

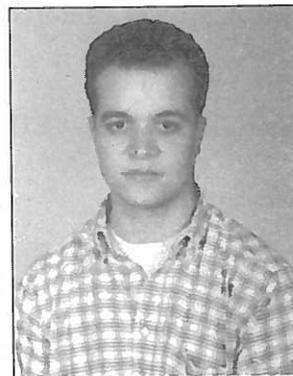
INFLUÊNCIA DA PERCENTAGEM DE ARMADURA CONVENCIONAL NO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS REFORÇADAS COM SISTEMAS DE CFRP

J.A.O. Barros¹, J.M. Sena Cruz² e D.C. Portela³

¹Professor Auxiliar; Dep. de Eng^a Civil – Universidade do Minho

²Aluno de Doutoramento; Dep. de Eng^a Civil – Universidade do Minho

³Aluno Finalista da Licenciatura em Eng^a Civil – Universidade do Minho



RESUMO

Com o objectivo de avaliar a contribuição dos laminados de fibras de carbono (CFRP) no comportamento do betão armado fendilhado foi efectuada uma campanha de ensaios experimentais em vigas. A influência da relação entre a percentagem de laminados e de armadura convencional no comportamento das vigas foi investigada. Neste trabalho os ensaios efectuados são descritos e os resultados obtidos são analisados.

1 – INTRODUÇÃO

Os benefícios da utilização de materiais compósitos de fibras de carbono (CFRP) no reforço de estruturas de betão têm sido divulgados em inúmeros trabalhos [ACI (1996), Juvandes (1999)], destacando-se a sua leveza, facilidade de aplicação, resistência, rigidez e resistência aos agentes agressivos. A técnica de reforço mais divulgada é a que recorre à colagem de laminados ou tecidos de CFRP na(s) face(s) da peça a reforçar [Salvador (2001)]. Contudo, a eficácia desta técnica de reforço fica, por vezes, comprometida pela delaminação precoce do laminado, resultando num desaproveitamento da capacidade reforçante dos CFRP [Juvandes (1999), Oehlers e Moran (1990)], fenómeno designado por *peeling*, na bibliografia Inglesa. Para aumentar a

eficácia da capacidade reforçante dos CFRP utilizam-se, normalmente, cintas e sistemas de ancoragem em CFRP ou metálicos, de forma a evitar a delaminação precoce do reforço longitudinal [Salvador (2001)]. Estes sistemas têm ainda, geralmente, como função, aumentar a resistência ao corte e o confinamento do betão da peça a reforçar [Etman *et al.* (2001), Barros *et al.* (2001)].

O rigor subjacente às leis que caracterizam o comportamento do betão fendilhado, influencia a qualidade da simulação numérica do comportamento de peças de betão armado reforçadas com CFRP. Segundo conhecimento dos autores, não foram ainda desenvolvidos modelos de simulação do comportamento pós-fendilhação do betão sob influência de armaduras convencionais e de CFRP. A campanha de ensaios a que o presente

trabalho se dedica tem como objectivo final fornecer um conjunto de resultados que irão ser utilizados na adaptação de um modelo de “tension-stiffening” já desenvolvido [Barros (1995)], de forma a dotá-lo dos requisitos necessários à simulação da influência dos CFRP.

Neste trabalho são descritos os ensaios efectuados e são analisados os resultados obtidos. O facto das vigas estarem intactas ou pré-fendilhadas antes da aplicação do reforço foi também estudado.

2 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 - Introdução

O modelo de “tension-stiffening” desenvolvido [Barros (1995)] tem em conta as propriedades de fractura do betão e as características das armaduras dispostas na zona efectiva [CEB-FIP (1990)] do betão fendilhado. Contudo, este modelo não está preparado para simular o comportamento deste betão sob influência de diferentes sistemas de reforço, com distintos módulos de elasticidade e de resistência, como é o caso de peças de betão armadas reforçadas com CFRP. Para que o modelo que está a ser adaptado possa ser aferido preparou-se uma campanha de ensaios constituída por três séries de vigas com diferente razão entre a área da armadura convencional longitudinal de tracção e a área do sistema de reforço em CFRP.

2.3 – Caracterização dos modelos ensaiados

Na Figura 1 representa-se a geometria, carregamento e disposição das armaduras convencionais das séries de vigas ensaiadas.

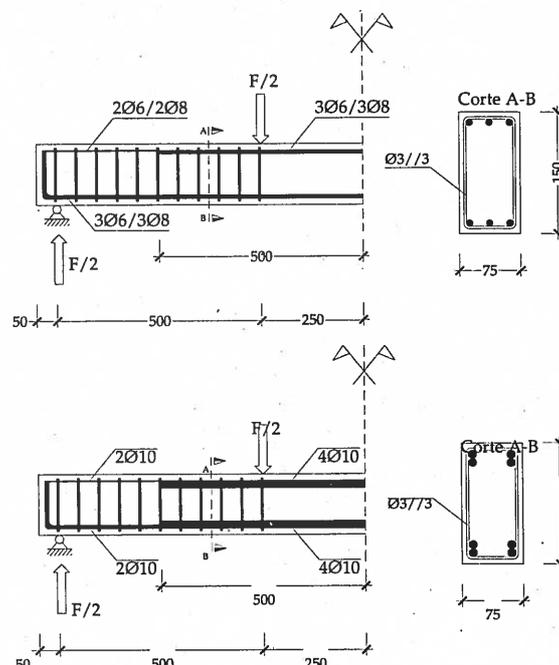


Fig. 1 – Modelos de viga ensaiados

No Quadro 1 apresentam-se as designações atribuídas às vigas ensaiadas. Para cada nível de armadura convencional ($\phi 6$, $\phi 8$ e $\phi 10$) realizaram-se 4 vigas (V1, V2, V3 e V4).

