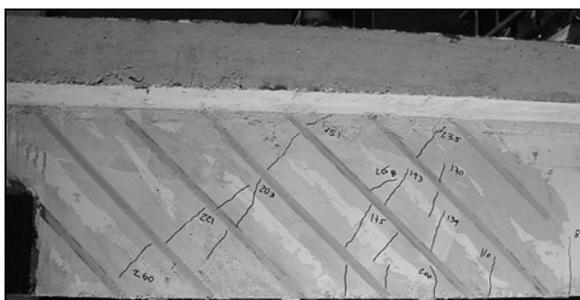
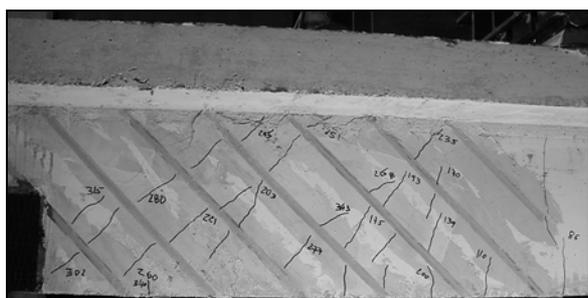




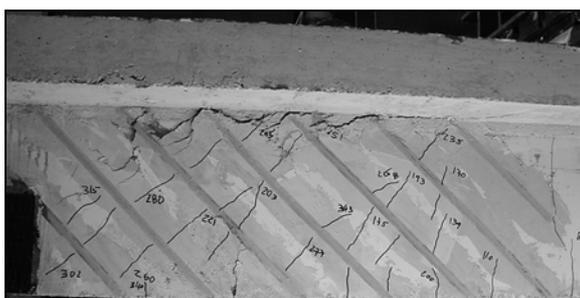
a) Primeiras fendas de flexão



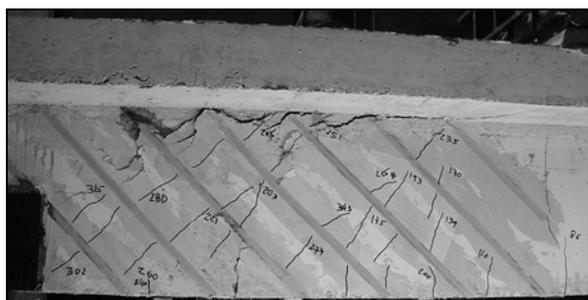
b) Aparecimento de fendas diagonais de corte



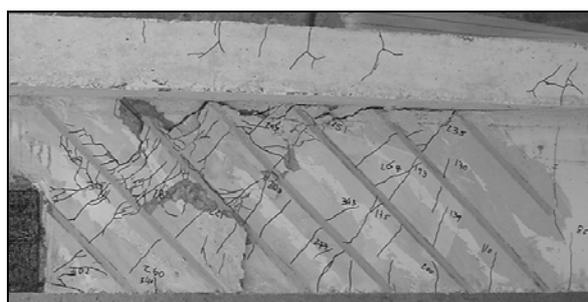
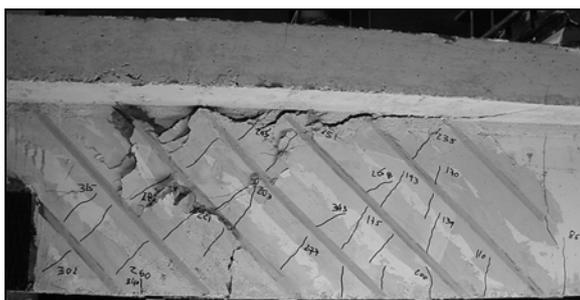
c) Início do “spalling” da parede constituída pelo betão de recobrimento e os laminados inseridos - formação da fenda horizontal contínua



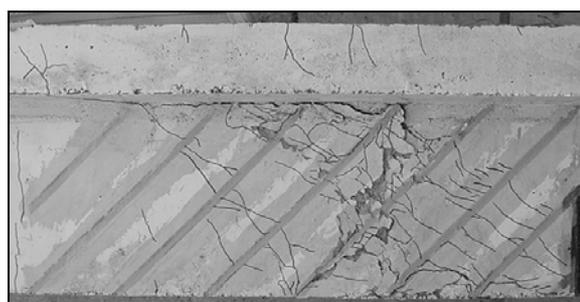
d) “Spalling” da parede constituída pelo betão de recobrimento e os laminados inseridos



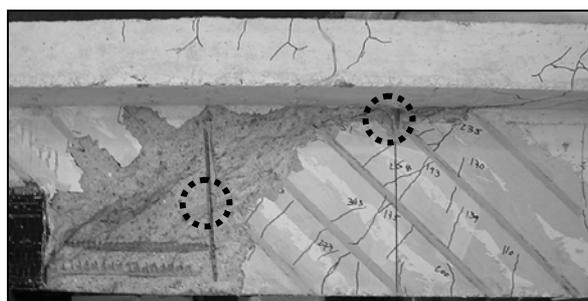
e) Registos efectuados pós carga máxima: desenvolvimento do “spalling” e rotura dos estribos



f) Após a marcação das fendas (pós ensaio)



g) Após a marcação das fendas (pós ensaio): face oposta



h) Identificação dos estribos e análise pormenorizada da zona da fenda de rotura de corte (ambas as faces)

Figura 68 – Sequência do ensaio da viga com oito laminados de CFRP inclinados a 45° em cada face (viga 2S-8LI45).

As primeiras fendas que surgiram foram de flexão e, posteriormente, apareceram as fendas diagonais de corte. Com o aumento do carregamento novas fendas de corte foram surgindo e, as já existentes, prolongaram-se para a face inferior da alma da viga e para a zona da ligação alma/banzo. Chegadas a esta zona as fendas tornaram-se horizontais e direccionaram-se para a posição onde a carga estava a ser aplicada. Todos os laminados, com a excepção do que está mais próximo da secção de aplicação da carga, foram atravessados por fendas diagonais de corte que se formaram ao longo de todo o vão de corte.

A capacidade máxima de carga da viga 2S-8LI45 foi atingida quando se deu o início do “spalling” (destacamento) da parede, constituída pelo betão de recobrimento e pelos laminados de CFRP inseridos, nas imediações da parte superior do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga. O início do “spalling” ocorreu quando se formou uma fenda contínua horizontal na zona de ligação alma/banzo, entre o primeiro e o quarto laminado a contar a partir da secção de aplicação da carga. Posteriormente, verificou-se a rotura dos dois estribos de aço localizados no menor vão de corte da viga. Na Figura 69 apresenta-se o pormenor do fenómeno do “spalling” que ocorreu à esquerda do terceiro laminado a contar da secção do apoio. Na mesma figura apresenta-se o fenómeno do “spalling” na viga 2S-5LI45 (viga reforçada com cinco laminados inclinados a 45°).

A Figura 68-f) e a Figura 68-g) ilustram, em ambas as faces da viga, o padrão de fendilhação no menor dos vãos de corte, onde ocorreu a rotura da viga, e que foi registado após o ensaio. Na Figura 68-h) apresenta-se a pormenorização da rotura por corte em ambas as faces com a identificação dos estribos (as duas rectas verticais correspondem a dois estribos) e a localização das secções onde estes rebentaram. A análise da zona de rotura da viga, após a remoção do reforço, permite verificar a ocorrência de várias fendas de corte, apresentando-se o betão bastante danificado.



Viga 2S-5LI45



Viga 2S-8LI45

Figura 69 – “Spalling” da parede constituída pelo betão de recobrimento e os laminados inseridos.

Na Figura 70 apresentam-se as curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga referentes à viga reforçada ao esforço transversal, em cada uma das faces do menor vão de corte, com oito laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° (viga 2S-8LI45) e à mesma viga mas

sem reforço de CFRP (viga 2S-R). Na mesma figura está representada a relação  $\Delta$ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga.

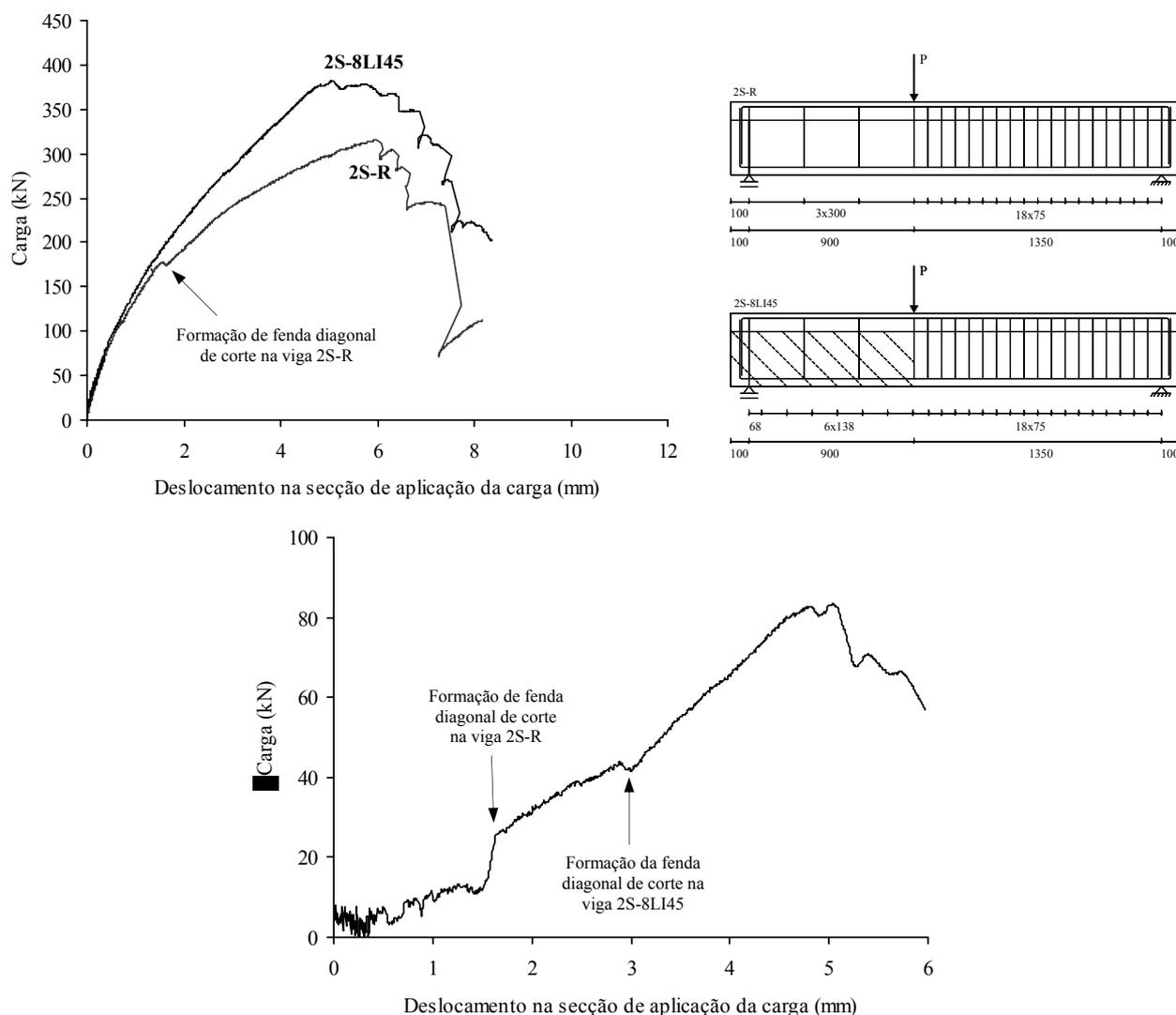


Figura 70 – Efeito do reforço com oito laminados de CFRP inclinados a 45° em cada uma das faces da viga.

A Figura 70 permite concluir que o reforço de CFRP não contribui para a capacidade de carga da viga na fase inicial do carregamento e, tal como já tinha acontecido para o caso das vigas reforçadas que anteriormente foram analisadas, o efeito do CFRP só foi notório a partir do momento em que se formaram fendas diagonais de corte. O incremento muito acentuado, quase vertical, na variação de  $\Delta$ Carga localiza-se na fase referente à formação da fenda diagonal na viga 2S-R, assinalada na Figura 70, e que provocou uma momentânea quebra no aumento da capacidade resistente da viga (esta situação não aconteceu na viga com reforço). A partir daqui, o valor de  $\Delta$ Carga foi aumentando, gradualmente, com o carregamento até ao momento em que a viga reforçada alcançou a sua capacidade máxima, registando-se aí um valor de  $\Delta$ Carga de 83.5 kN. A única excepção ao referido andamento, da variação de  $\Delta$ Carga com o deslocamento verificado na secção de

aplicação da carga, foi quando na viga reforçada ocorreu uma fenda diagonal, cujo o efeito está representado na Figura 70. Nesta figura também é possível verificar que para flechas superiores a 5.07 mm a capacidade de carga da viga reforçada (viga 2S-8LI45) vai diminuindo, enquanto a da viga sem reforço (viga 2S-R) vai aumentando até aos 5.97 mm. Este facto está na origem dos valores decrescentes da parte final da resposta  $\Delta$ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga.

