



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joaquim Rodrigues Monteiro da Silva

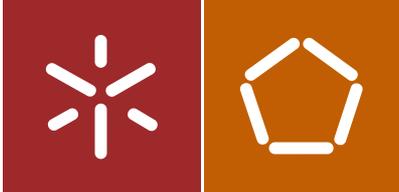
Reforço à flexão e ao corte de vigas de betão
armado com uma solução híbrida de CFRP

Reforço à flexão e ao corte de vigas de betão
armado com uma solução híbrida de CFRP

Joaquim Rodrigues Monteiro da Silva

UMinho | 2017

outubro de 2017



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joaquim Rodrigues Monteiro da Silva

Reforço à flexão e ao corte de vigas de betão
armado com uma solução híbrida de CFRP

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Salvador José Esteves Dias

“Escolhe um trabalho de que gostes, e não terás que trabalhar nem um dia na tua vida.”

Confúcio

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho foi o fim de mais uma etapa de relevo, deste modo, queria expressar a minha gratidão e reconhecimento às pessoas e entidades que contribuíram positivamente para a sua concretização.

Ao Professor Salvador Dias, orientador científico deste trabalho, queria expressar a minha gratidão pela disponibilidade, pela opinião crítica, pelo apoio prestado, pela paciência e por todos os ensinamentos partilhados ao longo desta caminhada, a quem estarei sempre grato.

Ao Professor Joaquim Barros, manifesto o meu agradecimento pela disponibilidade, pelo apoio, pelos conselhos, e ensinamentos prestados.

A todos os técnicos do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, quero deixar o meu reconhecimento, pelo apoio na execução das várias tarefas e dos trabalhos experimentais, em especial ao Sr. António Matos, pela transmissão dos conhecimentos técnicos necessários, pela disponibilidade apresentada e pelos seus conselhos sempre pertinentes.

Aos companheiros, que sempre me acompanharam durante todo o percurso académico, quero expressar a minha gratidão, pelo apoio, pela amizade e pela disponibilidade prestada. Em particular aos Engenheiros Carlos Araújo, Sérgio Soares, Carlos Cruz, Fábio Cruz, e Néilson Freitas.

Como não poderia deixar de ser, a minha mais profunda gratidão à minha família, que me acompanhou sempre, especialmente às minhas filhas Matilde e Francisca, à minha mãe e ao meu pai, que infelizmente que já não se encontra entre nós.

À Carla, minha companheira, queria expressar o meu agradecimento muito especial, porque sempre me incentivou, apoiou e fez questão de marcar presença, principalmente nas alturas de maior dificuldade, manifestando o seu apoio imprescindível para a realização deste trabalho.

À minha afilhada Celine, agradeço pelo apoio e pela confiança que sempre depositou em mim. Espero continuar a ser um orgulho para ti.

Ao Tenente-Coronel do Exército Português Miguel André Chaves de Beir, queria deixar o meu mais sincero agradecimento, por ter sido o grande impulsionador e dinamizador deste projeto, sem o qual não seria possível a sua realização.

Agradeço também a contribuição das seguintes empresas: à Casais pelo apoio prestado na construção das vigas de betão armado e à S&P - Clever Reinforcement pelo fornecimento do laminado CFK, das mantas C-Sheet 240, do adesivo S&P Resin 220 e do adesivo S&P Resin 55.

RESUMO

Esta dissertação resulta de uma investigação realizada sobre o reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado usando uma solução híbrida com CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono): reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM); reforço ao corte com faixas discretas de manta CFRP coladas externamente em forma de U (técnica EBR). Em termos de reforço ao corte foi avaliado o desempenho de uma técnica de ancoragem das extremidades das faixas discretas de manta de CFRP.

Este trabalho de investigação inicia-se com a apresentação da revisão bibliográfica efetuada sobre o estado do conhecimento atual relativo à utilização de materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado, com especial enfoque para o reforço à flexão e ao corte de vigas de betão armado. Numa fase seguinte é apresentado o programa experimental realizado, que foi concebido por forma a apurar a executabilidade e o desempenho de uma solução híbrida de reforço de CFRP para vigas de betão armado que consiste no reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos e no reforço ao corte com faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente em forma de U, reforço este complementado com um sistema que permite a ancoragem das faixas de manta de CFRP nas suas extremidades. Os resultados obtidos são posteriormente analisados tendo em conta o acréscimo de capacidade de carga proporcionado pelo reforço de CFRP, o modo de rotura das vigas e o nível de mobilização do reforço de CFRP. Por fim, são apresentadas as principais conclusões resultantes do estudo e sugeridas algumas perspetivas de desenvolvimentos futuros.

Palavras-chave: Vigas de betão armado; Reforço simultâneo à flexão e ao corte; Laminados de CFRP inseridos; Mantas de CFRP coladas externamente; Comportamento experimental.