2.4 – Equipamento e procedimentos de ensaio

As vigas foram ensaiadas no pórtico de reacção representado na Figura 2.

Quadro 1 – Designação das vigas ensaiadas

| Diâmetro dos varões longitudinais (mm) | Vigas | | | |
|--|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---|
| | Não reforçadas (Série SR) | Previamente reforçadas (Série PR) | Pré-fendilhadas (Série PF) | Pré-fendilhadas e reforçadas (Série CR) |
| $\phi 6$ | V1_SR6 | V2_PR6 | V3_PF6 V4_PF6 | V3_CR6 V4_CR6 |
| $\phi 8$ | V1_SR8 | V2_PR8 | V3_PF8 V4_PF8 | V3_CR8 V4_CR8 |
| $\phi 10$ | V1_SR10 | V2_PR10 | V3_PF10 V4_PF10 | V3_CR10 V4_CR10 |

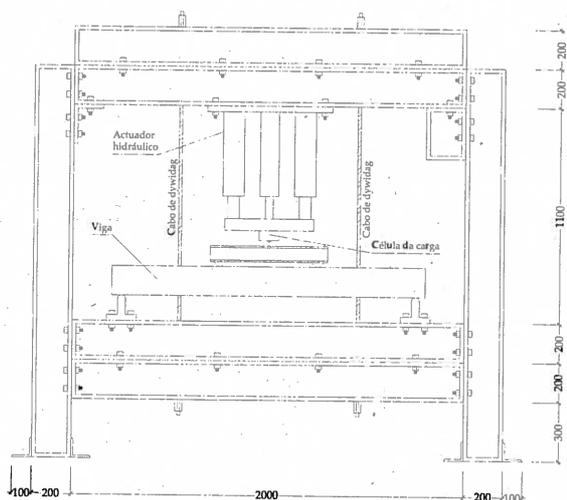


Fig. 2 – Sistema de ensaio das vigas

A carga foi aplicada por intermédio de um actuador de 250kN de capacidade máxima de carga e as forças foram registadas numa célula de carga de 250kN de capacidade máxima de carga.

A deformação da viga foi determinada por intermédio de transdutores de deslocamentos de 5, 25 e 50mm de campo, acoplados a uma barra metálica ligada à viga em pontos fixos desta, de forma a evitar o registo de deslocamentos parasitas. Para avaliar as extensões no laminado foram aplicados extensómetros de 5mm de grelha. A Figura 3 representa a disposição dos LVDT's e dos extensómetros utilizados na campanha de ensaios.

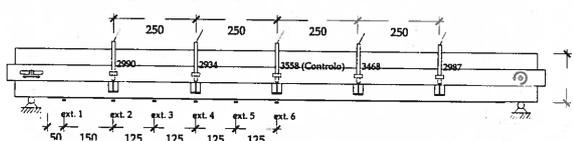


Fig. 3 – Equipamento de registo de deslocamentos e de extensões

Os ensaios foram realizados com recurso a um equipamento em malha fechada, tendo sido efectuados sob controlo de deslocamentos, à velocidade de 1.8mm/min até uma flecha de 20mm ou até à rotura da viga, sendo o transdutor central (LVDT 3558 – ver Figura 3) o de controlo. Os valores dos deslocamentos, das forças e das extensões foram registados em cada 0.5 segundos e gravados em ficheiro para posterior tratamento. Na Figura 4

apresenta-se uma foto que revela todo o sistema mobilizado no ensaio de uma viga.

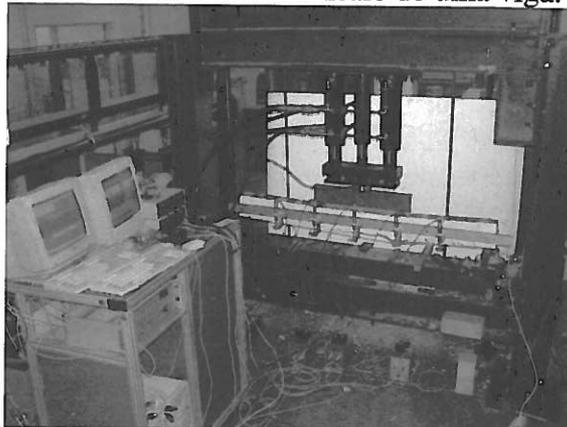


Fig. 4 – Ensaio de uma viga

Em geral, os sistemas de reforço em CFRP aplicam-se a peças com determinados danos, sendo os mais significativos, os associados à fendilhação do betão. Para avaliar a influência da fendilhação do betão no comportamento de vigas de betão armado reforçadas com CFRP, numa das séries as vigas foram previamente fendilhadas, reforçadas em seguida e novamente ensaiadas. O nível de pré-fendilhação introduzido foi o correspondente a uma flecha de $L/400=3.75\text{mm}$, seguindo-se por isso a recomendação do REBAP, no pressuposto de que, para este nível de deformação, uma estrutura de betão armado alcança um nível de fendilhação, a partir do qual é necessário proceder ao reforço da peça, caso se pretenda aplicar cargas mais elevadas. A foto na Figura 5 ilustra o padrão de fendilhação tipo registado na flecha de 3.75mm. Para este nível de deformação desenvolvem-se fendas de flexão no tramo central (“de flexão pura”) e constata-se o início da formação de fendas de corte nos vãos de corte.

2.4 – Procedimentos de reforço

O sistema de reforço longitudinal consistiu na colagem de uma faixa de laminado de CFRP de 50mm de largura e 1.4mm de espessura, com as propriedades materiais indicadas na secção 3.3. De modo a evitar o *peeling* e aumentar a resistência ao corte da viga, aplicaram-se faixas de

no sentido transversal ao eixo da viga, com as propriedades indicadas na secção 3.3, e de acordo com o esquema representado na Figura 6. Nas vigas da série *PR* (ver Quadro 1) aplicou-se apenas uma camada de faixa de tecido, enquanto nas vigas da série *CR* aplicaram-se duas camadas, dado se ter verificado que uma faixa não evitava a rotura por corte nas vigas com a maior percentagem de armadura convencional.