De uma forma genérica pode-se referir que a solução de reforço em análise permitiu um aumento de rigidez, a partir do instante em que se formaram as fendas diagonais de corte, e que trouxe benefícios em termos de ganho de capacidade de carga na rotura (o reforço permitiu que a capacidade máxima de carga subisse dos 315 kN para os 382 kN). Em termos de flecha na secção de aplicação da carga, para a qual se verificou a capacidade resistente máxima das vigas, constatou-se que a da viga com reforço 2S-8LI45 (5.07 mm) foi inferior à obtida na viga sem reforço 2S-R (5.97 mm).

Na Tabela 15 apresentam-se os principais dados para a interpretação dos resultados obtidos em termos de extensões no laminado de CFRP e no estribo de aço referentes à viga 2S-8LI45. Na mesma tabela, para as secções onde foram colados os extensómetros (laminado de CFRP e estribo de aço) apresentam-se os valores das respectivas extensões obtidos em vários níveis de carregamento. As extensões registadas no laminado de CFRP instrumentado estão ilustradas nos gráficos das Figuras 71 e 72. A primeira refere-se aos valores registados nos quatro extensómetros (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4) em vários níveis de carga e a segunda refere-se à resposta carga vs extensão lida nos extensómetros anteriormente referidos. O mesmo tipo de resposta aparece ilustrada na Figura 73, mas em termos de extensões registadas nas secções do estribo de aço onde foram colados os extensómetros 1 (Ext. 1) e 2 (Ext. 2).

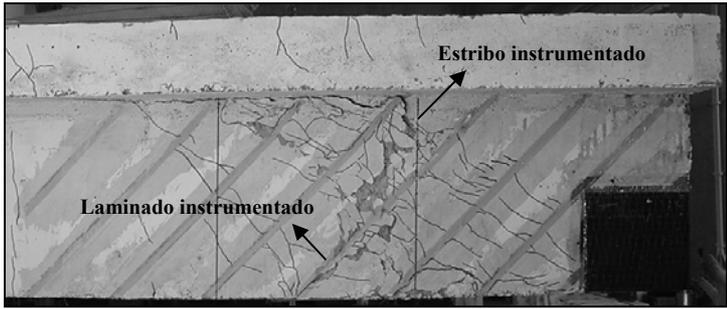
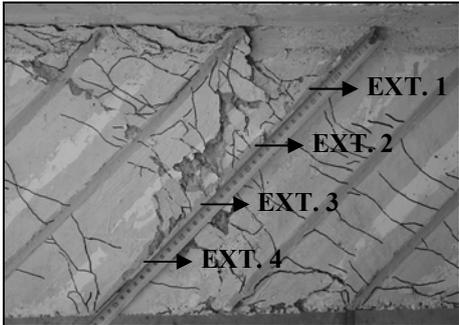
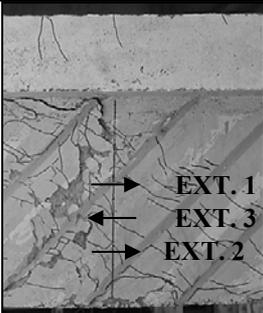
O valor máximo registado da extensão no laminado de CFRP instrumentado foi de 5951  $\mu\text{m/m}$  e ocorreu no extensómetro 2 para a carga correspondente à capacidade resistente máxima da viga. Também foi para este nível de carregamento que se registaram as máximas extensões nas secções em que foram colados os extensómetros 1 (2604  $\mu\text{m/m}$ ), 3 (4764  $\mu\text{m/m}$ ) e 4 (2154  $\mu\text{m/m}$ ). A ordem de grandeza das extensões do laminado de CFRP ao longo da altura da alma, representada na Figura 71, está directamente relacionada com o padrão de fendilhação na zona do laminado instrumentado. Com efeito, nesta zona houve uma concentração de fendas diagonais de corte nas proximidades dos extensómetros 2 e 3.

A análise das Figuras 72 e 73 permite constatar que o laminado de CFRP e o estribo de aço não foram mobilizados numa fase inicial do carregamento. Com efeito, apenas começaram a ser solicitados para um carregamento que originou a formação de fendas diagonais de corte. Na Figura 72 pode-se constatar que a ordem pela qual os extensómetros do CFRP foram solicitados foi

Ext.3 e Ext.4 em simultâneo, Ext.2 e Ext.1. Esta ordem permite ter a percepção do aparecimento das fendas diagonais de corte junto ao laminado instrumentado. Primeiro as fendas surgiram na parte inferior da alma da viga e, posteriormente, é que surgiram na parte superior da referida alma da viga.

Das extensões registadas no estribo de aço, concretamente nas secções onde foram colados os extensómetros 1 e 2, a máxima foi de 5887  $\mu\text{m/m}$  e ocorreu no extensómetro 1 (Ext.1) para o nível de carga correspondente à capacidade máxima da viga. A máxima extensão lida na secção referente ao extensómetro 2 foi de 2659  $\mu\text{m/m}$  para uma carga de 300 kN. A partir deste nível de carga verificou-se uma inversão na resposta carga vs extensão no extensómetro 2 (Figura 73). Esta inversão pode estar associada a um deslizamento do estribo de aço na zona do extensómetro ou a uma deficiência no funcionamento deste. Esta última hipótese é avançada em virtude da mudança brusca dos valores da extensão, concretamente, pelo facto de se ter atingido extensões negativas. Na curva de comportamento representada na Figura 73 referente ao extensómetro 1 pode-se verificar a ocorrência da cedência da armadura do aço do estribo instrumentado para uma extensão de cerca de 4000  $\mu\text{m/m}$ .

Tabela 15 – Resultados da extensometria instalada na viga 2S-8LI45.

|                  |   |   |        |        |        |        |        |        |  |
|------------------|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| Viga<br>2S-8LI45 | Descrição   |  |        |        |        |        |        |        |  |
|                  | Reforço ao corte com CFRP constituído por oito laminados inclinados a 45° em cada face da viga.<br><br>A carga máxima atingida foi de $F_{max} = 382$ kN. |   |        |        |        |        |        |        |  |
| Laminado de CFRP |    | Ext. ( $\mu\text{m/m}$ )  | 200 kN | 250 kN | 300 kN | 350 kN | 380 kN | 382 kN |  |
|                  |   | 1   | 119    | 119    | 339    | 596    | 1779   | 2604   |  |
|                  |   | 2   | 164    | 977    | 3322   | 4609   | 5887   | 5951   |  |
|                  |   | 3   | 1159   | 2382   | 2857   | 3477   | 4673   | 4764   |  |
|                  |   | 4   | 283    | 392    | 675    | 1342   | 2108   | 2154   |  |
| Estribo          |    | Ext. ( $\mu\text{m/m}$ )  | 200 kN | 250 kN | 300 kN | 350 kN | 380 kN | 382 kN |  |
|                  |   | 1   | 844    | 1834   | 2613   | 3255   | 5612   | 5887   |  |
|                  |   | 2   | 73     | 798    | 2659   | -      | -      | -      |  |
|                  |   | 3   | -      | -      | -      | -      | -      | -      |  |

Nota: Na identificação da localização dos extensómetros colados no estribo a seta que aponta para a esquerda indica que o extensómetro está do lado oposto ao representado na fotografia.

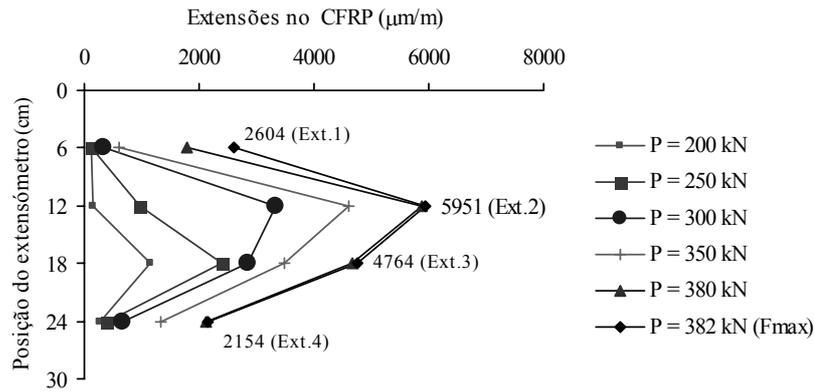


Figura 71 – Extensões no laminado de CFRP para vários níveis de carga (viga 2S-8LI45).

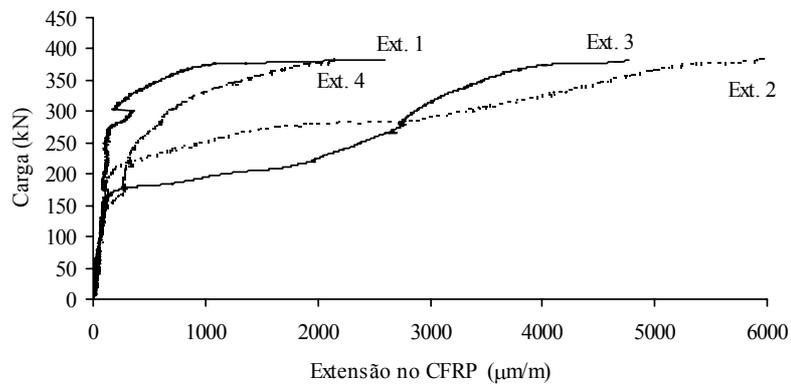


Figura 72 – Extensões no laminado instrumentado até à carga máxima (viga 2S-8LI45).

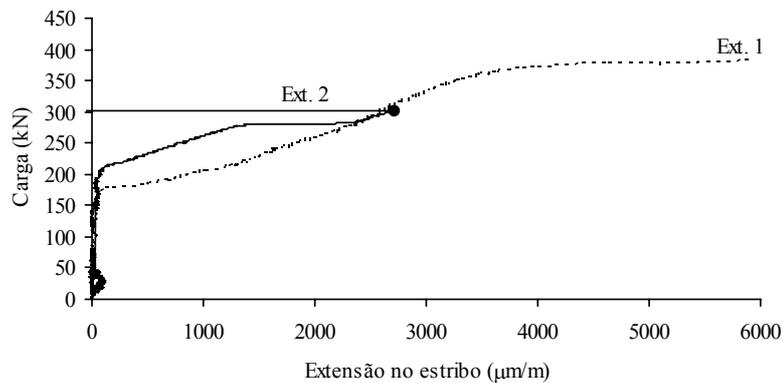


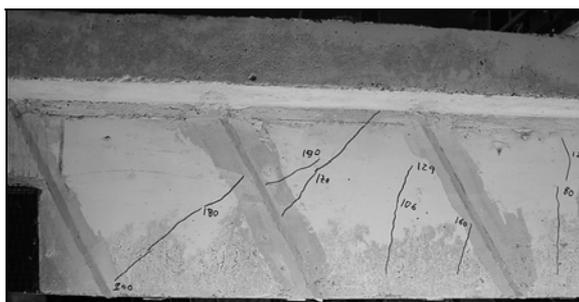
Figura 73 – Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima (viga 2S-8LI45).

### 3.3.2.7 - Viga reforçada com três laminados a 60° em cada face do menor vão de corte (2S-3LI60)

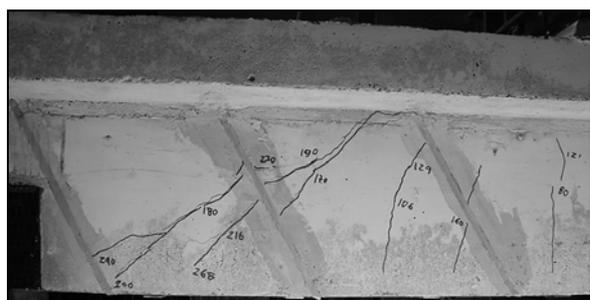
A sequência do ensaio da viga 2S-3LI60, no vão de corte onde ocorreu a sua rotura, está ilustrada nas fotografias da Figura 74.



