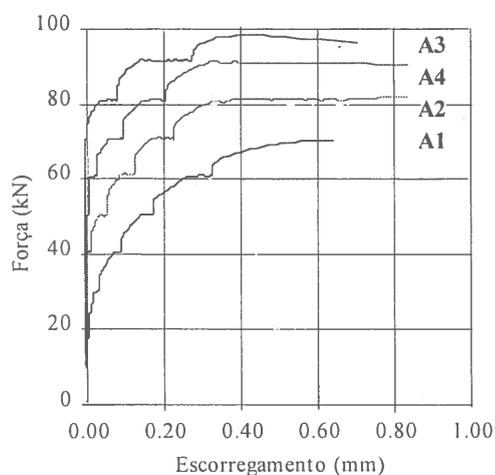


Figura 7 - Gráfico força - escorregamento típico para varões do tipo A e do tipo B.

força - escorregamento típico para cada um dos dois tipos de varão ensaiados e o modo de rotura.

A análise da Figura 7 mostra que os dois tipos de varão apresentam uma diferença evidente do comportamento face ao escorregamento, demonstrando que a superfície externa é o principal parâmetro a condicionar o comportamento das vigas. Varões de alta rugosidade como os do tipo A apresentam uma capacidade de carga de cerca do dobro dos varões com baixa

rugosidade, tipo B, apesar de terem uma área 19% menor.

#### 4. RE-ELABORAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A curva força - escorregamento obtida durante os ensaios experimentais permite determinar a tensão de aderência entre o varão e o betão, admitindo uma distribuição uniforme ao longo do comprimento de ancoragem  $l_d$ . De acordo com as recomendações RILEM (1978), se a força total sobre a viga for  $P$ , a tensão de tracção do varão é aproximadamente igual a:

$$\sigma_a = 1.5 \frac{P}{A} \quad (\phi \geq 16 \text{ mm}) \quad (1)$$

em que  $A$  é a área da secção do varão ( $\text{mm}^2$ ).

O valor da tensão média de aderência  $\tau_b$  é determinado por:

$$\tau_b = \frac{\sigma_a \cdot \pi \cdot \phi^2}{4 \cdot \pi \cdot \phi \cdot 10 \cdot \phi} = \frac{\sigma_a}{40 \cdot \phi} \quad (2)$$

De acordo com as recomendação da RILEM (1978), os valores característicos da tensão de aderência são:

- tensão de aderência de pico  $\tau_{0.01}$  e  $\tau_{0.10}$  que correspondem respectivamente a um escorregamento de 0.01 e de 0.10 mm;
- tensão de aderência máxima  $\tau_{máx}$ , que corresponde a um escorregamento de 3.00 mm.

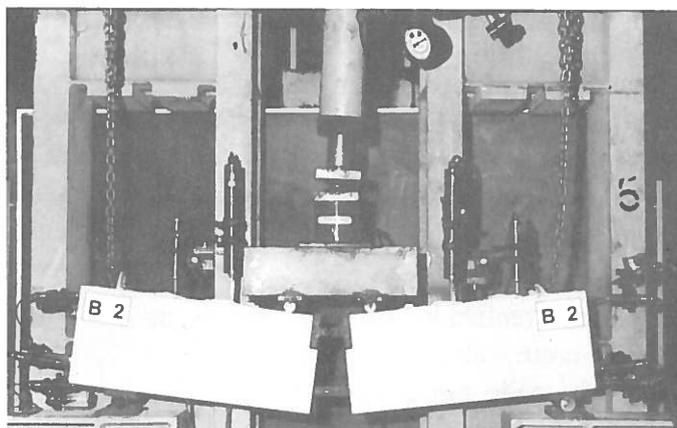


Figura 8 - Modo de rotura típico num ensaio de flexão.

Se o varão colapsa antes de atingir um escorregamento de 1.00 mm, a tensão de aderência correspondente à força máxima é considerada  $\tau_{m\acute{a}x}$ .