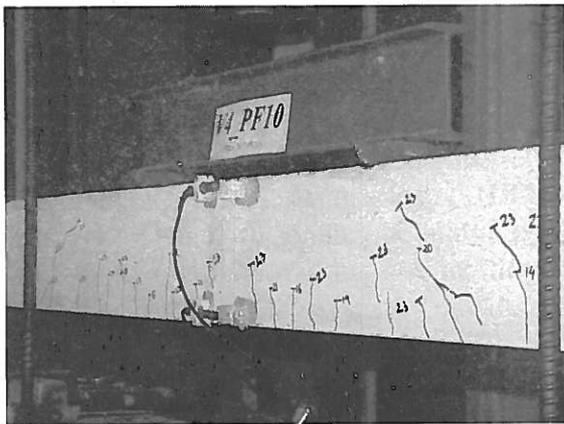


Fig. 5 – Prefendilhação: padrão de fendilhação à flecha de $L/400$

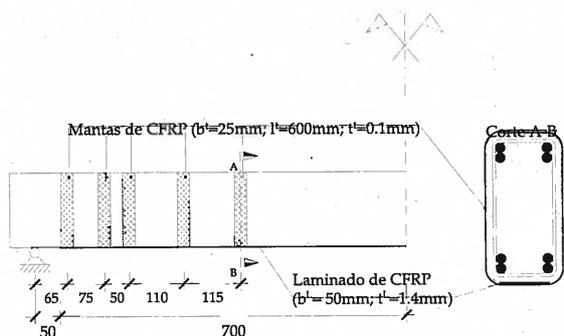


Fig. 6 – Sistema de reforço aplicado

Antes de aplicar os sistemas de CFRP, as zonas a reforçar eram esmeriladas, de forma a retirarem-se impurezas e leitada de cimento, assegurando uma base de maior aderência ao adesivo de fixação do sistema CFRP. As arestas das vigas, nas zonas de aplicação das faixas de manta, foram boleadas em correspondência com as recomendações do ACI 440R-96 (1996), de forma a evitar concentração de tensões nas faixas de manta e assegurar uma fixação o mais homogénea possível.

Após a superfície do betão ter sido tratada, e assegurando que a temperatura no

laboratório era inferior à máxima referida pelo fornecedor do adesivo, procedeu-se à colagem do laminado, tendo-se executado os seguintes procedimentos:

- limpeza da viga com ar comprimido;
- limpeza dos laminados com acetona;
- preparação do adesivo, apropriado para laminados de CFRP, constituído por uma resina epóxida e um endurecedor;
- com espátula, aplicação do adesivo no laminado, concentrando-o mais na parte central deste, de forma a ficar com forma de meia lua;
- aplicação do adesivo na viga, de forma idêntica à da aplicação do laminado;
- aplicação do laminado, tendo o cuidado de assegurar uma espessura uniforme de aproximadamente 2mm de adesivo, extraindo-se o adesivo excedente.

O período que decorreu entre a aplicação dos laminados e a colagem das cintas foi de pelo menos três dias. O procedimento adoptado na aplicação das cintas foi o seguinte:

- obtenção das faixas de 25mm de largura por corte da manta;
- preparação do adesivo, apropriado para manta de fibras de carbono, constituído por uma resina e um endurecedor;
- com recurso a um pincel, aplicação do adesivo na face da faixa de CFRP e na zona da viga a aplicar a faixa;
- aplicação da faixa de manta, com o cuidado necessário de forma a expulsar as bolhas de ar existentes entre a faixa e as faces da viga;
- após a adesão da faixa ao betão, aplicação de uma demão de adesivo sobre a faixa, de forma a assegurar uma adequada impregnação com aspecto sedoso e uniforme. Para evitar o enrugamento da faixa, o pincel deslizou sobre a faixa, sempre no mesmo sentido.

Decorridos, pelo menos três dias após a aplicação das faixas de manta, procedeu-se à colagem dos extensómetros nos locais previamente estabelecidos (ver Figura 3). Na Figura 7 inclui-se uma foto com o aspecto das vigas reforçadas, prontas a serem ensaiadas.

com o aspecto das vigas reforçadas, prontas a serem ensaiadas.

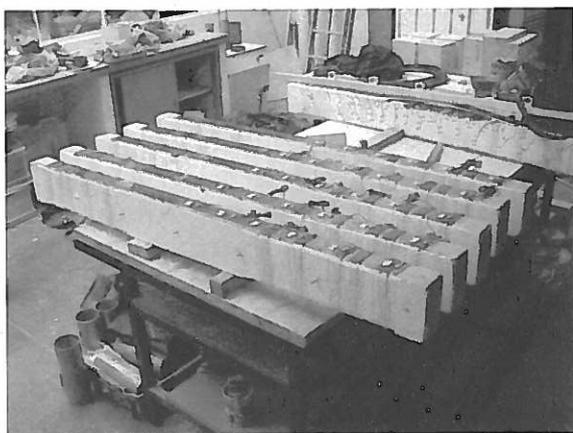


Fig. 7 – Vigas reforçadas

3 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1 – Introdução

As propriedades mais relevantes dos materiais aplicados foram avaliadas por intermédio de ensaios experimentais. No betão determinaram-se a resistência à compressão, a resistência à tracção em flexão e a energia de fractura. Nos laminados de CFRP avaliou-se o módulo de elasticidade e a resistência à tracção. No adesivo aplicado na fixação do laminado ao betão caracterizou-se o seu comportamento à tracção uniaxial. À data desta publicação não se dispõe de resultados relativos ao comportamento das armaduras convencionais.