ABSTRACT

This dissertation is the result of a research carried out on the simultaneous flexural and shear strengthening of reinforced concrete (RC) beams using a hybrid solution with CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymers): flexural strengthening with CFRP laminates applied according to Near Surface Mounted (NSM) technique; shear strengthening with U-shaped CFRP wet lay-up sheets (discrete strips) applied according to the Externally Bonded Reinforcement (EBR) technique. Regarding shear strengthening, the performance of an anchoring technique of the CFRP wet lay-up sheets extremities was evaluated.

This research starts with the presentation of a literature review on the current state of knowledge about the use of CFRP composite materials in the strengthening of RC structures, with a special focus on the flexural and shear strengthening of RC beams. Then, the experimental program carried out in the present dissertation is described. This experimental program was carried out in order to determine the feasibility and performance of a hybrid solution using CFRP for the strengthening of RC beams that consists on the flexural strengthening with NSM CFRP laminates, on the shear strengthening with discrete strips of EBR U-shaped CFRP wet lay-up sheets, complemented with an anchorage system of the extremities of the shear strengthening. The results obtained are analysed in terms of the load carrying capacity improvement provided by the CFRP hybrid solution, the failure modes and the efficiency of the CFRP hybrid solution. Finally, the main conclusions of the study and some contribute suggestions for the future developments are presented.

Keywords: Reinforced concrete beams; Simultaneous flexural and shear strengthening; NSM CFRP laminates; EBR CFRP wet lay-up sheets; Experimental behavior.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE GERAL	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Objetivos da dissertação	2
1.3. Organização da dissertação	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Necessidade de reforço de estruturas de betão armado	4
2.2. Técnicas de reforço estrutural convencionais	5
2.3. Materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão	6
2.4. Técnicas de reforço utilizando materiais compósitos de CFRP	10
2.4.1. Técnica de colagem externa com CFRP (técnica EBR)	10
2.4.2. Técnica de inserção do CFRP no betão de recobrimento (técnica NSM)	13
2.4.3. Comparação do grau de eficácia das técnicas EBR e NSM usando compósitos de CFRP	15
2.5. Reforço de vigas de betão armado com compósitos de CFRP	19

2.5.1.	Reforço à flexão de vigas de betão armado	19
2.5.2.	Reforço ao corte de vigas de betão armado	27
2.5.3.	Reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado	33
2.6.	Proposta da solução de reforço à flexão e ao corte de vigas de betão armado com uma solução híbrida de CFRP	50
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	51
3.1.	Conceção dos modelos de vigas de betão armado	51
3.2.	Caracterização dos materiais e definição do comprimento de colagem das mantas relativo à técnica de ancoragem das mantas	56
3.2.1.	Caracterização dos materiais.....	57
3.2.1.1.	Betão	57
3.2.1.2.	Aço.....	59
3.2.1.3.	Laminados de CFRP	60
3.2.1.4.	Mantas de CFRP	60
3.2.1.5.	Adesivo epoxídico.....	61
3.2.1.6.	Resina epoxídica	61
3.2.2.	Definição do comprimento de colagem das mantas relativo à técnica de ancoragem das mantas aplicadas no reforço ao corte das vigas.....	62
3.3.	Aplicação do reforço de CFRP	64
3.3.1.	Vigas reforçadas simultaneamente à flexão e ao corte sem fixação do reforço ao corte.....	64
3.3.1.1.	Preparação das vigas para a execução do reforço à flexão e ao corte.....	64

3.3.1.2. Reforço à flexão.....	66
3.3.1.3. Reforço ao corte.....	66
3.3.2. Vigas reforçadas simultaneamente à flexão e ao corte com fixação do reforço ao corte.....	69
3.4. Sistema de ensaio e instrumentação das vigas	71
3.5. Apresentação e análise dos resultados das vigas da série 1	74
3.5.1. Capacidade de carga das vigas até à rotura	74
3.5.2. Padrão de fendilhação e modos de rotura.....	75
3.5.2.1. Viga de referência - S1REF.....	75
3.5.2.2. Viga reforçada simultaneamente à flexão e ao corte - S1SFS.....	77
3.5.2.3. Viga reforçada simultaneamente à flexão e ao corte com faixas de manta ancoradas no banzo - S1SFS-A.....	79
3.5.3. Extensões nas armaduras e no CFRP	80
3.5.4. Efeito do sistema de fixação das mantas adotado.....	84
3.6. Apresentação e análise dos resultados das vigas da série 2	84
3.6.1. Capacidade de carga das vigas até à rotura	85
3.6.2. Padrão de fendilhação e modos de rotura.....	86
3.6.2.1. Viga de referência - S2REF.....	86
3.6.2.2. Viga reforçada simultaneamente à flexão e ao corte - S2SFS.....	87
3.6.2.3. Viga reforçada simultaneamente à flexão e ao corte com faixas de manta ancoradas no banzo - S2SFS-A.....	88
3.6.3. Extensões nas armaduras e no CFRP	90