De modo a comparar o comportamento dos varões de fibra de vidro com varões de aço análogos, foram também ensaiados dois tipos de armaduras de aço com diâmetro e superfície externa idênticas aos varões de fibra de vidro:

- tipo SB ( $\phi = 25$  mm): varões lisos;
- tipo SC ( $\phi = 25$  mm): varões nervurados;

Na Figura 9 apresentam-se as curvas típicas força - escorregamento para cada um dos dois tipos de varões de aço analisados.

Tal como esperado, para o mesmo diâmetro o aumento da rugosidade

superficial incrementa a capacidade de carga. Na Tabela 2 são apresentados os valores médios das várias tensões de aderência e escorregamento máximo obtidos através de ensaios de flexão para cada um dos tipos de varão analisado.

**Tabela 2** - Valores médios da tensão de aderência para diferentes tipos de varão.

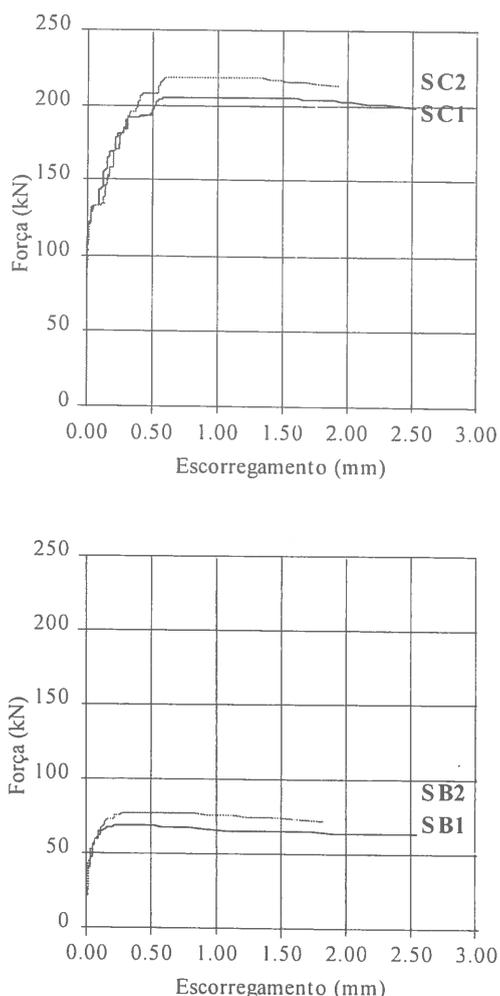
Tipo de barra	A	B	SB	SC
$\tau_{0.01\text{ mm}}$ (MPa)	5.11	4.00	2.47	8.33
$\tau_{0.10\text{ mm}}$ (MPa)	6.63	4.40	4.87	10.5
$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	8.26	4.21	5.56	16.1
Escorr. $\tau_{m\acute{a}x}$ (mm)	0.62	0.11	0.42	0.92

Estes resultados mostram uma clara influência da superfície externa dos varões de fibra de vidro na aderência ao betão. Independentemente do diâmetro, os varões com alta rugosidade exibem uma tensão de aderência mais elevada do que os que têm baixa rugosidade. Para varões do tipo A, os resultados experimentais mostram que existe uma boa aderência entre os varões de fibra de vidro e o betão.

## 5. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA ADERÊNCIA

O desenvolvimento de modelos numéricos que simulem a aderência entre os varões de fibra de vidro e o betão permite avaliar o comprimento de ancoragem necessário para o cálculo de estruturas com este tipo de reforço. No entanto, dado que a aderência depende do tratamento aplicado à superfície do varão, não é fácil desenvolver um modelo independente de parâmetros experimentais.

Apresentam-se resumidamente dois modelos analíticos para a relação tensão de aderência - escorregamento desenvolvidos por Malvar (1994) e Cosenza (1995) bem como o modelo adoptado pelo CEB (1990). Com base nos resultados deste estudo experimental é também proposto um modelo logarítmico para a determinação da tensão de aderência entre o betão e os varões de fibra de vidro.