3.2 – Betão

No Quadro 2 apresenta-se a composição utilizada na confecção do betão das vigas. Estas e os correspondentes provetes foram betonados em quatro séries, devido à capacidade da cuba de amassadura.

Quadro 2 – Composição do betão

| Componente | kg/m ³ |
|------------------------|-------------------|
| Cimento (Secil 42.5 I) | 450 |
| Areia (0-3mm) | 729 |
| Brita (0-15mm) | 1000 |
| Água | 202.5 |

A resistência à compressão do betão das vigas foi avaliada em ensaios de compressão com cilindros de 150mm de diâmetro e 300mm de altura. A resistência à tracção em flexão e a energia de fractura destes betões foi determinada em ensaios de flexão [Barros e Sena Cruz (2001)] sobre provetes prismáticos 850×100×100mm³ de dimensão, com 800mm de vão. No Quadro 3 apresentam-se os resultados obtidos. Apesar de se ter utilizado a mesma composição, a resistência à compressão aos 28 dias variou de 35MPa a 48.1MPa, devido, fundamentalmente, à dificuldade em quantificar, com o rigor necessário, a quantidade de água dos agregados, conduzindo a composições com ligeiras diferenças na relação água-cimento. Os valores registados para a resistência à tracção em flexão são da mesma ordem dos que se obtêm aplicando-se as expressões do CEB-FIP (1993) aos betões da classe C35/45. Por sua vez, a energia de fractura é aproximadamente o dobro da que se calcula seguindo-se as recomendações do CEB-FIP (1993). Contudo, os valores obtidos experimentalmente são da mesma ordem de grandeza dos obtidos em outros laboratórios [Hillerborg (1983)], que seguem a recomendação do RILEM [RILEM (1985)] para avaliação da energia de fractura em betões simples.

Quadro 3 – Propriedades do betão

| Viga | f _{cm} (MPa) ⁽¹⁾ | f _{cm,28} (MPa) | f _{ctm,f} (MPa) | G _F (Nm/m ²) |
|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| V2_PR6 e V2_PR8 | 56.1 | 48.1 | ⁽²⁾ | ⁽²⁾ |
| V1_SR6, V1_SR8, V3_CR8 e V4_CR8 | 49.1 | 42.0 | 5.11 | 203.7 |
| V3_CR6 e V4_CR6 | 42.5 | 36.4 | 5.12 | 178.5 |
| V1_SR10, V2_PR10, V3_CR10 e V4_CR10 | 0.8 | 35.0 | 4.54 | 193.2 |

⁽¹⁾ À data dos ensaios nas vigas (aproximadamente 550 dias)

⁽²⁾ Não disponível

3.3 – Laminados e mantas de CFRP

Laminados

O comportamento à tracção dos laminados (com as fibras na direcção da força de tracção) foi avaliado em provetes (ver Figura 8) com 9.59 ± 0.09 mm de largura e 1.45 ± 0.005 mm de espessura (média de 15 medidas), que segundo o fabricante, têm propriedades similares às dos laminados aplicados nas vigas. A descrição dos ensaios de tracção uniaxial e do equipamento utilizado encontra-se em outro trabalho [Sena Cruz *et al.* (2001)]. Segundo os resultados obtidos, o módulo de elasticidade e a resistência à tracção destes laminados é de 153GPa e 1741MPa, respectivamente.

Mantas

No Quadro 4 resumem-se as principais propriedades das mantas de CFRP, extraídas da ficha técnica facultada pelo fornecedor.

Quadro 4 – Propriedades das mantas de CFRP

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Densidade por unidade de área | 200-300g/m ³ |
| Densidade | 1800kg/m ³ |
| Espessura efectiva | 0.111-0.167mm |
| Resistência à tracção | >3700MPa |
| Módulo de elasticidade | 240 000MPa |
| Def. últ. de rotura em tracção | 1.5% |

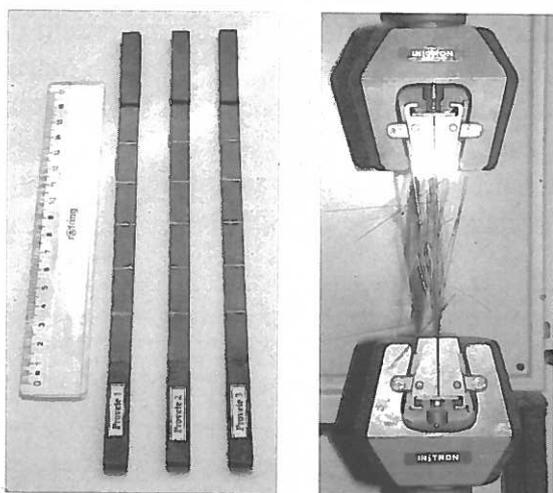


Fig. 8 – Caracterização experimental do comportamento à tracção dos laminados de CFRP

3.4 – Adesivo

O comportamento à tracção do adesivo utilizado na colagem dos laminados ao betão foi caracterizado por intermédio de ensaios de tracção uniaxial efectuados sobre os cinco provetes representados na Figura 9. As características dos provetes, o equipamento utilizado e os procedimentos de ensaio e as respostas experimentais tensão-extensão estão descritos em outro trabalho [Sena Cruz *et al.* (2001)]. O valor médio e o desvio padrão da resistência à tracção foi de 18.5MPa e 2.4MPa, respectivamente, e o valor médio e o desvio padrão do módulo de elasticidade foi de 5.09GPa e 0.59GPa, respectivamente.