3.6.4.	Efeito do sistema de fixação das mantas adotado	93
4.	CONCLUSÕES GERAIS.....	95
4.1	Conclusões gerais	95
4.2	Desenvolvimentos futuros	96
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Técnicas de reforço: a) por encamisamento (Sena Cruz, 2015), b) reforço à flexão com chapas de aço (Rodrigues, 2005), c) cabos de pré-esforço (Costa, 2012).	6
Figura 2 - Constituição dos materiais compósitos de FRP (Machado, 2007).	7
Figura 3 - Relação tensão vs extensão das fibras de aramida, carbono e vidro, do aço A500 e de cordões de pré-esforço (ACI 440R-96, 2002).	7
Figura 4 - Compósitos de CFRP: a) varões (ACI, 2006), b) laminados (S&P, 2016), c) mantas (S&P, 2016),	9
Figura 5 - Técnicas de reforço inovadoras com compósitos de CFRP (adaptado de Sena Cruz <i>et al.</i> , 2011).	10
Figura 6 - Reforço ao corte com CFRP colado externamente (Barros, 2004).	11
Figura 7 - Aplicação de sistemas de reforço de CFRP com a técnica EBR aplicada com um sistema curado "in situ" e com um sistema pré-fabricado (Dias, 2001).	12
Figura 8 - Rotura por destacamento do CFRP colado externamente: a) ao corte (El-Ghandour, 2011), b) à flexão (Coelho <i>et al.</i> , 2012).	13
Figura 9 - Secção dos elementos de CFRP usados no reforço com a técnica NSM (De Lorenzis e Teng, 2007).	14
Figura 10 - Procedimento para aplicação do reforço à flexão de uma viga com laminados de CFRP inseridos (Dias, 2008).	15
Figura 11 - Ancoragem conferida pela técnica EBR e pela técnica NSM (adaptado de Carolin (2003)).	16
Figura 12 - Soluções de reforço de CFRP testadas por Bilotta <i>et al.</i> (2015), dimensões em mm.	16
Figura 13 - Curvas força vs flecha a maior viga para as vigas de referência e reforçadas com CFRP, para os dois tipos de carregamentos testados: a) vigas reforçadas com a técnica EBR, b) vigas reforçadas com a técnica NSM (Bilotta <i>et al.</i> , 2015).	17

Figura 14 - Eficácia do reforço em termos de acréscimo de carga máxima vs percentagem de CFRP (Dias e Barros (2010)).	19
Figura 15 - Alçado das vigas com mecanismo de fixação que foram testadas por Dias et al. (2006).	20
Figura 16 - Detalhes das secções transversais das vigas testadas por Dias et al. (2006).	20
Figura 17 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas ensaiadas por Dias et al. (2006).	22
Figura 18 - Modos de rotura das vigas ensaiadas por Dias et al. (2006).	23
Figura 19 - Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço comuns a todas as vigas ensaiadas por Dias et al. (2012) (dimensões em mm).	24
Figura 20 - Soluções de reforço com CFRP das vigas testadas por Dias et al. (2012) (dimensões em mm).	24
Figura 21 - Relação força vs flecha a meio vão das vigas ensaiadas por Dias et al. (2012).	25
Figura 22 - Modos de rotura ocorridos nas vigas testadas por Dias et al. (2012).	26
Figura 23 - Influência no nível de mobilização do CFRP (Barros e Kotynia, 2008).	27
Figura 24 - Detalhes das vigas ensaiadas por Mofidi e Chaallal (2014): a) alçado, b) secção transversal das vigas sem estribos, c) secção transversal das vigas com estribos.	27
Figura 25 - Relação força vs deslocamento das vigas ensaiadas por Mofidi e Chaallal (2014).	28
Figura 26 - Modos de rotura verificados por Mofidi e Chaallal (2014).	29
Figura 27 - Dados gerais sobre as vigas ensaiadas por Dias (2008) (dimensões em mm).	30
Figura 28 - Comparação do comportamento de uma viga reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos com o de uma viga não reforçada (Dias, 2008).	31