**Figura 9** - Gráfico força - escorregamento típico para varões do tipo SB e do tipo SC .

## 5.1. Modelo de Malvar

Malvar (1994) realizou uma pesquisa extensiva em varões de fibra de vidro com diferentes formas da superfície exterior. Baseado nos resultados dos ensaios, propôs um modelo que é função de sete constantes empíricas obtidas a partir dos dados experimentais pelo método dos mínimos quadrados. Este modelo consegue reproduzir a curva tensão de aderência - escorregamento através de uma única equação.

## 5.2. Modelo de Cosenza

O modelo de Cosenza (1995) descreve apenas o ramo ascendente da curva tensão de aderência ( $\tau$ ) - escorregamento ( $s$ ). Os parâmetros envolvidos na definição do modelo devem ser determinados a partir de resultados experimentais através do método dos mínimos quadrados. Os resultados obtidos com este modelo mostram que a aderência é influenciada principalmente pela forma das superfícies exteriores, sendo praticamente independente do tipo de fibra.

## 5.3. Modelo do CEB

O modelo adoptado pelo CEB-FIP Model Code 90 (1990) para a aderência entre as armaduras de aço e o betão divide a relação  $\tau - s$  em quatro ramos. O primeiro, simula a fissuração local e a micro - fissuração, enquanto que o segundo se refere ao corte do betão entre as nervuras. O terceiro corresponde à redução da aderência devido à ocorrência do descolamento do betão ao longo dos varões. Finalmente, o último representa a capacidade residual de aderência, que é mantida devido ao reforço transversal mínimo.

## 5.4. Modelo logarítmico

Com base na análise dos resultados experimentais obtidos nesta investigação, desenvolveu-se um modelo logarítmico

capaz de simular a relação tensão de aderência - escorregamento para varões de fibra de vidro:

$$\tau = \tau_m + A \cdot \text{Log}(s) \quad (3)$$

onde  $\tau_m$  é a tensão de aderência de pico e  $A$  é um parâmetro empírico obtido a partir do ajustamento dos dados experimentais a uma curva. Com este modelo é possível unicamente descrever o ramo ascendente da curva.

## 5.5. Simulações numéricas

Todos estes modelos foram aplicados na simulação do comportamento experimental da tensão de aderência - escorregamento dos diferentes tipos de varão estudados. Na Figura 10 são apresentados os resultados para o caso de um dos ensaios dos varões do tipo A.

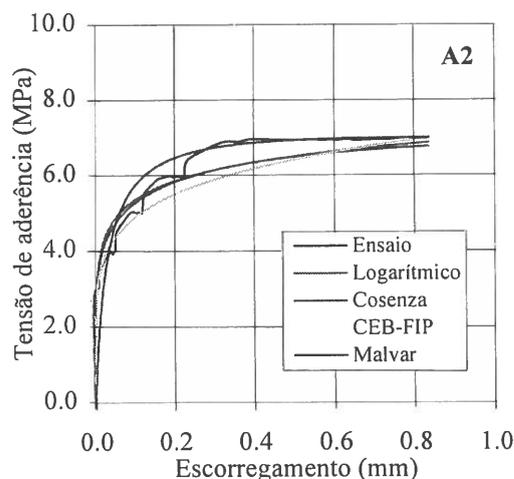


Figura 10 - Comparação entre os vários modelos numéricos e os ensaios experimentais.

As simulações numéricas mostraram que, em geral, o modelo de Malvar sobrestima a tensão de aderência para todos os tipos de varões de fibra de vidro, enquanto os outros três modelos a subestimam.

Os modelos propostos por Cosenza e pelo CEB exibem aproximadamente a mesma curva para a relação tensão de aderência - escorregamento. O modelo logarítmico proposto, o modelo do CEB e o modelo de Cosenza simulam com bastante

precisão a relação experimental  $\tau$ - $s$  para os varões de fibra de vidro do tipo A, mostrando um erro inferior a 7%. Para o caso dos varões do tipo B, o modelo logarítmico mostrou a pior correlação, com um erro igual a 33%.