4 – RESULTADOS

4.1 – Introdução

Nas vigas ensaiadas determinou-se a relação força-deslocamento nos transdutores e a relação força-extensão nos extensómetros aplicados. Com base nas extensões é possível determinar as tensões de corte que se desenvolvem na interface betão-laminado, para diferentes níveis de carga aplicados. Devido a limitação de espaço, neste trabalho a análise dos resultados far-se-á apenas considerando as respostas força-flecha.

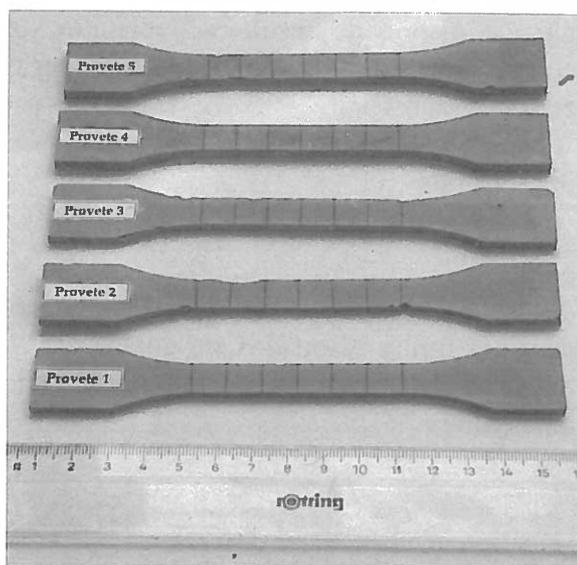


Fig. 9 – Provetes para caracterizar o comportamento à tracção do adesivo utilizado na colagem dos laminados de CFRP ao betão

4.2 – Relações força-flecha

Na Figura 10 apresenta-se a relação força-flecha registada nas vigas não reforçadas (série SR) e nas vigas previamente reforçadas (série PR). A carga de início de fendilhação, F_{cr} , e a carga de rotura, F_u , estão incluídas no Quadro 5, assim como os modos de rotura ocorridos.

A partir dos resultados obtidos verifica-se um ligeiro aumento da carga de início de fendilhação com a aplicação dos sistemas CFRP. A rigidez da resposta na fase linear aumenta com a presença dos laminados, estando este aumento também relacionado com a resistência à compressão do betão das vigas. A contribuição dos laminados em termos de rigidez da resposta é mais significativa após a fendilhação das vigas. A presença dos laminados aumentou significativamente a carga de rotura, sendo este aumento tão mais acentuado quanto menor é a percentagem de armadura convencional. A carga de rotura nas vigas reforçadas difere de apenas 6.9kN, enquanto nas vigas não reforçadas é de 27.6kN,

verificando-se que a eficácia do reforço aumenta com a diminuição da relação entre a percentagem de armadura convencional e a percentagem de CFRP.

Nas Figuras 11 e 12 apresentam-se os modos de rotura típicos ocorridos nas vigas reforçadas com CFRP.

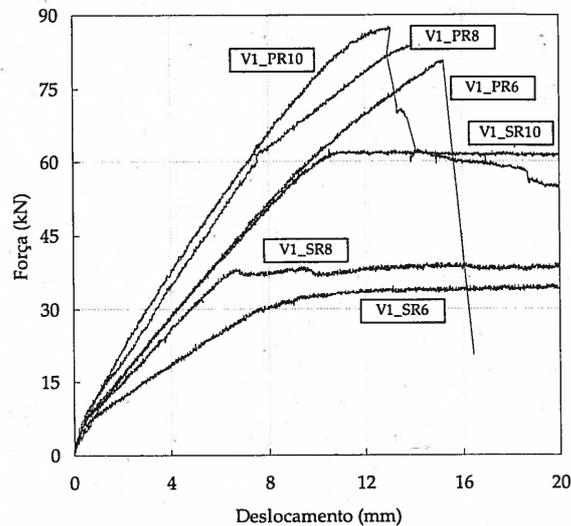


Fig. 10 – Resposta global força-flecha

Quadro 5 – Cargas de fendilhação e de rotura, e modos de rotura

| Viga | F_{cr} (kN) | F_u (kN) | Modo de rotura |
|---------|---------------|------------|--|
| V1 SR6 | 6.5 | 35.1 | Rotura por flexão. |
| V1 SR8 | 7.8 | 39.7 | Rotura por flexão. |
| V1 SR10 | 7.0 | 62.7 | Rotura por corte. |
| V2_PR6 | 8.1 | 80.8 | Destacamento na interface adesivo/betão e rotura da interface betão de recobrimento/armadura convencional. |
| V2_PR8 | 8.9 | 83.9 | Destacamento na interface adesivo/betão e rotura da interface betão de recobrimento/armadura convencional. |
| V2_PR10 | 9.2 | 87.7 | Rotura por corte: formação de uma fenda de corte a partir do ponto de aplicação da carga, com um ângulo aproximado de 30°. |
| V3 PF6 | 6.1 | 22.2* | - |
| V3 PF8 | 6.5 | 16.4* | - |
| V3 PF10 | 6.7 | 24.0* | - |
| V4 PF6 | 4.9 | 22.0* | - |
| V4 PF8 | 6.0 | 18.0* | - |
| V4 PF10 | 7.6 | 23.6* | - |
| V3_CR6 | - | 86.8 | Encurvadura das armaduras de compressão (na zona de flexão pura) e consequente destacamento do betão de recobrimento. |
| V3_CR8 | - | 91.3 | Encurvadura das armaduras de compressão (na zona de flexão pura) e consequente destacamento do betão de recobrimento. |
| V3 CR10 | - | 93.3 | Esmagamento da biela de compressão de betão junto ao apoio. |
| V4_CR6 | - | 87.1 | Encurvadura das armaduras de compressão (na zona de flexão pura) e consequente destacamento do betão de recobrimento. |
| V4_CR8 | - | 90.9 | Destacamento na interface adesivo/betão e rotura da interface betão de recobrimento/armadura convencional. |
| V4 CR10 | - | 100.7 | Esmagamento da biela de compressão de betão junto ao apoio. |

* Valores registados à flecha $L/400=3.75\text{mm}$

Nas vigas armadas com 4 varões de 10mm de diâmetro verificou-se a ocorrência de rotura por corte, quer na viga não reforçada quer na viga reforçada, o que revelou ser necessário aplicar maior percentagem de reforço ao corte, de forma a evitar este tipo de rotura, não desejável no âmbito do presente trabalho. Por este facto, as vigas da série *CR* (ver Quadro 1) foram reforçadas ao corte com dupla camada de faixas de manta de carbono.