Figura 29 - Efeito da percentagem de armadura transversal (vigas da série D) (Dias, 2008)..	32
Figura 30 - Efeito da percentagem de CFRP: a) três percentagens de reforço com laminados a 60°, b) três percentagens de reforço com laminados a 45° (Dias, 2008).	33
Figura 31 - Vigas ensaiadas: geometria, armaduras ordinárias, reforço à flexão com laminados de CFRP e reforço com manta de CFRP do canto inferior esquerdo (Dias e Barros, 2005)....	34
Figura 32 - Vigas ensaiadas por Dias e Barros (2005): localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado).	34
Figura 33 - Modos de rotura das vigas com maior capacidade de carga máxima (Dias e Barros, 2005).	36
Figura 34 - Representação do reforço à flexão e ao corte, geometria das vigas e condições de carregamento das vigas testadas por Barros et al. (2010) (dimensões em mm).	37
Figura 35 - Relação carga vs flecha das vigas de Série 1 (Barros et al., 2010).	39
Figura 36 - Modos de rotura das vigas ensaiadas: a) VL1, b) VL2, c) VLM2, d) VLM3 (Barros et al., 2010).	39
Figura 37 - Esquema das vigas ensaiadas e condições de apoio (El-Ghandour, 2011).	40
Figura 38 - Secção transversal das vigas ensaiadas por grupos (El-Ghandour, 2011).	40
Figura 39 - Solução de reforço da viga B1F testada por El-Ghandour (2011).	41
Figura 40 - Soluções de reforço das vigas B2S e B3S testadas por El-Ghandour (2011).	41
Figura 41 - Modos de rotura das vigas reforçadas ensaiadas (El-Ghandour, 2011).	42
Figura 42 - Relação carga vs flecha (El-Ghandour, 2011).	42
Figura 43 - Alçado e corte das vigas testadas por Dong et al. (2013).	43
Figura 44 - Configuração do reforço à flexão e ao corte das vigas testadas por Dong et al. (2013).	43
Figura 45 - Curvas carga vs flecha das vigas testadas por Dong <i>et al.</i> (2013).	44

Figura 46 - Modos de rotura nas vigas de referência observados por Dong et al. (2013).	45
Figura 47 - Modos de rotura nas vigas reforçadas observados por Dong et al. (2013).	45
Figura 48 - Esquema de carregamento, secção transversal, longitudinal e armaduras ordinárias das vigas testadas por Salib (2012).	46
Figura 49 - Vigas testadas por Salib (2012).	46
Figura 50 - Relação carga vs flecha a meio vão das vigas testadas por Salib (2012).	47
Figura 51 - Modos de rotura das vigas ensaiadas por Salib (2012).	48
Figura 52 - Viga de referência ensaiada: a) corte longitudinal, b) secção transversal (Costa, 2013).	49
Figura 53 - Corte longitudinal e secção transversal da viga reforçada (Costa, 2013).	49
Figura 54 - Comparação do comportamento até à rotura das vigas testadas (Costa, 2013). ...	50
Figura 55 - Modo de rotura da viga reforçada (Costa, 2013).	50
Figura 56 - Secção transversal em T das vigas de betão armado da série 1 e da série 2.	52
Figura 57 - Corte longitudinal das vigas de betão armado da série 1 e da série 2.	52
Figura 58 - Execução das vigas de betão armado.	53
Figura 59 - Vigas da série 1: a) viga de referência (S1REF), b) viga com reforço à flexão e ao corte sem fixação das mantas (S1SFS), c) viga com reforço à flexão e ao corte com fixação das mantas (S1SFS-A).	55
Figura 60 - Vigas da série 2: a) viga de referência (S2REF), b) viga com reforço à flexão e ao corte sem fixação das mantas (S2SFS), c) viga com reforço à flexão e ao corte com fixação das mantas (S2SFS-A).	56
Figura 61 - Processo de retificação dos provetes cilíndricos.	57

Figura 62 - Configuração dos ensaios realizados para a caracterização do betão: a) resistência à compressão, b) módulo de elasticidade.	58
Figura 63 - Provetes cilíndricos: a) antes do ensaio, b) modos de rotura obtidos.	58
Figura 64 - Caracterização experimental do aço das armaduras das vigas: a) ensaio de tração uniaxial, b) varão testado.	59
Figura 65 - Ensaio de mantas de CFRP: a) provetes de manta de CFRP, b) configuração do ensaio de tração uniaxial, c) provetes de manta de CFRP depois do ensaio.	61
Figura 66 - Ensaio à tração das faixas de manta de CFRP: a) características dos provetes testados, b) provetes antes do ensaio, c) configuração do ensaio de tração uniaxial realizado, d) provetes após o ensaio (modos de rotura).	63
Figura 67 - Diagrama tensão versus extensão dos provetes ensaiados.	64
Figura 68 - Abertura dos entalhes para o reforço à flexão usando a técnica NSM com laminados de CFRP inseridos: a) execução dos entalhes, b) verificação da conformidade dos entalhes.	65
Figura 69 - Preparação da superfície de betão para o reforço ao corte: a) remoção da camada superficial, b) eliminação das arestas da base da alma das vigas, c) aplicação de jatos de ar, d) marcação da posição das mantas.	65
Figura 70 - Fases da aplicação do reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados no betão de recobrimento.	67
Figura 71 - Fases da aplicação do reforço ao corte com faixas discretas de manta de CFRP (técnica EBR).	68
Figura 72 - Execução do sistema de fixação das extremidades do reforço ao corte.	70
Figura 73 - Esquema de ensaio das vigas à flexão em três pontos de carga (dimensões em mm).	71
Figura 74 - Sistema de ensaio das vigas.	72
Figura 75 - Disposição dos LVDT na viga (dimensões em mm).	72