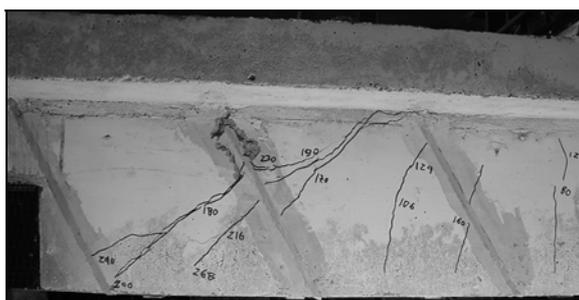
a) Primeiras fendas de flexão



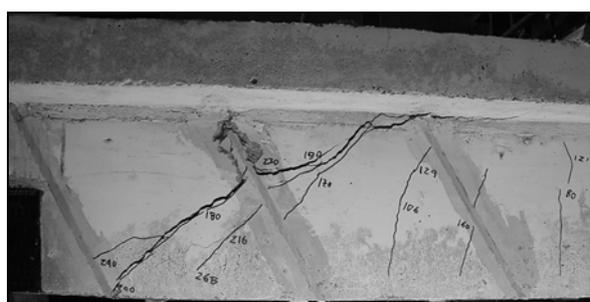
b) Aparecimento da fenda diagonal de corte



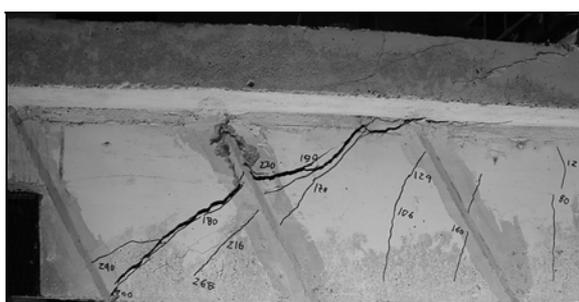
c) Previamente ao "pull-out" do laminado central



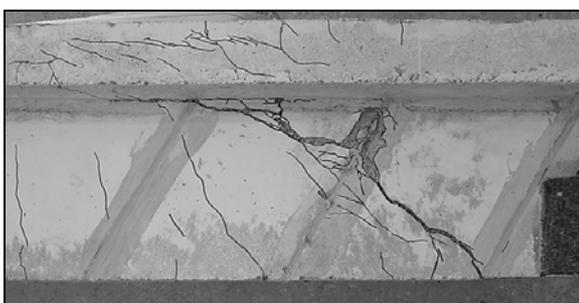
d) "Pull-out" do laminado central



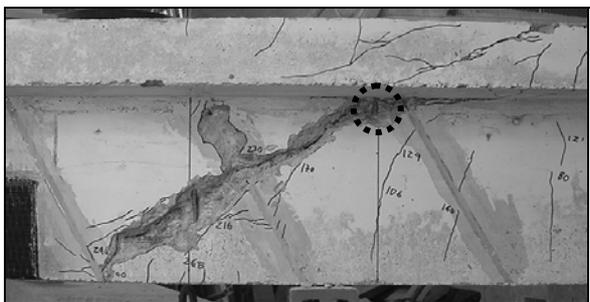
e) Registo efectuado pós carga máxima: desenvolvimento da fenda de rotura de corte e rotura dos estribos



f) Após a marcação das fendas (pós ensaio)



g) Após a marcação das fendas (pós ensaio): face oposta



h) Identificação dos estribos e análise pormenorizada da zona da fenda de rotura de corte (ambas as faces)

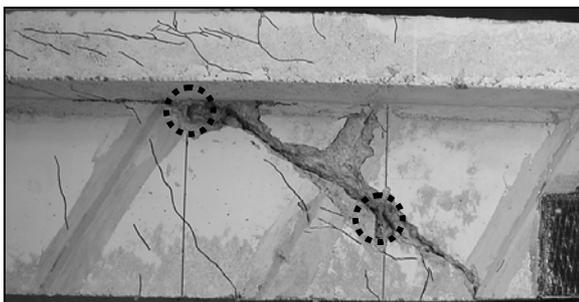


Figura 74 – Sequência do ensaio da viga com três laminados de CFRP inclinados a 60° em cada face (viga 2S-3LI60).

Após o aparecimento das primeiras fendas de flexão, nas imediações da secção de aplicação da carga, surgiu a fenda de corte que estaria, mais tarde, na origem da rotura da viga. O aparecimento desta fenda está traduzido, na curva carga *vs* deslocamento na secção de aplicação da carga da viga 2S-3LI60 (Figura 75), por intermédio da perda momentânea do aumento da capacidade de carga da viga para um carregamento de cerca dos 177 kN. O prolongamento da referida fenda até à face inferior da alma da viga e até à zona da ligação alma/banzo (e sua abertura) foi acompanhado pelo aparecimento, na sua proximidade, de mais fendas de corte. A fenda de rotura de corte ao atingir a ligação alma/banzo mudou de direcção, tornando-se horizontal, e progrediu no sentido do local onde a carga estava a ser aplicada.

Face ao padrão de fendilhação instalado no menor vão de corte da viga, nomeadamente em termos de fendas diagonais de corte (Figura 74-c), dos três laminados de CFRP instalados, o central foi o mais solicitado. Com o desenvolvimento do carregamento e a consequente abertura das fendas de corte que se formaram (principalmente a que originou a rotura da viga), o laminado central acabou por ceder por “pull-out” nas duas faces da viga, tal como se pode verificar nas Figuras 74-f) e 74-g). O “pull-out” ocorreu naturalmente pelo menor dos comprimentos de aderência do laminado. O comprimento efectivo médio (duas faces) de aderência ( $l_b$ ) que se registou no laminado central, por intermédio do qual se esgotou a aderência do CFRP ao betão (“pull-out”), foi de 10 cm. Depois do laminado central ficar desactivado por “pull-out”, em ambas as faces da viga, os dois estribos localizados no menor vão de corte da viga e atravessados pela fenda de rotura de corte rebentaram. A fenda de rotura de corte acabaria por alcançar o apoio e o ponto de aplicação da carga de uma forma contínua (ver a fotografia do lado esquerdo da Figura 74-g).

A Figura 74-f) e A Figura 74-g) ilustram, em ambas as faces da viga, o padrão de fendilhação no menor dos vãos de corte, onde ocorreu a rotura da viga, e que foi registado após o ensaio. Na Figura 74-h) apresenta-se a pormenorização da rotura por corte, em ambas as faces da viga, com a identificação dos estribos (as duas rectas verticais correspondem a dois estribos) e a localização das secções onde estes rebentaram. A análise da zona de rotura da viga, após a remoção do reforço, permite verificar a existência de uma fenda de corte, que se destaca das restantes, e à qual esteve associada a rotura da viga. Esta fenda acabou apenas por ser intersectada por um único laminado (o laminado central).

Na Figura 75 apresentam-se as curvas carga *vs* deslocamento na secção de aplicação da carga referentes à viga reforçada ao esforço transversal, em cada uma das faces do menor vão de corte, com três laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 60° (viga 2S-3LI60) e à mesma viga mas sem reforço de CFRP (viga 2S-R). Na mesma figura está representada a relação  $\Delta$ Carga *vs* deslocamento na secção de aplicação da carga.

A Figura 75 permite concluir que o reforço de CFRP não contribui para a capacidade de carga da viga na fase inicial do carregamento. O efeito do CFRP só foi notório a partir do momento em que se formaram fendas diagonais de corte. O incremento muito acentuado, quase vertical, na variação de  $\Delta$ Carga localiza-se na fase referente à formação da fenda diagonal de corte na viga 2S-R, assinalada na Figura 75, e que provocou uma momentânea quebra no aumento da capacidade resistente da viga. Previamente a este ponto verificou-se a existência de um valor negativo de  $\Delta$ Carga que traduz o efeito da formação da fenda diagonal de corte na viga reforçada 2S-3LI60 (ver Figura 75). Para deformações superiores à correspondente à formação da fenda de corte na viga sem reforço (2S-R), anteriormente referida, o valor de  $\Delta$ Carga foi aumentando com o carregamento até ao momento em que a viga reforçada alcançou a sua capacidade máxima, registando-se aí um valor de  $\Delta$ Carga de 61 kN. O facto da carga máxima da viga reforçada ter sido atingida para uma flecha na secção de aplicação da carga (5.78 mm) inferior à da viga não reforçada (5.97 mm) está na origem dos valores decrescentes da parte final da resposta  $\Delta$ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga.

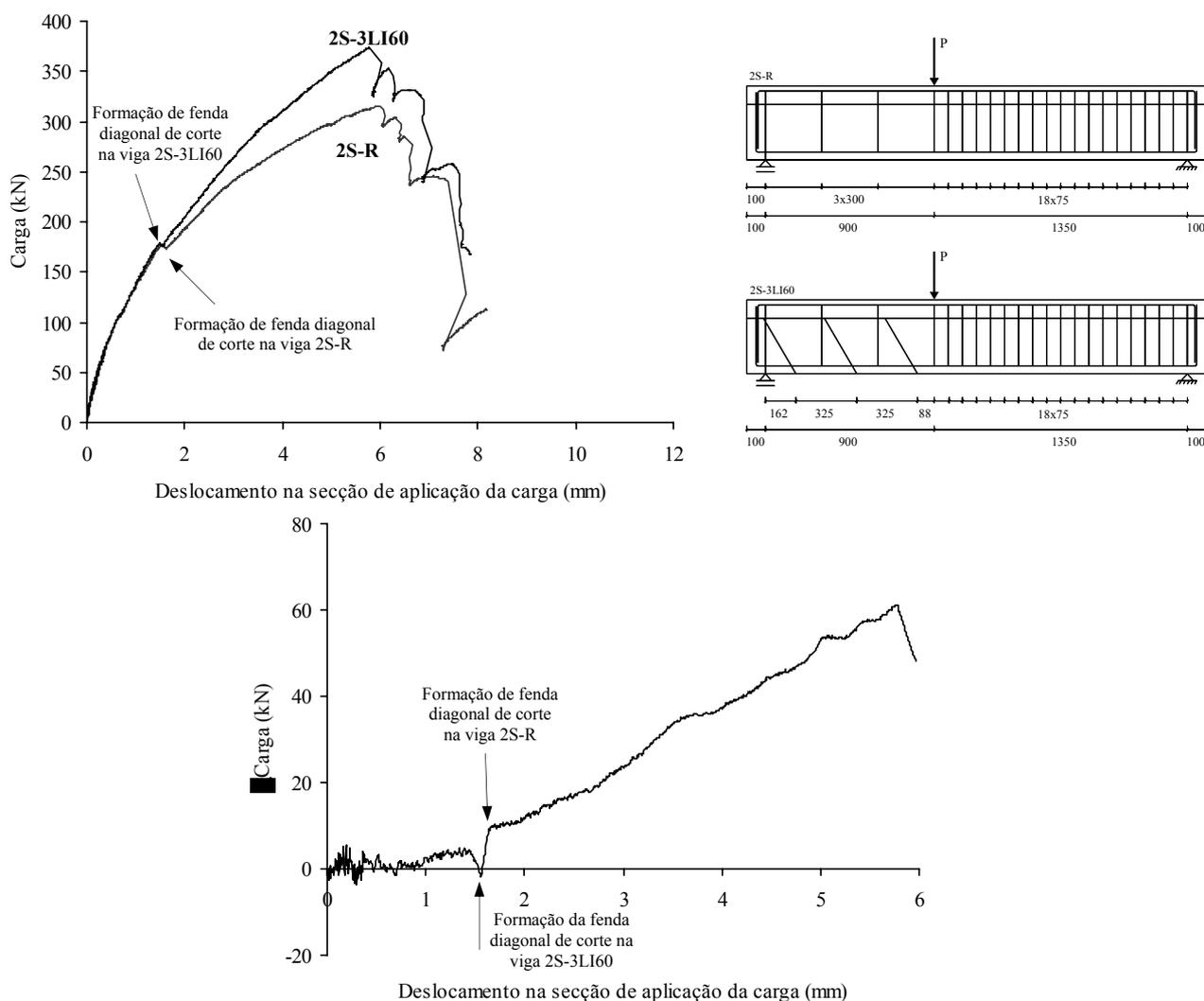


Figura 75 – Efeito do reforço com três laminados de CFRP inclinados a 60° em cada uma das faces da viga.