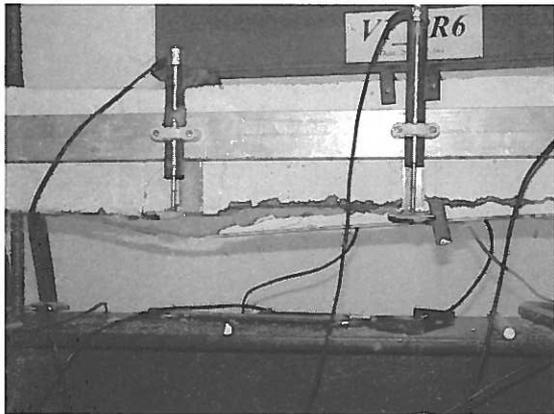


Fig. 11 – Modo de rotura ocorrido nas vigas V2_PR6 e V2_PR8

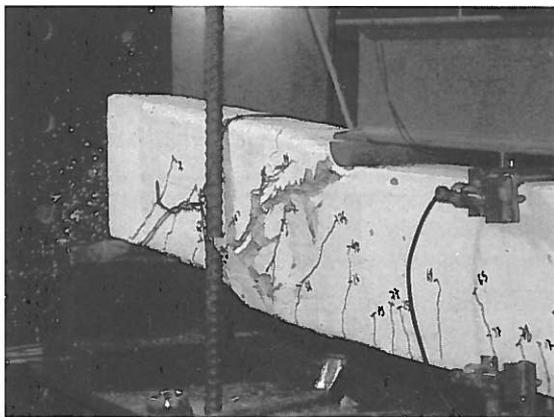


Fig. 12 – Modo de rotura ocorrido na viga V2_PR10

Na Figura 13 representa-se a relação força-flecha nas vigas que foram previamente fendilhadas (levadas à flecha de 3.75mm), reforçadas e ensaiadas novamente à rotura.

Constata-se que as vigas armadas com varões de diâmetro de 6 e 8mm têm rigidez e carga de rotura semelhantes. Este resultado seria de prever, dado que a resposta das vigas *VI_SR6* e *VI_SR8* apenas diferiram de 4.6kN na carga de

rotura. As diferenças registadas, em termos de rigidez e de carga de rotura nas vigas reforçadas com a mesma percentagem de armadura convencional, podem ser justificadas pela diferenças obtidas na resistência à compressão do betão dessas vigas (ver Quadro 3). Nas vigas armadas com varões de 10mm de diâmetro, após a carga correspondente à entrada em cedência da armadura convencional (ver Figura 10), a rigidez é significativamente superior às das restantes vigas. A carga de rotura da *V3_CR10* é da mesma ordem das vigas armadas com $\phi 6$ e $\phi 8$, dado que ocorreu uma rotura precoce, por esmagamento do betão num dos apoios.

Nas Figura 14, 15 e 16 comparam-se as respostas registadas nas vigas armadas com varões de 6, 8 e 10mm de diâmetro, respectivamente.

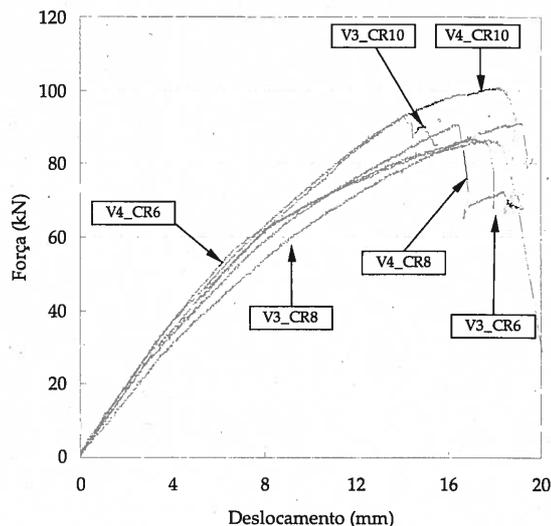


Fig. 13 – Relação força-flecha nas vigas pré-fendilhadas

Constata-se que a carga de rotura das vigas pré-fendilhadas (série *CR*) é superior à das correspondentes vigas “intactas” (série *PR*). Tal deve estar relacionado com o facto de nas vigas da série *CR* se ter aplicado duas camadas de faixas de tecido de CFRP, enquanto que nas vigas da série *PR* utilizou-se apenas uma camada de faixa de tecido, evitando-se assim a rotura por corte das vigas da série *CR* e contribuindo para um maior confinamento do betão e melhor ancoragem do laminado de CFRP.