A tangente na origem ( $s=0$ ) dos modelos de Cosenza, do CEB e logarítmico tende para o infinito, permitindo assim reproduzir bastante bem a evidência física do fenômeno. Com efeito, não se observou qualquer escorregamento durante os ensaios para baixos valores da tensão de aderência.

## 6. VIGAS BETÃO COM VARÕES DE FIBRA DE VIDRO

### 6.1. Características das vigas

O dimensionamento das vigas de betão reforçadas por varões de fibra de vidro baseou-se nos resultados obtidos previamente sobre a aderência dos varões ao betão.

Os varões utilizados foram os do tipo A, pois foram aqueles que apresentaram um comportamento análogo ao das armaduras de aço. Os varões utilizados possuíam 1,80m de comprimento e 22 mm de diâmetro. Havendo poucos varões de fibra de vidro disponíveis, foram utilizados varões de aço para reforçar a parte superior da viga. Os estribos utilizados foram todos de aço.

Foram construídos dois conjuntos de vigas de betão da classe C35, com 1.80 m de comprimento, de modo a estudar as diferenças devidas às armaduras adoptadas: o primeiro (quatro vigas) com varões de fibra de vidro do tipo A, o segundo (quatro vigas) com varões de aço S400.

Os dois conjuntos foram dimensionados de modo a possuírem a mesma capacidade resistente. Foram previstos dois modos de rotura: nos varões e no betão.

Estas condicionantes resultaram em dois tipos diferentes de secção das vigas, em

termos de reforço. Para cada tipo, foram construídos e ensaiados dois protótipos idênticos por forma a obter dois ensaios para cada tipo de colapso esperado. Na

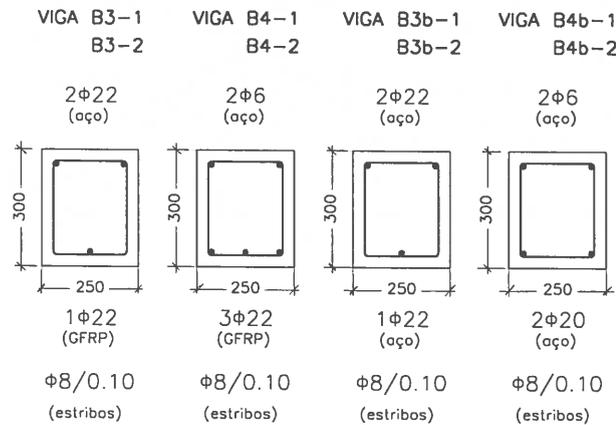


Figura 11 - Secção transversal das vigas.

Figura 11 apresentam-se as secções transversais das vigas ensaiadas.

Todas as vigas foram ensaiadas 40 dias após betonagem. Na Tabela 3 apresentam-se a tensão resistente e o módulo de elasticidade dos materiais utilizados.

Tabela 3 - Características dos materiais.

<b>Betão</b>	$f_{cd}=43$ MPa	$E_c=37840$ MPa
<b>Aço</b>	$f_{sd}=462$ MPa	$E_s=210000$ MPa
<b>GFRP</b>	$f_{GFRPd}=462$ MPa	$E_{GFRP,d}=46736$ MPa

### 6.2. Programa experimental

A Figura 12 mostra o esquema do ensaio. O carregamento consistiu na aplicação de duas forças concentradas iguais, por patamares de 5 KN, seguida de cerca de 2 minutos de intervalo para que fosse atingida a estabilização do protótipo. As forças foram aplicadas até se atingir o colapso da viga.

Foram colocados 3 transdutores verticais localizados por baixo das forças concentradas e no centro da viga, e outros 3 horizontais na face inferior da viga.