De uma forma genérica pode-se referir que a solução de reforço em análise permitiu um aumento de rigidez, a partir do instante em que se formaram as fendas diagonais de corte, e que trouxe benefícios em termos de ganho de capacidade de carga na rotura (o reforço permitiu que a capacidade de carga na rotura subisse dos 315 kN para os 374 kN). Em termos de flecha na secção de aplicação da carga, para a qual se verificou a carga máxima das vigas, constatou-se que a da viga com reforço 2S-3LI60 (5.78 mm) foi ligeiramente inferior à obtida na viga sem reforço 2S-R (5.97 mm).

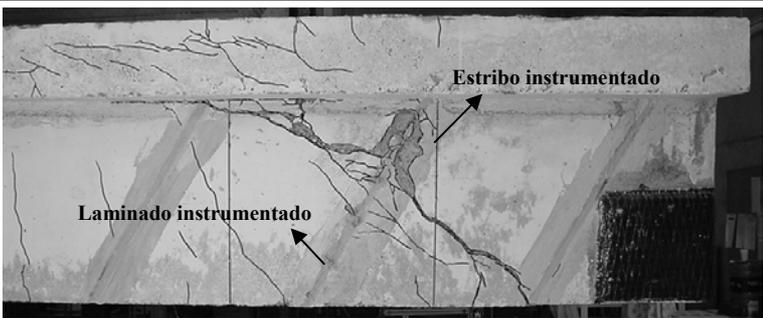
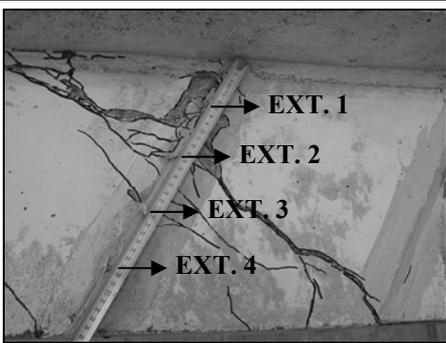
Na Tabela 16 apresentam-se os principais dados para a interpretação dos resultados obtidos em termos de extensões no laminado de CFRP e no estribo de aço referentes à viga 2S-3LI60. Na mesma tabela, para as secções onde foram colados os extensómetros (laminado de CFRP e estribo de aço) apresentam-se os valores das respectivas extensões obtidos em vários níveis de carregamento. As extensões registadas no laminado de CFRP instrumentado estão ilustradas nos gráficos das Figuras 76 e 77. A primeira refere-se aos valores registados nos extensómetros 2 (Ext. 2), 3 (Ext. 3) e 4 (Ext. 4) em vários níveis de carga e a segunda refere-se à resposta carga vs extensão lida nos extensómetros anteriormente referidos. O mesmo tipo de resposta aparece ilustrada na Figura 78, mas em termos de extensões registadas nas secções do estribo de aço onde foram colados os três extensómetros (Ext.1, Ext.2 e Ext.3).

O valor máximo registado da extensão no laminado de CFRP instrumentado foi de 11107  $\mu\text{m/m}$  e ocorreu no extensómetro 2 para uma carga de 372 kN, muito próxima da capacidade resistente máxima da viga (374 kN). Para os restantes extensómetros o valor da extensão máxima registada foi alcançado para a carga máxima da viga. Assim, no extensómetro 3 e 4 a máxima extensão registada foi 9747  $\mu\text{m/m}$  e 2282  $\mu\text{m/m}$ , respectivamente. O valor mais elevado no extensómetro 2 está directamente relacionado com o facto de na sua proximidade ter ocorrido a fenda de rotura de corte e que, tal como se referiu anteriormente, esteve na origem do “pull-out” do laminado instrumentado. O padrão de fendilhação existente nas imediações do laminado instrumentado também justifica o maior valor da extensão obtida no extensómetro 3 em relação ao do extensómetro 4. Com efeito, na vizinhança deste extensómetro não surgiram fendas de corte o que fez com que, por exemplo, a extensão máxima nele registada fosse 20% da verificada no extensómetro posicionado nas proximidades onde ocorreu a fenda de rotura de corte (extensómetro 2).

A análise das Figuras 76 e 77 permite constatar que o laminado de CFRP e o estribo de aço não foram mobilizados numa fase inicial do carregamento. Com efeito, apenas começaram a ser solicitados para um carregamento que originou a formação de fendas diagonais de corte. Na Figura 76 pode-se constatar que a ordem pela qual os extensómetros do CFRP foram solicitados foi Ext.3, Ext.2 e Ext.4. Esta ordem permite ter a percepção do aparecimento das fendas diagonais de corte junto ao laminado instrumentado.

Das extensões registadas no estribo de aço o valor máximo verificado foi de 15028  $\mu\text{m/m}$  e ocorreu no extensómetro 3 (Ext.3) para uma carga de 339 kN, ou seja, para uma carga inferior à capacidade máxima da viga (374 kN). A análise dos dados da Tabela 16 e da Figura 78 permite constatar que a secção onde foi colado o extensómetro com a maior extensão registada é atravessada pela fenda de corte que provocou a rotura da viga. Na secção correspondente ao extensómetro 2 a máxima extensão lida foi de 12195  $\mu\text{m/m}$ , para uma carga de 316 kN. Assim, quer para o extensómetro 3 como para o extensómetro 2, a máxima extensão foi alcançada para níveis de carregamento inferior à capacidade máxima resistente da viga. Este facto está traduzido na inversão do sentido da resposta carga vs extensão nos referidos extensómetros (Figura 78) e pode estar associado a um deslizamento do estribo de aço na zona onde foram colados os referidos extensómetros. Nas curvas de comportamento representadas na Figura 78 pode-se verificar a cedência da armadura do aço do estribo instrumentado para uma extensão de cerca de 4000  $\mu\text{m/m}$ .

Tabela 16 – Resultados da extensometria instalada na viga 2S-3LI60.

| Viga<br>2S-3LI60 | Descrição   |  |        |        |        |        |        |        |
|------------------|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                  | Reforço ao corte com CFRP constituído por três laminados inclinados a 60° em cada face da viga.<br>A carga máxima atingida foi de $F_{max} = 374$ kN. |   |        |        |        |        |        |        |
| Laminado de CFRP |    | Ext. ( $\mu\text{m/m}$ )  | 200 kN | 250 kN | 300 kN | 350 kN | 372 kN | 374 kN |
|                  |   | 1 (*)   | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
|                  |   | 2   | 3222   | 5741   | 7794   | 10039  | 11107  | 11079  |
|                  |   | 3   | 1287   | 2017   | 4746   | 8004   | 9720   | 9747   |
|                  |   | 4   | 141    | 282    | 582    | 1343   | 2160   | 2282   |
| Estribo de aço   |    | Ext. ( $\mu\text{m/m}$ )  | 200 kN | 250 kN | 300 kN | 350 kN | 370 kN | 374 kN |
|                  |   | 1   | 569    | 1430   | 1861   | 1981   | 2045   | 2054   |
|                  |   | 2   | 1926   | 3411   | 9206   | 4621   | 3824   | 3778   |
|                  |   | 3   | 1339   | 2347   | 6107   | 11553  | 8051   | 7537   |

Nota: Na identificação da localização dos extensómetros colados no estribo a seta que aponta para a esquerda indica que o extensómetro está do lado oposto ao representado na fotografia. (\*) O extensómetro não funcionou.

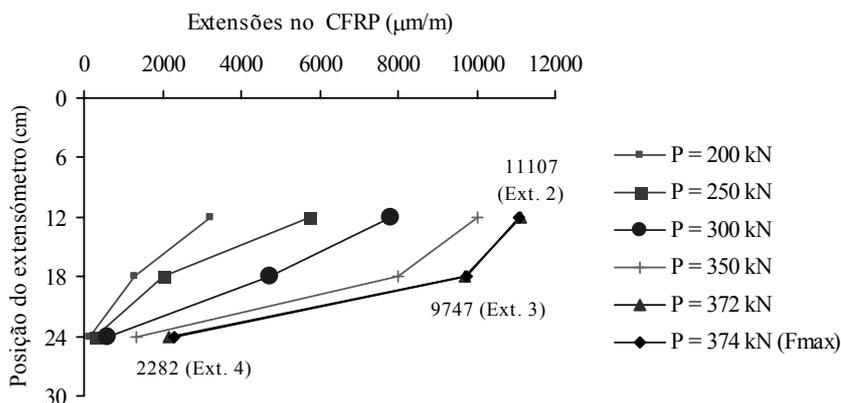


Figura 76 – Extensões no laminado de CFRP para vários níveis de carga (viga 2S-3LI60).

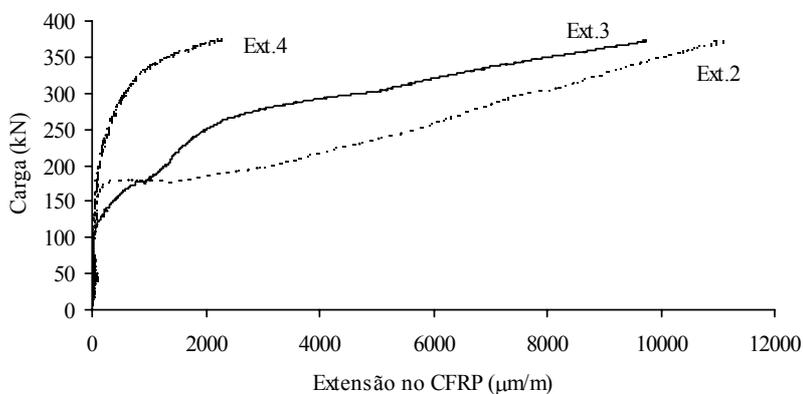


Figura 77 – Extensões no laminado instrumentado até à carga máxima (viga 2S-3LI60).

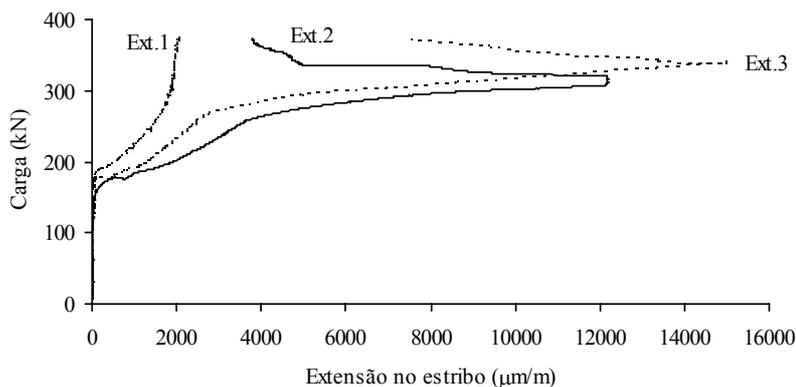
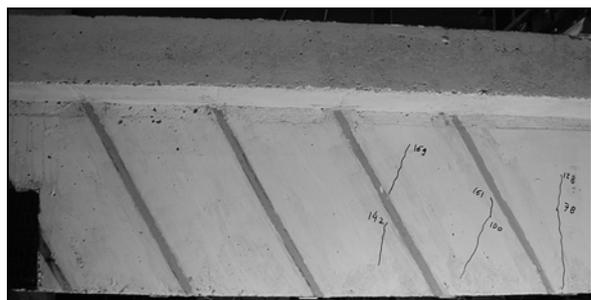


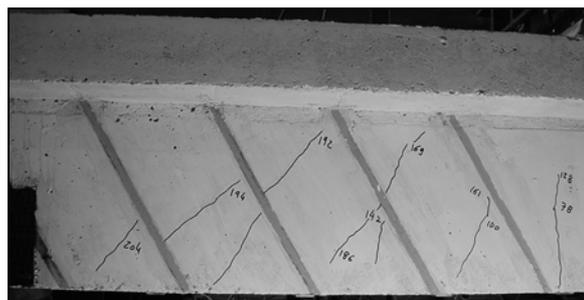
Figura 78 – Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima (viga 2S-3LI60).

### 3.3.2.8 - Viga reforçada com cinco laminados a 60° em cada face do menor vão de corte (2S-5LI60)

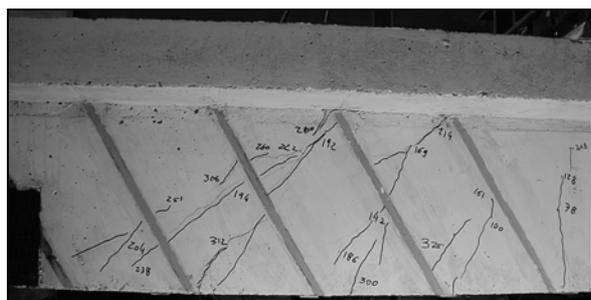
A sequência do ensaio da viga 2S-5LI60, no vão de corte onde ocorreu a sua rotura, está ilustrada nas fotografias da Figura 79.