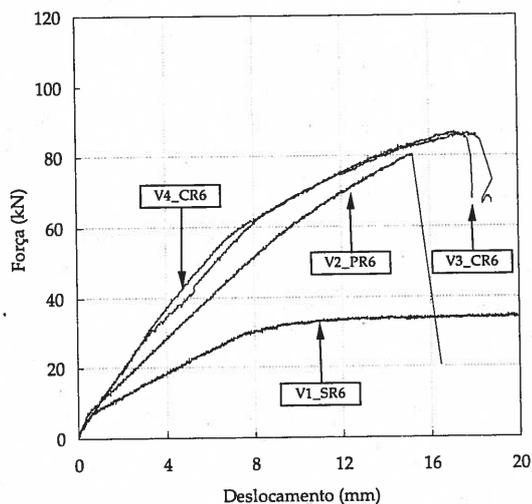


Fig. 14 – Resposta força-flecha nas vigas armadas com varões de 6mm de diâmetro

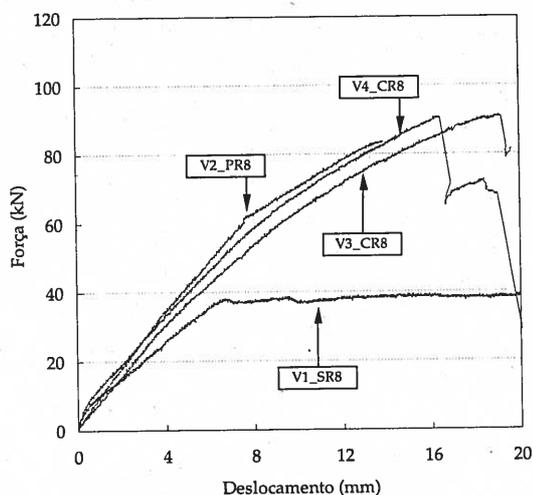


Fig. 15 – Resposta força-flecha nas vigas armadas com varões de 8mm de diâmetro

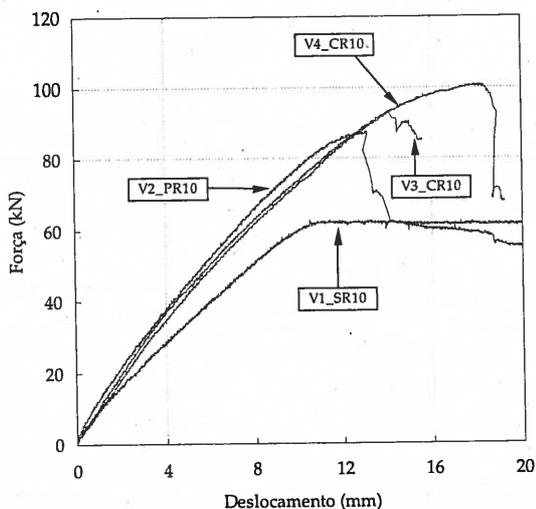


Fig. 16 – Resposta força-flecha nas vigas armadas com varões de 10mm de diâmetro

A viga pré-reforçada $V2_PR6$ (ver Fig. 14) desenvolveu uma rigidez anormalmente inferior à rigidez das vigas armadas com varões de 6mm de diâmetro. Se além do facto das vigas $V3_CR6$ e $V4_CR6$ terem sido pré-fendilhadas, se se considerar a resistência à compressão das vigas em análise (maior na viga $V2_PR6$), uma maior rigidez e capacidade de carga da viga $V2_PR6$ eram esperadas. A menor rigidez e capacidade de carga de $V2_PR6$ devem estar relacionadas com o facto do braço interno das armaduras da viga $V2_PR6$ ter sido inferior ao braço das vigas $V3_CR6$ e $V4_CR6$, devido a deficiente montagem das armaduras.

A Figura 17 ilustra os modos de rotura típicos ocorridos nas vigas da série CR. A não existência de qualquer estribo no tramo central das vigas está na base da ocorrência da encurvadura da armadura de compressão, na maior parte das vigas reforçadas com $\phi 6$ e $\phi 8$, conduzindo ao destacamento do betão de recobrimento em compressão. Nas vigas armadas com varões de 10mm de diâmetro, dado que a carga de rotura foi próxima dos 100kN, ocorreu esmagamento do betão sobre os apoios, motivado por deficiente reforço ao corte e confinamento do betão desta zona.

Na Figura 18 representa-se a relação entre o ganho de resistência, R_e , (cociente entre a carga de rotura da viga reforçada e a da correspondente viga não reforçada) e a percentagem relativa de reforço, $\rho_{LS} = A_{CFRP}/A_s$, (cociente entre a área de CFRP e a área de armadura convencional de tracção). Verifica-se que os resultados obtidos com as vigas armadas com varões de 8 e 10mm de diâmetro apresentam uma tendência semelhante à registada por Salvador (2001). Todavia, para a menor percentagem de armadura convencional, o ganho de resistência é inferior ao que se pode inferir dos valores obtidos por Salvador. Segundo os resultados obtidos por este autor, existe uma relação aproximadamente linear entre R_e e ρ_{LS} , enquanto no presente trabalho se constata

que diminuindo ρ_{LS} o aumento de R_E tende para uma assíntota.