Figura 76 - Instrumentação das armaduras (valores em mm).....	73
Figura 77 - Instrumentação do CFRP nas vigas reforçadas da série 1 (valores em mm): a) alçado, b) planta.	73
Figura 78 - Instrumentação do CFRP nas vigas reforçadas da série 2 (valores em mm): a) alçado, b) planta.	74
Figura 79 - Comportamento até à rotura das vigas da série 1.....	75
Figura 80 - Comportamento da viga S1REF: a) aparecimento da primeira fenda de flexão (48 kN), b) aparecimento da primeira fenda de corte (155 kN), c) momento em que a viga atinge a capacidade de carga máxima (310.3 kN), d) rotura por corte da viga, e) padrão de fendilhação final registado na viga.	76
Figura 81- Comportamento da viga S1SFS: a) aparecimento da primeira fenda de flexão, b) padrão de fendilhação registado para uma carga de 310 kN, c) destacamento da 3ª faixa de manta (aos 330 kN), d) destacamento da 2ª faixa de manta (aos 365,1 kN), e) rotura por corte da viga, f) detalhe do destacamento das mantas de CFRP, g) padrão de fendilhação final registado na viga.	78
Figura 82 - Comportamento da viga S1SFS-A: a) aparecimento da primeira fenda de flexão, b) padrão de fendilhação registado para uma carga de 312 kN, c) padrão de fendilhação registado para uma carga de 368 kN, d) momento em que a viga atinge a capacidade de carga máxima, e) rotura por flexão (fenda de flexão vertical na secção de aplicação da carga), f) rotura dos laminados, g) padrão de fendilhação final registado na viga.	79
Figura 83 - Viga S1REF: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S1REF e localização do extensómetro do estribo, b) variação das extensões no estribo instrumentado.....	81
Figura 84 - Viga S1SFS: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S1SFS e localização dos extensómetros, b) variação das extensões na armadura longitudinal, c) variação das extensões no laminado, d) variação das extensões nas mantas.	82

Figura 85 - Viga S1SFS-A: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S1SFS-A e localização dos extensómetros, b) variação das extensões na armadura longitudinal, c) variação das extensões nos laminados, d) variação das extensões nas mantas.	83
Figura 86 - Comportamento até à rotura das vigas da série 2.	85
Figura 87 - Comportamento da viga S2REF: a) aparecimento da primeira fenda de flexão (50 kN), b) padrão de fendilhação para uma carga de 200 kN, c) momento em que a viga atinge a capacidade de carga máxima, d) rotura por corte da viga, e) padrão de fendilhação final na viga.	86
Figura 88 - Comportamento da viga S2SFS: a) aparecimento da primeira fenda de flexão, b) padrão de fendilhação para uma carga de 350 kN, c) destacamento da 3ª faixa de manta (382 kN), d) destacamento da 2ª faixa de manta e rotura por corte da viga, e) padrão de fendilhação da viga.	88
Figura 89 - Comportamento da viga S2SFS-A: a) aparecimento da primeira fenda de flexão, b) padrão de fendilhação registado para uma carga de 350 kN, c) padrão de fendilhação registado para uma carga de 411 kN, d) momento em que a viga atinge a capacidade de carga máxima, e) rotura por flexão (fenda de flexão vertical na secção de aplicação da carga), f) rotura dos laminados, g) padrão de fendilhação final registado na viga.	89
Figura 90 - Viga S2REF: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S2REF e localização do extensómetro, b) variação das extensões no estribo instrumentado.	91
Figura 91 - Viga S2SFS: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S2SFS e localização dos extensómetros, b) variação das extensões nos laminados c) variação das extensões nas mantas.	92
Figura 92 - Viga S2SFS-A: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S2SFS-A e localização dos extensómetros, b) variação das extensões no estribo instrumentado, c) variação das extensões nos laminados, d) variação das extensões nas mantas.	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do betão, do aço e das fibras de carbono (Carolin, 2003; NP EN 1992-1-1, 2010).....	8
Tabela 2 -Reforço à flexão de vigas de betão armado com CFRP: comparação do grau de eficácia da técnica NSM e da técnica EBR.....	18
Tabela 3 - Principais resultados de cada um dos modelos ensaiados por Dias et al. (2006)...	23
Tabela 4 - Resultados da capacidade de carga das vigas testadas por Dias et al. (2012).	26
Tabela 5 - Resultados obtidos por Mofidi e Chaallal (2014).....	29
Tabela 6 - Parâmetros avaliados nas quatro séries de vigas testadas por Dias (2008).	30
Tabela 7 - Valores máximos das extensões registadas nos laminados de CFRP instrumentados (Dias, 2008).....	32
Tabela 8 - Principais resultados obtidos de cada um dos modelos ensaiados (Dias e Barros, 2005).	35
Tabela 9 - Geometria das três séries de vigas ensaiadas (Barros et al., 2010).....	37
Tabela 10 - Resultados das séries de vigas ensaiadas (Barros et al., 2010).....	38
Tabela 11 - Resultados obtidos nas vigas ensaiadas por El-Ghandour (2011).	41
Tabela 12 - Propriedades e resultados obtidos da série de vigas reforçadas à flexão e ao corte (Dong et al. 2013).	44
Tabela 13 - Principais resultados obtidos (Salib, 2012).....	47
Tabela 14 - Características das vigas testadas.	55
Tabela 15 - Propriedades dos aços das armaduras das vigas.	59
Tabela 16 - Principais resultados obtidos nas vigas da série 1.	75