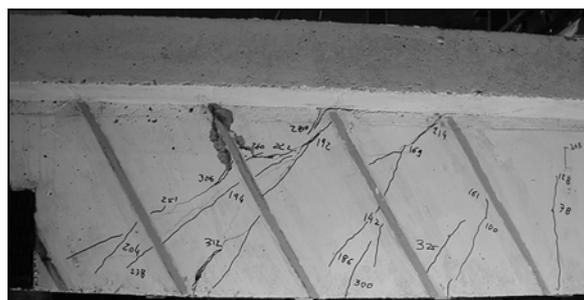
a) Primeiras fendas de flexão



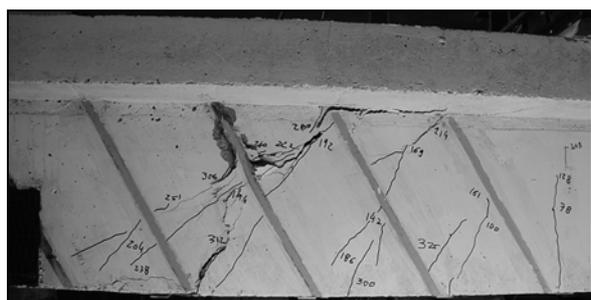
b) Aparecimento de fendas de corte



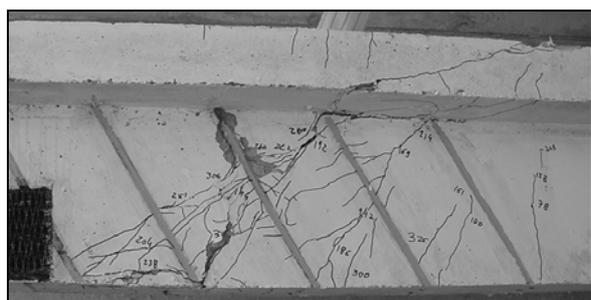
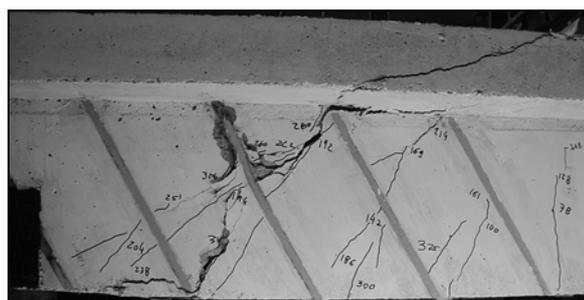
c) Previamente ao "pull-out" do laminado central com o desenvolvimento das fendas diagonais de corte



d) "Pull-out" do laminado central



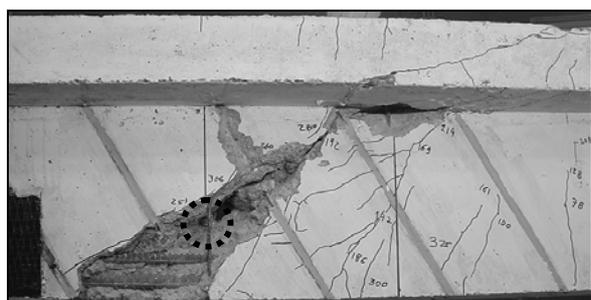
e) Registos efectuados pós carga máxima: desenvolvimento do "pull-out" do laminado central e rotura dos estribos



f) Após a marcação das fendas (pós ensaio)



g) Após a marcação das fendas (pós ensaio): face oposta



h) Identificação dos estribos e análise pormenorizada da zona da fenda de rotura de corte (ambas as faces)

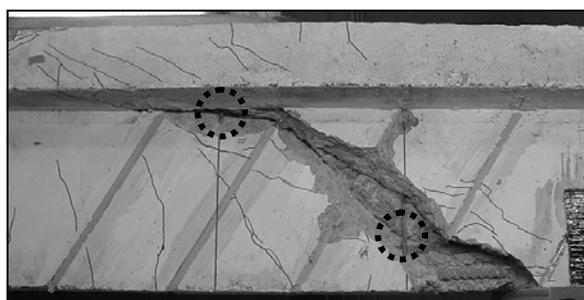


Figura 79 – Sequência do ensaio da viga com cinco laminados inclinados a 60° em cada face (viga 2S-5LI60).

Após o aparecimento das primeiras fendas de flexão, nas imediações da secção de aplicação da carga, surgiram as fendas diagonais de corte. O prolongamento destas fendas até à face inferior da alma da viga e até à zona da ligação alma/banzo (e sua abertura) foi acompanhado pelo aparecimento, na sua proximidade, de mais fendas de corte. As fendas de corte ao atingirem a ligação alma/banzo mudaram de direcção, tornando-se horizontais, e progrediram no sentido do local onde a carga estava a ser aplicada. Com o desenvolvimento do carregamento e devido ao número e abertura das fendas de corte que o atravessam, o laminado central acabou por ser o mais solicitado, acabando por ceder por “pull-out” no lado da viga oposto ao que se fez o registo fotográfico do ensaio. No entanto, a capacidade de carga da viga voltou a aumentar (ver Figura 80) até ao momento em que se registou o “pull-out” do laminado central representado na Figura 79-d). O esgotamento da aderência do laminado central ao betão ocorreu nas proximidades da zona da ligação alma/banzo, ou seja, onde o comprimento de aderência do laminado era menor, conforme se pode verificar na Figura 79-d). O valor médio do comprimento efectivo de aderência ( $l_b$ ) dos dois laminados centrais (ambas as faces) foi de 13 cm. Posteriormente ao “pull-out” dos laminados centrais, os dois estribos atravessados pela fenda de rotura por corte acabaram por rebentar, o que permitiu à fenda de rotura de corte alcançar o ponto de carga conforme representado na Figura 79-e).

A Figura 79-f) e a Figura 79-g) ilustram, em ambas as faces da viga, o padrão de fendilhação no menor dos vãos de corte, onde ocorreu a rotura da viga, e que foi registado após o ensaio. Na Figura 79-h) apresenta-se a pormenorização da rotura por corte, em ambas as faces da viga, com a identificação dos estribos (as duas rectas verticais correspondem a dois estribos) e a localização das secções onde estes rebentaram. A análise da zona de rotura da viga, após a remoção do reforço, permite verificar a existência de uma fenda de corte que se destacou das restantes, e à qual esteve associada a rotura da viga. Esta fenda acabou apenas por ser intersectada por dois laminados, concretamente o terceiro e quarto laminado contados a partir da secção de aplicação da carga.

Na Figura 80 apresentam-se as curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga referentes à viga reforçada ao esforço transversal, em cada uma das faces do menor vão de corte, com cinco laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a  $60^\circ$  (viga 2S-5LI60) e à mesma viga mas sem reforço de CFRP (viga 2S-R). Na mesma figura está representada a relação  $\Delta$ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga.

A Figura 80 permite concluir que, em qualquer instante do carregamento, a viga reforçada apresenta uma capacidade de carga superior à da viga não reforçada. A maior rigidez inicial da viga reforçada pode estar associada ao facto de apresentar dimensões da secção transversal ligeiramente superiores à da viga não reforçada. Apesar disto, na Figura 80 é notório que o efeito do CFRP foi determinante a partir do momento em que se formaram fendas diagonais de corte. O incremento

muito acentuado, quase vertical, na variação de  $\Delta$ Carga localiza-se na fase referente à formação da fenda diagonal na viga 2S-R, assinalada na Figura 80, e que provocou uma momentânea quebra no aumento da capacidade resistente da viga. O valor de  $\Delta$ Carga foi aumentando com o carregamento até ao momento em que a viga reforçada alcançou a sua capacidade máxima, registando-se aí um valor de  $\Delta$ Carga de 77 kN.

De uma forma genérica pode-se referir que a solução de reforço em análise permitiu um aumento geral de rigidez, sendo mais acentuado a partir do instante em que se formaram as fendas diagonais de corte. Ao mesmo tempo garantiu um ganho de capacidade de carga na rotura (o reforço permitiu que a capacidade máxima de carga subisse dos 315 kN para os 392 kN). Em termos de flecha na secção de aplicação da carga, para a qual se verificou a capacidade resistente máxima das vigas, constatou-se que o reforço não proporcionou alterações ao valor atingido pela viga não reforçada.

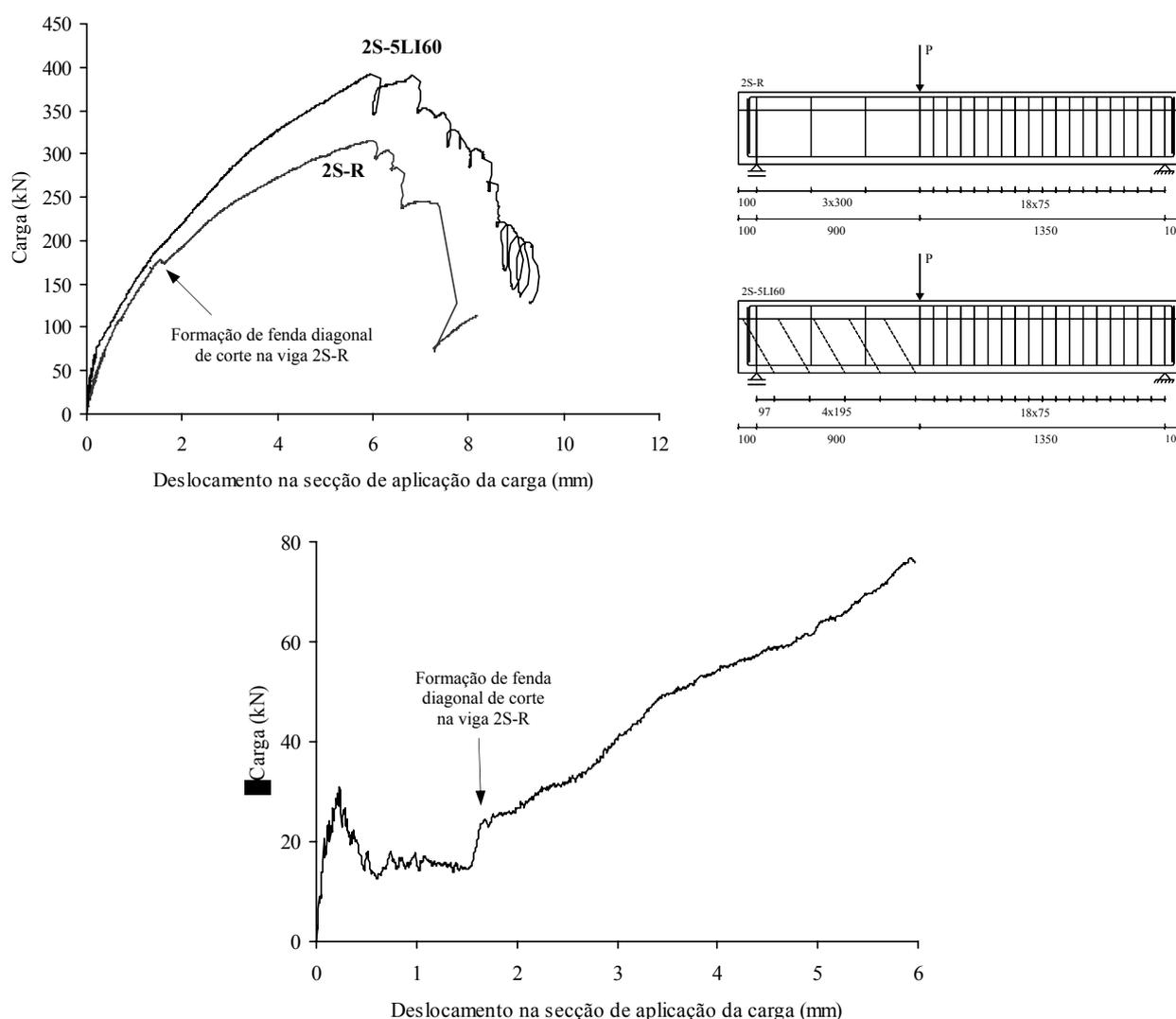


Figura 80 – Efeito do reforço com cinco laminados de CFRP inclinados a 60° em cada uma das faces da viga.