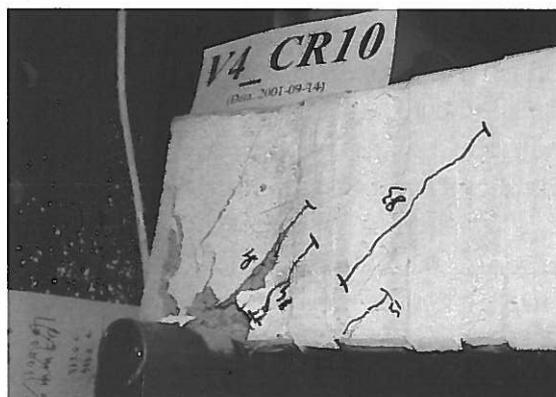
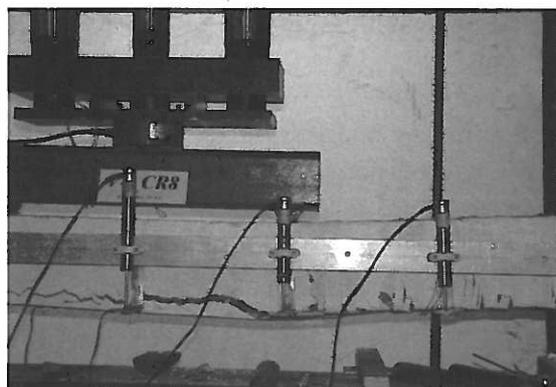
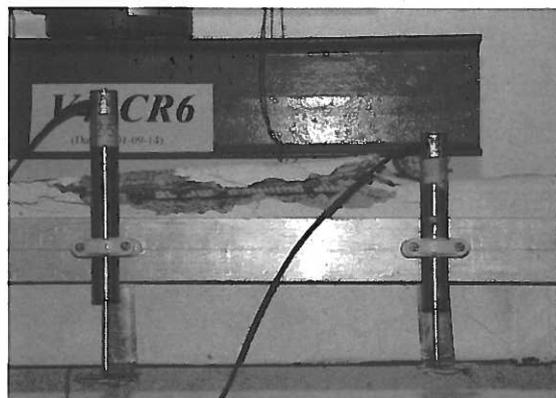


Fig. 17 – Modos de rotura típicos nas vigas da série CR

5 – CONCLUSÕES

Neste trabalho descreve-se a campanha de ensaios experimentais efectuada com vigas de betão armado reforçadas com sistemas em CFRP. A partir dos resultados obtidos concluí-se que:

- o reforço com laminados de CFRP aumentou significativamente a carga de rotura;
- a eficácia do reforço aumenta com a diminuição da relação entre a

percentagem de armadura convencional e a percentagem de CFRP;

- a rigidez aumenta com a presença dos laminados;
- para estados de pré-fendilhação correspondentes a flecha de $L/400$ (L =vão da viga), a carga de rotura é praticamente insensível ao facto da viga se encontrar pré-fendilhada. Apenas se verifica uma quebra de rigidez devido ao facto da viga se encontrar fendilhada no momento do reforço;
- o ganho de resistência (cociente entre a carga de rotura da viga reforçada e a carga de rotura da correspondente viga não reforçada) aumenta com a percentagem relativa de reforço (cociente entre a área de laminado e a área de armadura longitudinal de tracção), tendendo esse aumento para uma assíntota.

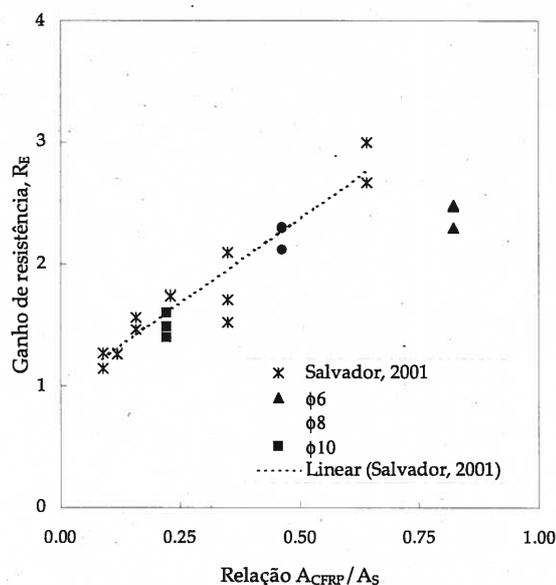


Fig. 18 – Eficácia do reforço

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam os seus agradecimentos às empresas que gentilmente forneceram os materiais usados nesta campanha experimental, nomeadamente à Biu Internacional, à Secil, e à Solusel, e ao Eng^o Paulo Nóvoa do CEMACOM.

REFERÊNCIAS

- ACI 440R-96, *State of the art report on Fiber Reinforced Plastic reinforcement for concrete structures*, Reported by ACI Committee 440, American Concrete Institute, 1996.
- Barros, J.A.O., *Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica*, Tese de Doutoramento, FEUP, 1995.
- Barros et al., *Análise Experimental de Pilares de Betão Armado Reforçados com Laminados de Carbono sob Acções Cíclicas*, Sísmica 2001, Açores, 2001.
- Barros, J.A.O., Sena Cruz, J.M., *Fracture energy of steel fibre reinforced concrete*, Journal of Mechanics of Composite Materials and Structures, Vol. 8, No. 1 pp. 29-45, January-March 2001.
- CEB-FIP Model Code 1990. Design Code Comité Euro-International du Béton. Bulletin d'information n°203-205, 1993.
- Etman, E; Zaher, F.; Beeby, A.W., *Experimental study of shear-strengthened beams*, 7th Int. Conf. on Inspection Appraisal Repairs &, Maintenance of Buildings & Structures, Nottingham Trent University, pp. 313-320, 2001.
- Juvandes, L.F.P., *Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de "CFRP"*, Tese de Doutoramento, FEUP, 1999.
- Hillerborg, A., *Concrete fracture energy tests performed by 9 laboratories according to a draft RILEM recommendation*, Report to RILEM TC50-FMC, Report TVBM-3015, Lund Sweden, 1983.
- Oehlers, D.J.; Moran, J.P., *Premature failure of externally plated reinforced concrete beams*, ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 116, n°4, April, pp. 979-995, 1990.
- RILEM TC 50-FMC, *Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams*, Materials and Structures, 18(106), 285-290, 1985.
- Salvador, J.E.D, *Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão*, Tese de Mestrado, FEUP, 2001.
- Sena Cruz, J.M.; Barros, J.A.O.; Faria, R., *Assessing the embedded length of epoxy-bonded carbon laminates by pull-out bending tests*, Conference of Composites in Construction, Porto, pp. 217-222, 2001.