Tabela 17 - Principais resultados obtidos nas vigas da série 2..... 86

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Os compósitos de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer* - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) são materiais leves e de elevado desempenho tanto em termos mecânicos como em termos de durabilidade. O seu uso no reforço de estruturas de betão armado está diretamente relacionado com o sucesso da aplicação dos CFRP noutras indústrias (como por exemplo a aeronáutica, a automóvel e a naval), com a crescente necessidade de intervenções de reabilitação do património construído e com os aspetos menos positivos apresentados pelas técnicas de reforço que tradicionalmente têm vindo a ser utilizadas.

Os estudos de investigação já realizados sobre o reforço de vigas de betão armado com compósitos de CFRP tem-se centrado essencialmente no uso da técnica da colagem externa (técnica EBR - *Externally Bonded Reinforcement*) e da técnica da inserção do CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM - *Near Surface Mounted*), verificando-se que tanto no reforço à flexão como no reforço ao corte a técnica NSM tem-se mostrado mais eficaz.

Quando se procede a um reforço à flexão de uma viga de betão armado, é sempre necessário verificar que o elemento reforçado tenha capacidade de resistir às forças de corte associadas ao aumento da resistência à flexão. Assim sendo, a necessidade de uma intervenção de reforço à flexão pode levar também à necessidade de uma intervenção de reforço ao esforço transversal.

Estudos já realizados com reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado com mantas de CFRP coladas externamente (técnica EBR) permitem verificar que tipicamente ocorre o modo de rotura por destacamento do reforço ao corte. A investigação já realizada com reforço simultâneo à flexão e ao corte com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM) permite verificar que pode ocorrer um modo de rotura por destacamento do reforço à flexão. Por forma a tentar contornar estes modos de rotura prematuros, no âmbito desta dissertação pretende-se avaliar o grau de eficácia de uma solução de reforço híbrido com CFRP aplicado a vigas T de betão armado com necessidade de aumento da capacidade resistente à flexão e ao corte.

1.2. Objetivos da dissertação

De um modo geral, com a presente dissertação pretende-se avaliar experimentalmente a eficácia de uma solução híbrida de CFRP para o reforço à flexão e ao corte de vigas T de betão armado. Esta solução consiste no reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM) e no reforço ao corte com faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente em forma de U (técnica EBR), reforço este complementado com um sistema que permite a ancoragem das faixas de manta de CFRP nas suas extremidades. Concretamente, os objetivos definidos para a presente dissertação foram:

- Avaliar a exequibilidade prática do reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado de secção em T usando a solução de reforço híbrido de CFRP anteriormente referida.
- No âmbito da conceção do sistema que permitirá a ancoragem das faixas de manta de CFRP (reforço ao corte) nas suas extremidades, definir a área de colagem necessária para que o modo de rotura de provetes, constituídos por duas faixas de manta de CFRP (igual à que foi usada no reforço ao corte das vigas testadas) coladas apenas numa zona central do provete, submetidos a ensaios de tração uniaxial não seja pela ligação manta/manta mas sim pela rotura de uma das mantas.
- Avaliar a eficiência do reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de secção em T de betão armado, usando a solução de reforço híbrido de CFRP anteriormente referida, em termos de capacidade de carga, de capacidade deformacional, do grau de mobilização do reforço de CFRP e dos modos de rotura.

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos.

No Capítulo 1 - Introdução - é feito o enquadramento geral do tema do presente estudo, são também delineados os objetivos desta investigação, sendo ainda apresentada a forma como a dissertação está estruturada.

No Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica - é apresentada a revisão bibliográfica sobre o estado do conhecimento atual que aborda a temática da dissertação. Numa fase inicial, após uma breve referência sobre as necessidades de reforço de estruturas de betão armado, são abordadas de forma sumária as técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas, o uso de materiais compósitos de CFRP no reforço estrutural e são ainda introduzidas as técnicas de

reforço inovadoras com CFRP. O resto do capítulo é reservado ao reforço à flexão, ao reforço ao corte e ao reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP aplicados com as técnicas EBR e NSM. Por fim, é apresentada a solução de reforço à flexão e ao corte de vigas de betão armado com uma solução híbrida de CFRP que será objeto de estudo na presente dissertação.