Na Tabela 17 apresentam-se os principais dados para a interpretação dos resultados obtidos em termos de extensões no laminado de CFRP e no estribo de aço referentes à viga 2S-5LI60. Na mesma tabela, para as secções onde foram colados os extensómetros (laminado de CFRP e estribo de aço) apresentam-se os valores das respectivas extensões obtidos em vários níveis de carregamento. As extensões registadas no laminado de CFRP instrumentado estão ilustradas nos gráficos das Figuras 81 e 82. A primeira refere-se aos valores registados em três extensómetros (Ext.1, Ext.2 e Ext.3) em vários níveis de carga e a segunda refere-se à resposta carga *vs* extensão lida nos extensómetros anteriormente referidos. O mesmo tipo de resposta aparece ilustrada na Figura 83, mas em termos de extensões registadas na secção do estribo de aço onde foram colados os extensómetros 1 (Ext.1), 2 (Ext.2) e 3 (Ext.3). Refira-se que o extensómetro 2 apenas funcionou até um carregamento correspondente a 275 kN.

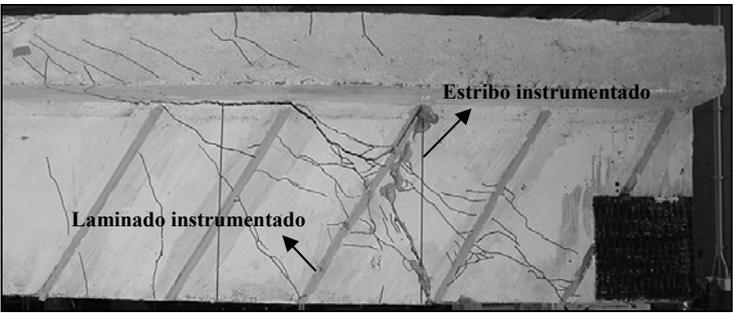
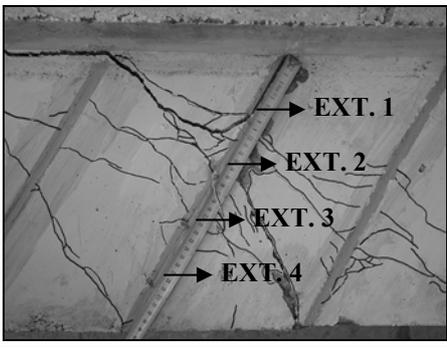
O valor máximo registado da extensão no laminado de CFRP instrumentado foi de 8962  $\mu\text{m/m}$  e ocorreu no extensómetro 2 (Ext.2) para uma carga de 390 kN, ou seja, para uma carga muito próxima da máxima suportada pela viga (392 kN). Para o mesmo nível de carregamento ocorreram as máximas extensões nos extensómetros 1 (7749  $\mu\text{m/m}$ ) e 3 (8461  $\mu\text{m/m}$ ). O maior valor obtido no extensómetro 2 está relacionado com o facto da respectiva secção ter sido atravessada pela fenda diagonal de corte com a maior abertura. A Figura 81 ilustra as diferenças existentes nas extensões registadas nos vários extensómetros colados no CFRP, onde, além do que já se referiu anteriormente, é possível verificar que para cargas inferiores a 300 kN o extensómetro mais solicitado foi o Ext.3 e, que para a carga de cerca dos 350 kN, as extensões nos três extensómetros foram muito similares.

A análise das Figuras 82 e 83 permite constatar que o laminado de CFRP e o estribo de aço não foram mobilizados numa fase inicial do carregamento. Com efeito, apenas começaram a ser solicitados para um carregamento que originou a formação de fendas diagonais de corte. Na Figura 82 pode-se constatar que a ordem pela qual os extensómetros do CFRP foram solicitados foi Ext. 3, Ext. 1 e Ext. 2. Esta ordem permite ter a percepção do aparecimento das fendas diagonais de corte junto ao laminado instrumentado.

O valor máximo registado da extensão no estribo de aço instrumentado foi de 13616  $\mu\text{m/m}$  e ocorreu no extensómetro 3 para a carga de 324 kN, ou seja, para uma carga inferior à carga máxima que a viga suportou (392 kN). O extensómetro 3, em plena carga máxima, registou uma extensão de 8867  $\mu\text{m/m}$ . Este facto, que está traduzido numa inversão do desenvolvimento da curva carga *vs* extensão na secção do estribo de aço correspondente ao extensómetro 3 (Figura 83), pode estar associado a um escorregamento do estribo. A extensão máxima registada no extensómetro 3 foi de 4172  $\mu\text{m/m}$  e foi atingida para a carga máxima da viga. A análise da Figura 83 permite constatar o

facto de ter ocorrido a cedência do aço do estribo instrumentado (extensómetro 3) para uma extensão, aproximadamente, de 4000  $\mu\text{m/m}$ .

Tabela 17 – Resultados da extensometria instalada na viga 2S-5LI60.

| Viga 2S-5LI60    | Descrição  |  |                          |        |        |        |        |        |
|------------------|--|--|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                  | Reforço ao corte com CFRP constituído por 5 laminados inclinados a 60° em cada face da viga.<br>A carga máxima atingida foi de $F_{max} = 392$ kN. |  | Ext. ( $\mu\text{m/m}$ ) | 200 kN | 250 kN | 300 kN | 350 kN | 390 kN |
| Laminado de CFRP |    | 1  | 593                      | 2756   | 4910   | 6544   | 7749   | 7411   |
|                  |  | 2  | 374                      | 539    | 1433   | 7283   | 8962   | 8871   |
|                  |  | 3  | 1853                     | 3441   | 5248   | 6900   | 8461   | 8360   |
|                  |  | 4 (*)  | -                        | -      | -      | -      | -      | -      |
|                  |  | Ext. ( $\mu\text{m/m}$ )   | 200 kN                   | 250 kN | 300 kN | 350 kN | 390 kN | 392 kN |
| Estribo de aço   |   | 1  | 440                      | 1623   | 2705   | 3384   | 4117   | 4172   |
|                  |  | 2 (**)   | 752                      | 1751   | -      | -      | -      | -      |
|                  |  | 3  | 1412                     | 2962   | 11782  | 10279  | 8977   | 8867   |
|                  |  | Ext. ( $\mu\text{m/m}$ )   | 200 kN                   | 250 kN | 300 kN | 350 kN | 390 kN | 392 kN |

Nota: Na identificação da localização dos extensómetros colados no estribo a seta que aponta para a esquerda indica que o extensómetro está do lado oposto ao representado na fotografia. (\*) O extensómetro não funcionou. (\*\*) Problemas de funcionamento do extensómetro a partir do carregamento correspondente a uma carga de 275 kN.

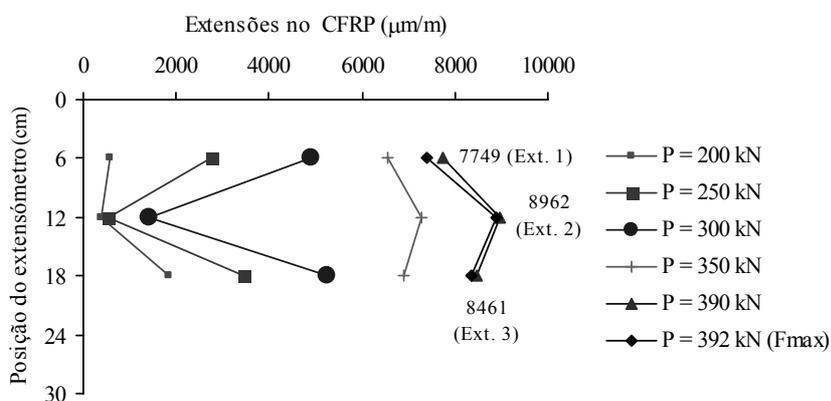


Figura 81 – Extensões no laminado de CFRP para vários níveis de carga (viga 2S-5LI60).

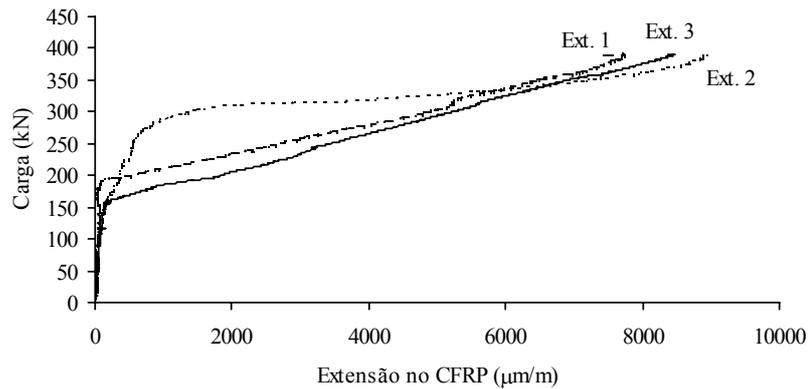


Figura 82 – Extensões no laminado instrumentado até à carga máxima (viga 2S-5LI60).

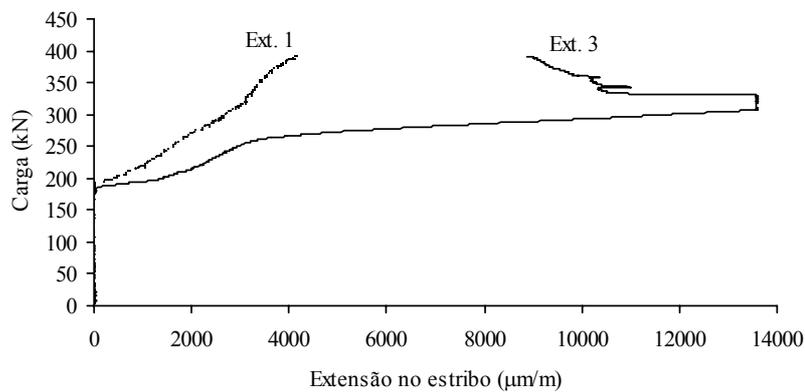


Figura 83 – Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima (viga 2S-5LI60).

### 3.3.2.9 - Viga reforçada com sete laminados a 60° em cada face do menor vão de corte (2S-7LI60)

A sequência do ensaio da viga 2S-7LI60, no vão de corte onde ocorreu a sua rotura, está ilustrada nas fotografias da Figura 84. As primeiras fendas que surgiram foram de flexão e, posteriormente, apareceram as fendas diagonais de corte. Com o aumento do carregamento novas fendas de corte foram surgindo e, as já existentes, prolongaram-se para a face inferior da alma da viga e para a zona da ligação alma/banzo. Chegadas a esta zona as fendas diagonais tornaram-se horizontais e direccionaram-se para a posição onde a carga estava a ser aplicada. Todos os laminados foram atravessados por fendas diagonais de corte que se formaram ao longo de todo o vão de corte (ver Figura 84-c).

A capacidade máxima de carga da viga 2S-7LI60 foi atingida quando se deu o início do “spalling” (destacamento) da parede, constituída pelo betão de recobrimento e pelos laminados de CFRP inseridos, nas imediações da parte superior do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga. O início do “spalling” ocorreu quando se formou uma fenda contínua horizontal na zona de ligação alma/banzo, entre o primeiro e o terceiro laminado a contar a partir da secção de aplicação da carga (Figura 84-d). Na Figura 84-f é possível ver o “spalling” da parede “betão de recobrimento + CFRP” à esquerda da zona onde o fenómeno teve início. Posteriormente, o estribo

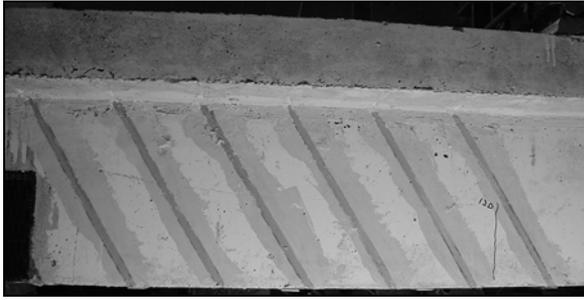
mais próximo da secção de aplicação da carga acabou por atingir a rotura e a fenda de rotura de corte alcançou a secção de aplicação da carga (Figura 84-e).

A Figura 84-g) e a Figura 84-h) ilustram, em ambas as faces da viga, o padrão de fendilhação no menor dos vãos de corte, onde ocorreu a rotura da viga, e que foi registado após o ensaio. Na Figura 84-i) apresenta-se a pormenorização da rotura por corte, em ambas as faces da viga, com a identificação dos estribos (as duas rectas verticais correspondem a dois estribos) e a localização das secções onde estes rebentaram. A análise da zona de rotura da viga, após a remoção de reforço, permite verificar a ocorrência de várias fendas de corte, apresentando-se o betão bastante danificado.