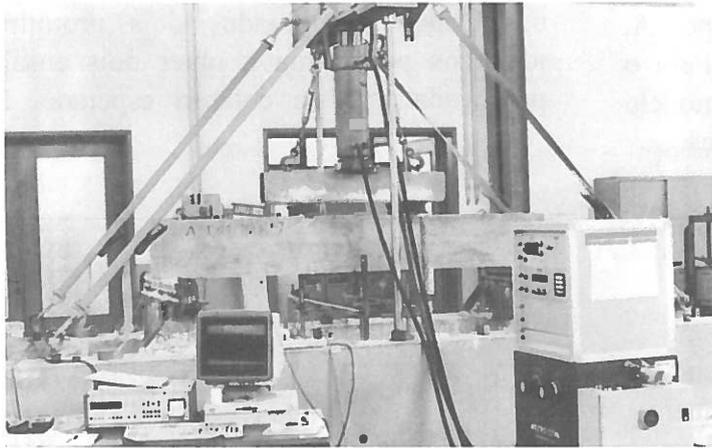


Figura 12 - Esquema do ensaio.

### 6.3. Resultados dos ensaios

Na Figura 13 apresenta-se o gráfico força aplicada - deslocamento a meio vão

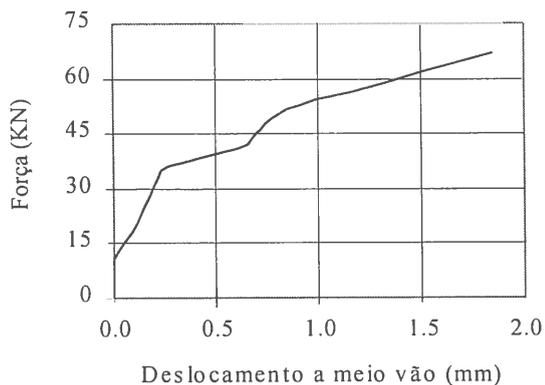


Figura 13 - Gráfico força aplicada - deslocamento a meio vão para a viga B3-2.

para a viga B3-2 reforçada com varões de fibra de vidro, enquanto que na Tabela 4 se apresentam os resultados mais

significativos para todos os ensaios. Na Figura 14 apresenta-se o modo de colapso para uma das vigas ensaiadas.

A comparação dos valores teóricos com os resultados experimentais mostra que a capacidade de carga das vigas é, em todos os casos, superior à esperada, por vezes com grande discrepância. Esta diferença pode ser justificada atendendo a que:

- os ensaios de compressão do betão, mostraram que a resistência é mais elevada do que a considerada no projecto. Por esta razão, o eixo neutro de todas as vigas subiu, alterando o modo de colapso esperado e aumentando a capacidade de carga.
- o comprimento limitado dos varões de fibra de vidro disponíveis originaram vigas pouco esbeltas ( $\lambda = L/H = 6$ ) o que poderá ter originado, por exemplo, a ocorrência de mecanismos de arco, com o conseqüente aumento da capacidade de carga.

Na Figura 15 apresenta-se um gráfico força - deslocamento onde se compara, para a viga do tipo B3, a solução com varões de GFRP com a solução de armaduras. Para facilitar a comparação, as forças aplicadas a cada viga foram normalizadas relativamente à carga última experimental.

Na Figura 16 apresenta-se um gráfico onde se compara a carga última com a área da armadura inferior para todos os casos

Tabela 4 - Resultados experimentais.

Viga	Ensaio experimental				Teórico
	$P_{cr}$ (KN)	$\delta_{máx cr}$ (mm)	$P_u$ (KN)	Tipo de rotura	$P_u$ (KN)
B3-1	33.9	0.27	284.4	aderência	163.3
B3-2	34.9	0.24	249.0	aderência	163.3
B3b-1	58.5	0.75	237.1	compressão	140.5
B3b-2	55.9	0.77	232.8	compressão	140.5
B4-1	50.7	0.62	439.8	corte	428.2
B4-2	62.7	0.55	397.2	corte	428.2
B4b-1	66.9	0.81	384.3	corte	206.5
B4b-2	48.6	0.45	410.6	corte	206.5



Figura 14 - Modo de colapso para a viga do tipo B3 reforçada com varões de GFRP.

estudados.