No Capítulo 3 - Programa Experimental - descreve-se a investigação experimental realizada no âmbito da presente dissertação. Numa primeira parte deste capítulo são descritas as séries de modelos de vigas de betão armado ensaiadas (geometria, armadura e soluções de reforço adotadas), são apresentadas as principais propriedades dos materiais utilizados (betão, aço, laminado de CFRP, manta de CFRP, adesivo epoxídico e resina epoxídica), e o estudo realizado para estabelecer, no âmbito de uma ligação manta/manta, o comprimento de colagem necessário para que o modo de rotura num ensaio de tração uniaxial, não seja pela ligação das mantas mas sim pela rotura de uma das mantas. Posteriormente, é descrita a forma como foram realizados os reforços de CFRP das vigas de betão armado. Após a descrição dos sistemas de ensaio e de monitorização adotados para os ensaios das vigas procede-se à apresentação e análise dos resultados obtidos.

No Capítulo 4 - Conclusões Gerais e Desenvolvimentos Futuros - são apresentadas as principais conclusões resultantes do trabalho experimental realizado e sugeridas algumas perspetivas de desenvolvimentos futuros.

No Capítulo 5 - Referências Bibliográficas - são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas como apoio à realização desta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma síntese da revisão bibliográfica efetuada sobre a temática da presente dissertação, nomeadamente em termos das técnicas de reforço de vigas de betão armado com CFRP, com especial enfoque para as técnicas NSM e técnica EBR.

Numa fase inicial, após uma breve referência sobre as necessidades de reforço de estruturas de betão armado, são abordadas de forma sumária as técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas, o uso de materiais compósitos de CFRP no reforço estrutural e são ainda introduzidas as técnicas de reforço inovadoras com CFRP. O resto do capítulo é reservado ao reforço à flexão, ao reforço ao corte e ao reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP aplicados com as técnicas EBR e NSM.

2.1. Necessidade de reforço de estruturas de betão armado

A crescente necessidade de intervenção no património construído levou à reabilitação onde o objetivo não é construir, mas sim, no mínimo, recuperar a performance original da estrutura. Com efeito, a reabilitação pode visar nalguns casos a manutenção e noutros o melhoramento da estrutura, sendo que a manutenção visa principalmente manter a performance original da estrutura, enquanto o melhoramento é a opção tomada quando a intenção é aumentar o desempenho original da estrutura, quer seja a nível de durabilidade, de capacidade de carga, de funcionalidade ou de estética.

Assim, a reabilitação de uma estrutura torna-se necessária quando esta, durante o seu período de vida útil, não assegura, aos seus utilizadores de forma contínua, a segurança, funcionalidade e conforto. O setor da reabilitação tem vindo nos últimos anos a aumentar a sua importância, de forma continuada no âmbito da atividade de construção civil, de tal forma que em 2012 na União Europeia (EU) a 27, este setor já era responsável por 25% do investimento na área da construção (European Construction Industry Federation, 2013).

Neste contexto, a necessidade de reforço pode estar associada à mudança de uso da estrutura, que origine um aumento das cargas atuantes para a qual esta não foi dimensionada, mas também para fazer face a novas disposições regulamentares mais severas, erros de projeto, técnicas construtivas deficientemente executadas, ou defeitos de materiais que podem levar a que as estruturas tenham níveis de desempenho inferiores ao definido no dimensionamento. A necessidade de reforço pode também estar associada à ocorrência de acidentes como sismos, incêndios, explosões, cheias ou atos de vandalismo, que podem originar danos severos ou

mesmo no limite à ruína das estruturas por provocarem esforços para os quais a estrutura não resiste. Refira-se também a necessidade de reforço para situações em que se pretende mudar um modo de rotura frágil para um modo de rotura dúctil da estrutura (exemplo da mudança do modo de rotura por corte para o modo de rotura por flexão em vigas de betão armado).

2.2. Técnicas de reforço estrutural convencionais

Normalmente associada a uma solução de reforço está a análise de compromisso “*custo/benefício*” de várias técnicas de reparação/reforço. As mais usadas são: (i) encamisamento das secções; (ii) colagem externa de chapas de aço; (iii) aplicação de pré-esforço exterior (Figura 1).

A técnica do encamisamento consiste na adição de uma nova camada de betão e aço, como se existisse uma nova viga a envolver total ou parcialmente a anterior. Esta técnica apresenta como principais vantagens o aumento da ductilidade, da capacidade de carga e da rigidez do elemento estrutural e de dotar o elemento reforçado de mais proteção contra a corrosão, o fogo e ações de vandalismo. Além disso, não requer mão-de-obra especializada, pelo que se torna numa solução económica. Por outro lado, esta técnica apresenta algumas limitações como sendo as implicações arquitetónicas pelo facto de exigir um aumento da seção transversal do elemento, também leva a um aumento do peso próprio, provoca condicionalismos da obra durante a intervenção e não permite a utilização rápida da estrutura durante e após a aplicação da solução de reforço.