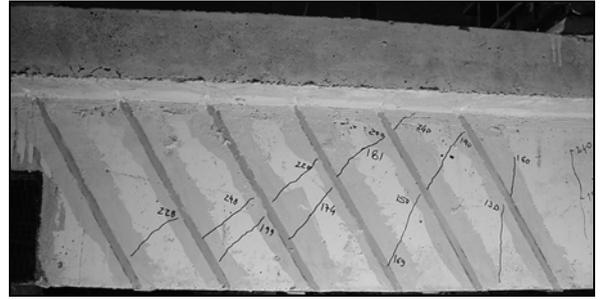
Na Figura 85 apresentam-se as curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga referentes à viga reforçada ao esforço transversal, em cada uma das faces do menor vão de corte, com sete laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 60° (viga 2S-7LI60) e à mesma viga mas sem reforço de CFRP (viga 2S-R). Na mesma figura está representada a relação  $\Delta$ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga.

A Figura 85 permite concluir que o reforço de CFRP não contribuiu para a capacidade de carga da viga na fase inicial do carregamento. O efeito do CFRP só foi notório a partir do momento em que se formaram fendas diagonais de corte. O incremento muito acentuado, quase vertical, na variação de  $\Delta$ Carga localiza-se na fase referente à formação da fenda diagonal na viga 2S-R, assinalada na Figura 85, e que provocou uma momentânea quebra no aumento da capacidade resistente da viga. O contributo do CFRP ( $\Delta$ Carga) foi aumentando progressivamente até praticamente ao momento em que a viga alcançou a sua capacidade máxima. As excepções existentes correspondem à formação de fendas de corte numa das duas vigas em análise, como é o exemplo do caso representado na Figura 85 (formação de uma fenda de corte na viga com CFRP para uma carga de cerca de 300 kN). O máximo valor de  $\Delta$ Carga foi de 98.5 kN e foi registado para uma flecha na secção de aplicação da carga de 5.08 mm, onde a carga na viga reforçada era de 397.5 kN e na viga sem reforço era de 299 kN. O facto da capacidade máxima de carga da viga reforçada ter sido atingida para uma flecha na secção de aplicação da carga (5.86 mm) inferior à da viga não reforçada (5.97 mm) está na origem dos valores decrescentes da parte final da resposta  $\Delta$ Carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga.

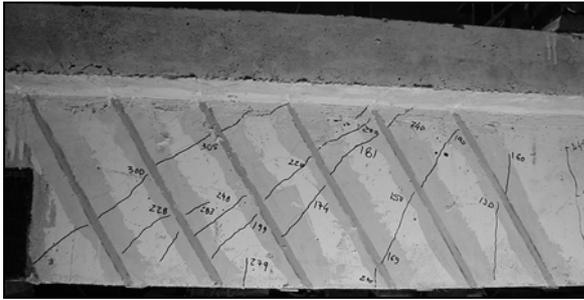
De uma forma genérica pode-se referir que a solução de reforço em análise permitiu um aumento de rigidez, a partir do instante em que se formaram as fendas diagonais de corte, e que trouxe benefícios em termos de ganho de capacidade de carga na rotura (o reforço permitiu que a capacidade máxima de carga subisse dos 315 kN para os 406 kN). Em termos de flecha na secção de aplicação da carga, para a qual se verificou a capacidade resistente máxima das vigas, constatou-se que a da viga com reforço 2S-7LI60 (5.86 mm) foi ligeiramente inferior à obtida na viga sem reforço 2S-R (5.97 mm).



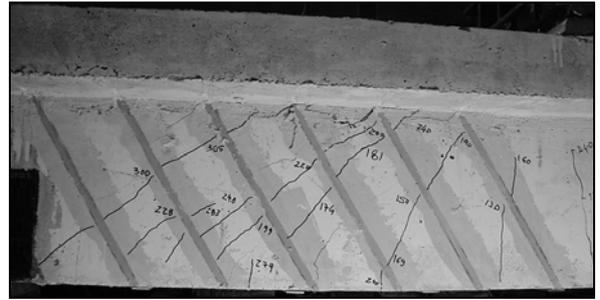
a) Primeira fenda de flexão



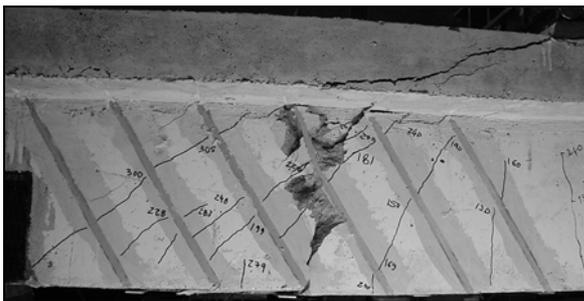
b) Aparecimento de fendas de corte



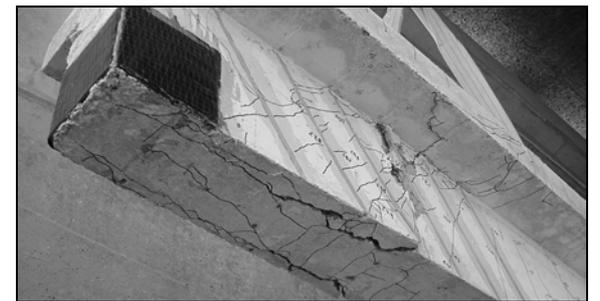
c) Previamente ao momento de se ter atingido a carga máxima



d) Início do "spalling" com a formação de fenda horizontal contínua entre o 1º e o 3º laminado



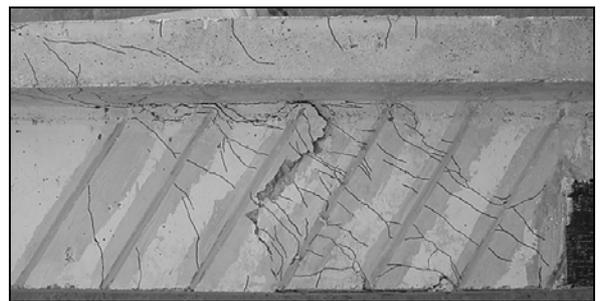
e) Após rotura do estribo junto à secção de aplicação da carga com "spalling" da parede betão de recobrimento + CFRP



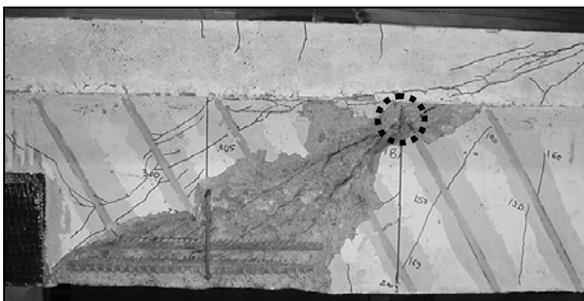
f) Pormenor do "spalling" da parede betão de recobrimento + CFRP



g) Após a marcação das fendas (pós ensaio)



h) Após a marcação das fendas (pós ensaio): face oposta



i) Identificação dos estribos e análise pormenorizada da zona da fenda de rotura de corte (ambas as faces)

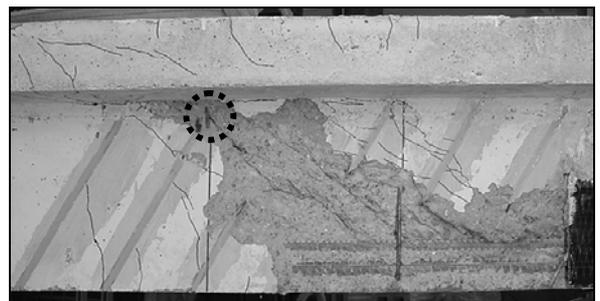


Figura 84 – Sequência do ensaio da viga com cinco laminados de CFRP inclinados a 60° em cada face (viga 2S-7LI60).

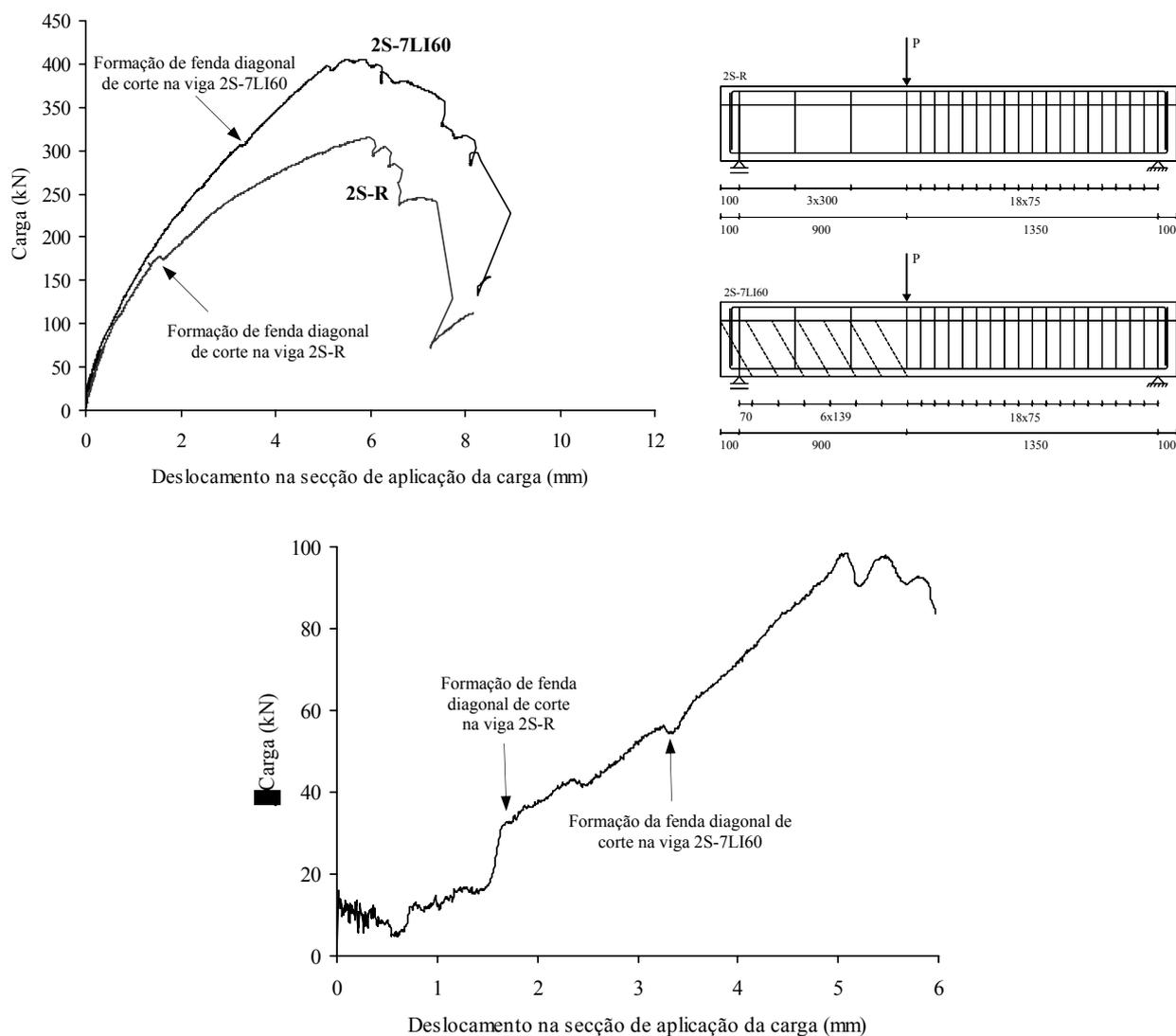
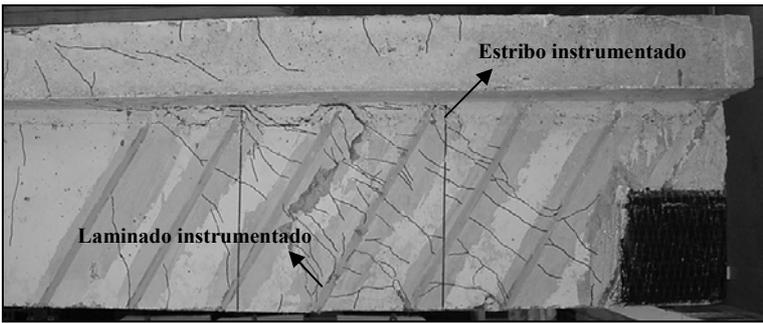
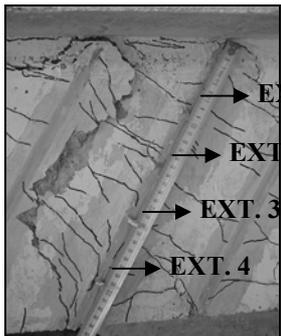


Figura 85 – Efeito do reforço com sete laminados de CFRP inclinados a  $60^\circ$  em cada uma das faces da viga.