Da análise dos resultados apresentados pode constatar-se que, de modo a obter valores semelhantes para a capacidade de carga última ( $P_u$ ) das vigas com varões de fibra de vidro e dimensionadas para um

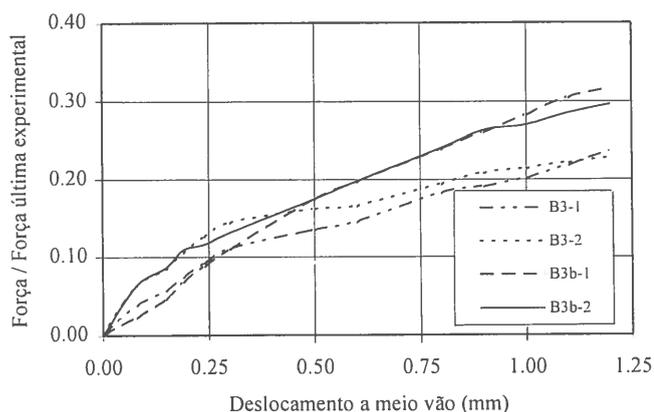


Figura 15 - Comparação entre a solução com varões de GFRP e varões de aço.

modo de colapso relacionado com o corte, é necessário o dobro da área dos varões,

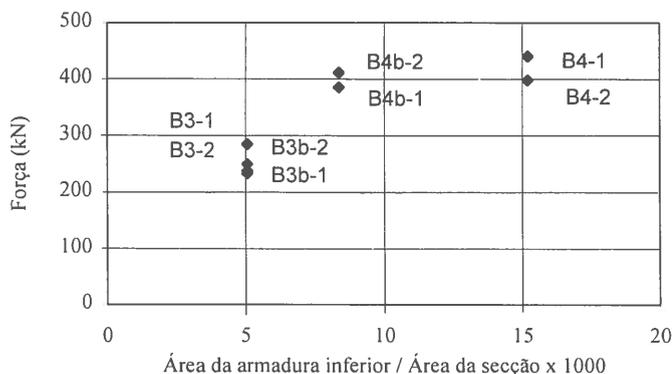


Figura 16 - Comparação entre a carga última e a área de reforço.

relativamente à viga com aço. Este facto está directamente relacionado com o baixo módulo de elasticidade do material que constitui os varões de fibra de vidro.

A comparação entre as vigas do tipo B3 é particularmente interessante uma vez que todas têm a mesma disposição dos varões na secção transversal. Para estes casos o colapso ocorreu devido a ter sido atingida a tensão de aderência última,

para o caso das vigas com varões de GRFP e, a resistência à compressão do betão, para as vigas com varões de aço. Na Figura 17 apresentam-se os resultados para todas as vigas em termos das cargas de fissuração ( $P_{cr}$ ).

O gráfico da Figura 17 permite concluir que as vigas com varões de fibra de vidro apresentam cargas de fissuração ( $P_{cr}$ ) ligeiramente inferiores às das vigas tradicionais com aço. A maior diferença entre os valores teóricos e experimentais da carga de fissuração foi verificada para vigas que colapsaram pelos varões, e para as quais a tensão de aderência teve grande influência. Pelo contrário, as vigas dimensionadas para colapsarem pelo betão apresentaram aproximadamente o mesmo comportamento quanto à carga de fissuração.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de vigas reforçadas com varões de fibra de vidro mostram uma clara influência da superfície exterior dos varões na aderência ao betão. Independentemente do diâmetro, e como seria de esperar, os varões com alta rugosidade exibiram uma