Na Tabela 18 apresentam-se os principais dados para a interpretação dos resultados obtidos em termos de extensões no laminado de CFRP e no estribo de aço referentes à viga 2S-7LI60. Na mesma tabela, para as secções onde foram colados os extensómetros (laminado de CFRP e estribo de aço) apresentam-se os valores das respectivas extensões obtidos em vários níveis de carregamento. As extensões registadas no laminado de CFRP instrumentado estão ilustradas nos gráficos das Figuras 86 e 87. A primeira refere-se aos valores registados nos quatro extensómetros colados no laminado instrumentado (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4) em vários níveis de carga e a segunda refere-se à resposta carga vs extensão lida nos extensómetros anteriormente referidos. O mesmo tipo de resposta aparece ilustrada na Figura 88, mas em termos de extensões registadas na secção do estribo de aço onde foram colados os extensómetros 1 (Ext.1) e 2 (Ext.2).

Tabela 18 – Resultados da extensometria instalada na viga 2S-7LI60.

| Viga 2S-7LI60    | Descrição   |  |        |        |        |        |        |        |
|------------------|---|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                  | Reforço ao corte com CFRP constituído por sete laminados inclinados a 60° em cada face da viga.<br>A carga máxima atingida foi de $F_{max} = 406$ kN. |  |        |        |        |        |        |        |
| Laminado de CFRP |    | Ext. ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )  | 200 kN | 250 kN | 300 kN | 350 kN | 403 kN | 406 kN |
|                  |   | 1  | 101    | 165    | 238    | 4722   | 6685   | 4695   |
|                  |   | 2  | 223    | 2081   | 4353   | 5339   | 8579   | 8716   |
|                  |   | 3  | 1524   | 2994   | 4134   | 4764   | 6927   | 7311   |
|                  |   | 4  | 301    | 548    | 995    | 1862   | 3988   | 4591   |
| Estribo de aço   |   | Ext. ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )  | 200 kN | 250 kN | 300 kN | 350 kN | 403 kN | 406 kN |
|                  |   | 1  | 28     | 266    | 770    | 2567   | 10572  | 13671  |
|                  |   | 2  | 293    | 1229   | 1962   | 2375   | 5960   | 9023   |
|                  |   | 3 (*)  | -      | -      | -      | -      | -      | -      |

Nota: Na identificação da localização dos extensómetros colados no estribo a seta que aponta para a esquerda indica que o extensómetro está do lado oposto ao representado na fotografia. (\*) O extensómetro não funcionou.

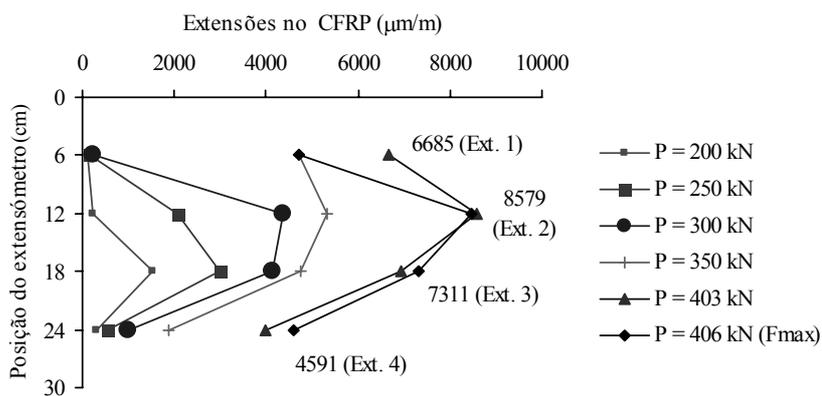


Figura 86 – Extensões no laminado de CFRP para vários níveis de carga (viga 2S-7LI60).

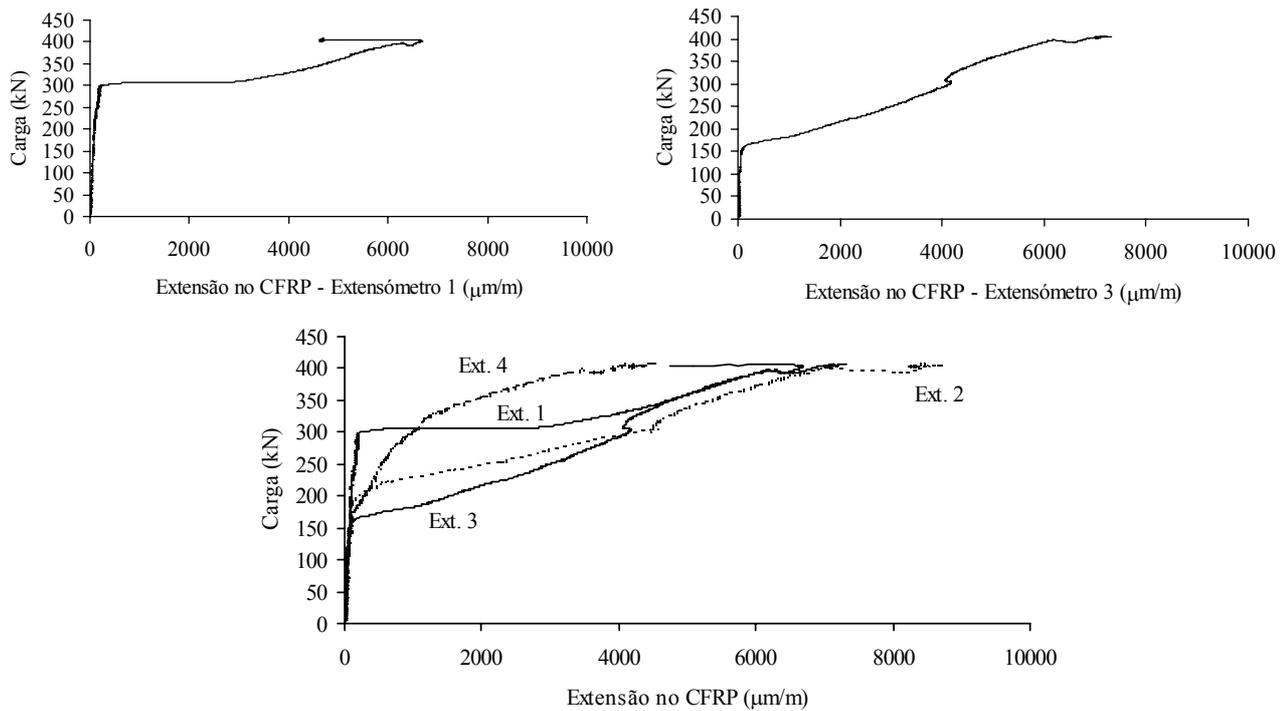


Figura 87 – Extensões no laminado instrumentado até à carga máxima (viga 2S-7LI60).

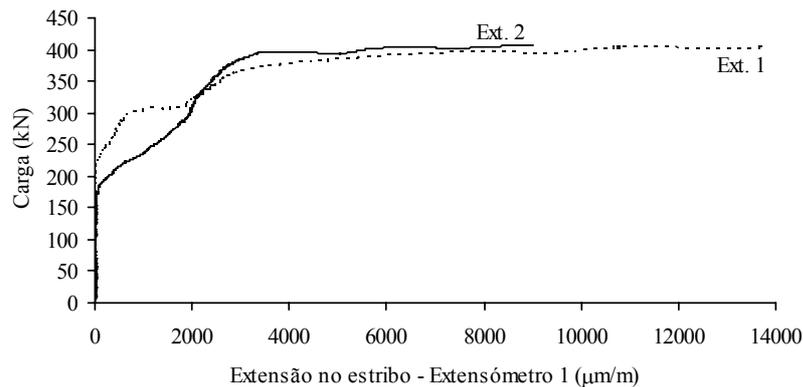


Figura 88 – Extensões no estribo instrumentado até à carga máxima (viga 2S-7LI60).

O valor máximo registado da extensão no laminado instrumentado foi de 8716 µm/m e ocorreu no extensómetro 2 (Ext.2) para a carga máxima suportada pela viga (406 kN). Para este nível de carga ocorreram as máximas extensões nos extensómetros 3 (7311 µm/m) e 4 (4591 µm/m). O valor máximo da extensão lida no extensómetro 1 foi de 6685 µm/m e ocorreu para uma carga de 403 kN, próxima da máxima carga suportada pela viga. A Figura 86 ilustra as diferenças existentes, algumas delas anteriormente referidas, nas extensões registadas nos vários extensómetros colados no CFRP. Verifica-se que para cargas inferiores a 250 kN o extensómetro mais solicitado foi o Ext.3. Após o referido nível de carga o extensómetro mais tensionado passou a ser o 2. Para uma carga de 350 kN as extensões nos extensómetros 1, 2 e 3 foram muito similares. Refira-se que entre os 300 kN e os 350 kN a extensão no Ext. 1 aumentou muito, dos 238 µm/m para os 4722 µm/m, o que indicia a formação de uma fenda diagonal de corte na zona do extensómetro 1.

A análise das Figuras 87 e 88 permite constatar que o laminado de CFRP e o estribo de aço não foram mobilizados numa fase inicial do carregamento. Com efeito, apenas começaram a ser solicitados para um carregamento que originou a formação de fendas diagonais de corte. Da análise da Figura 87 pode-se constatar que a ordem pela qual os extensómetros do CFRP foram solicitados foi Ext.3, Ext.4, Ext.2 e Ext.1. Esta ordem permite ter a percepção do aparecimento das fendas diagonais de corte junto ao laminado instrumentado. Primeiro as fendas surgiram na parte inferior da alma da viga e, posteriormente, é que surgiram na parte superior da referida alma da viga.

O valor máximo registado da extensão no estribo de aço instrumentado foi de 13671  $\mu\text{m/m}$  e ocorreu no extensómetro 1 para a carga máxima que a viga suportou (406 kN). A extensão máxima registada no extensómetro 3 foi de 9023  $\mu\text{m/m}$  e ocorreu, também, para a carga máxima. A análise da Figura 88 permite constatar o facto de ter ocorrido a cedência do aço do estribo instrumentado.

### 3.4 - Comportamento dos sistemas de reforço ao corte utilizados

Na secção anterior foram apresentados, para todos os modelos reforçados ao corte com CFRP, os principais resultados registados em termos de extensões no laminado e no estribo de aço, que foram objecto de instrumentação com extensómetros eléctricos de acordo com o critério descrito na secção 2.4. Nesta secção será feita a compilação dos resultados que permitirá fazer uma análise comparativa do desempenho/rendimento das várias configurações de reforço ao corte testadas.

Na Tabela 19 apresentam-se, para cada uma das vigas reforçadas ao corte com CFRP, os valores da carga máxima regista e respectivo acréscimo de carga proporcionado pelo reforço de CFRP, assim como, as extensões registadas, para o nível máximo de carga, nos quatro extensómetros que foram colados no CFRP instrumentado ( $\varepsilon_{CFRP}^{ext.1}$ ,  $\varepsilon_{CFRP}^{ext.2}$ ,  $\varepsilon_{CFRP}^{ext.3}$  e  $\varepsilon_{CFRP}^{ext.4}$ ). Para os casos em que a máxima extensão no CFRP não correspondeu à carga máxima da viga, na Tabela 19 são apresentados, entre parêntesis, os valores das extensões nos referidos quatro extensómetros correspondentes à carga para a qual se registou a extensão máxima no CFRP. Na mesma tabela são apresentados, para cada solução de reforço testada, o valor médio das extensões referidas anteriormente,  $\varepsilon_{CFRP}^{med}$  (média das extensões nos vários extensómetros para a situação da carga máxima ou, entre parêntesis, média das extensões nos vários extensómetros para a situação da carga que conduziu à máxima extensão no CFRP), e o rendimento médio do CFRP. Este foi definido como sendo a percentagem da extensão última do CFRP ( $\varepsilon_{fu} = 17.7\%$  - ver Tabela 7) que foi mobilizada, ou seja, corresponde ao valor da relação  $\varepsilon_{CFRP}^{med} / \varepsilon_{fu}$  em percentagem. Na Figura 89 encontra-se representado o rendimento médio do reforço de CFRP para as nove soluções de reforço testadas.