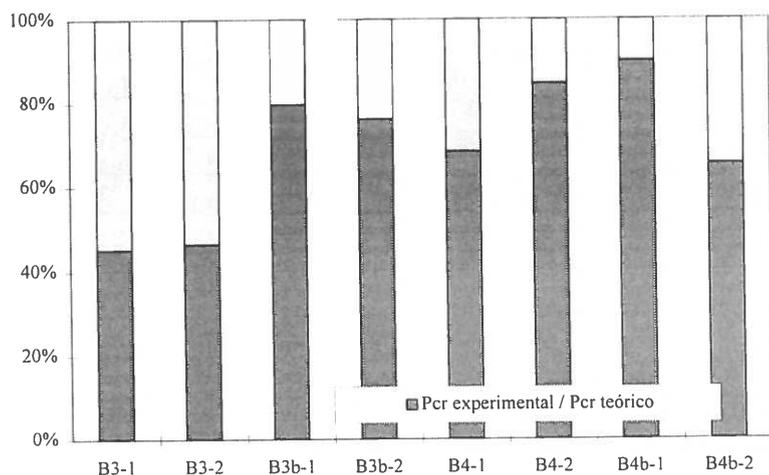


Figura 17 - Comparação entre as cargas de fissuração.

tensão de aderência mais elevada do que os de baixa rugosidade.

Os modelos numéricos para simular a aderência entre os varões de fibra de vidro e o betão permitem avaliar o comprimento de ancoragem que é necessário para o dimensionamento de estruturas com este tipo de reforço. A principal dificuldade na generalização destes modelos deve-se à existência de vários tipos de superfície dos varões que conduz a diferentes comportamentos de aderência. Por esta razão os modelos disponíveis na literatura dependem de parâmetros obtidos através de ensaios experimentais.

Os modelos analisados mostraram que, em geral, o modelo de Malvar sobrestima a tensão de aderência em todos os tipos de varões de fibra de vidro, enquanto os modelos de Cosenza, CEB e Logarítmico subestimam a tensão.

Os ensaios realizados em vigas reforçadas com varões de GFRP mostraram que, no caso em que o colapso ocorre por perda de aderência dos varões, o valor da carga última é inferior ao das vigas armadas com varões de aço em que o colapso se dá por compressão do betão.

Nos casos em que o colapso se dá por corte do betão, é necessário cerca do dobro da área de varões de fibra de vidro para obter a mesma carga última da viga armada com varões de aço. Este facto pode ser atribuído ao baixo módulo de elasticidade da fibra de vidro. Em qualquer caso, uma

aderência adequada entre o betão e os varões de fibra de vidro parece ser um factor determinante para a utilização deste tipo de material em vigas de betão.

## 8. AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio financeiro da JNICT e do CNR sem o qual esta investigação não teria sido possível. Os autores agradecem também à TOP

GLASS S.p.a. pela cedência dos varões de fibra de vidro, ao BETÃO LIZ pelo fornecimento do betão e à R.D.B. S.p.a. pela construção das vigas.

## 9. REFERÊNCIAS

- ASTM C234-91a "Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel", *Annual book of ASTM Standards*.
- CEB-FIP Model Code 90 - General Models: Bond Stress-Slip Relationship, pp.82-86.
- Cosenza, E., Manfredi, G. e Realfonzo, R., "Analytical Modelling of Bond between FRP Reinforcing Bars and Concrete", *Non - metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. Edited by L. Taerwe. RILEM, 1995, pp. 164-171.
- Eshani, M., Saadatmanesh, H., e Tao, S., "Design Recommendations for Bond of GFRP Re-bars to Concrete", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, March 1996, pp.247-254.
- Gustafson, D., "Epoxy Update", *Civil Engineering*, October 1988, pp. 38-41.
- Malvar, L., "Bond Stress - Slip Characteristics of FRP Re-bars" TR - 2013 - SHR - Naval Facilities Engineering Service Centre, Port Hueneme, CA, February 1994.
- RILEM-CEB-FIP "Test of the Bond Strength of Reinforcement of Concrete: Test by Bending", Recommendation RC.5., 1978.