Em alternativa ao encamisamento das secções existe a técnica de reforço que consiste na colagem externa de chapas aço com resinas epóxis. Esta técnica é de rápida e fácil aplicação, permite uma rápida entrada ao serviço da estrutura, tem um baixo custo quando comparada com a técnica do encamisamento e os elementos reforçados revelam um bom comportamento estrutural. Por outro lado, trata-se de uma técnica em que o elemento de reforço revela elevada suscetibilidade à corrosão e ao fogo, limitações relativas ao transporte derivado ao peso e ao tamanho, dificuldade de manuseamento e aplicação em superfícies curvas, bem como, o inconveniente de exigir juntas de ligação e exigir o uso de suportes durante o tempo de cura do adesivo.

O recurso a cabos de pré-esforço (pré-esforço exterior) colocado nos elementos estruturais permite um controlo da capacidade de carga e de deformação da estrutura, contudo apresenta também alguns inconvenientes: a suscetibilidade à corrosão, ao fogo e aos atos de

vandalismo, necessidade adicional de implementar sistemas de ancoragem e de poder originar o aparecimento de esforços adicionais nos elementos estruturais.

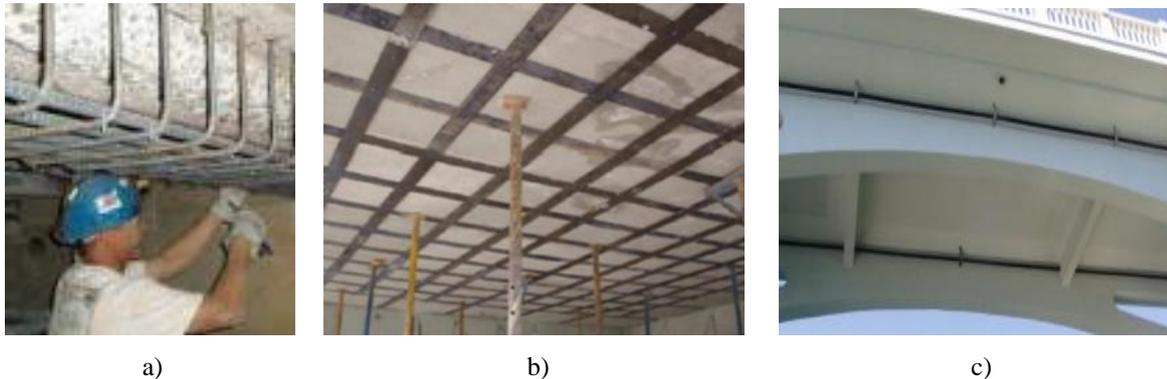


Figura 1 - Técnicas de reforço: a) por encamisamento (Sena Cruz, 2015), b) reforço à flexão com chapas de aço (Rodrigues, 2005), c) cabos de pré-esforço (Costa, 2012).

2.3. Materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão

A crescente necessidade de reforçar estruturas de betão, os aspetos menos positivos que as técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas apresentam e o sucesso da aplicação de materiais compósitos de FRP noutras indústrias, como por exemplo a aeronáutica, a automóvel e a naval foram fatores determinantes para o aparecimento de técnicas de reforço de estruturas de betão armado com compósitos de FRP.

Os materiais compósitos de FRP, tal como apresentado na Figura 2, são constituídos essencialmente por duas componentes, as fibras e a matriz polimérica. As fibras estão embebidas na matriz polimérica, sendo o elemento estrutural dos compósitos FRP (responsáveis por proporcionar resistência e rigidez ao FRP). As fibras dispõem-se sob a forma de filamentos de pequeno diâmetro, possuem baixa densidade e apresentam comportamento frágil (ASTM D30, 1964).

No âmbito da engenharia civil, de entre os vários tipos de fibras existentes, as mais usadas em soluções de reforço estrutural são de aramida (A), carbono (C) e vidro (G), sendo os respetivos compósitos designados na literatura internacional por AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymers - Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida), CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) e GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers - Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro).

Dos três tipos de fibras anteriormente referidas as mais usadas em soluções de reforço de estruturas de betão armado são as de carbono, em virtude de apresentarem as melhores propriedades mecânicas. Além disso, as fibras de carbono são as mais resistentes a ataques

químicos, imunes à corrosão e não absorverem água. Na Figura 3 apresenta-se a relação tensão *versus* (*vs*) deformação resultante do ensaio à tração uniaxial do aço convencional A500, do aço de cordões de pré-esforço e de fibras de aramida, de vidro e de carbono (a designação HM diz respeito a fibras de elevado módulo de elasticidade e a designação HS diz respeito a fibras de elevada resistência). Além de se verificar que as fibras apresentam um comportamento linear elástico até à rotura (rotura frágil), contrastando assim com o comportamento dúctil do aço, a análise da Figura 3 permite constatar um melhor comportamento das fibras de carbono em relação às fibras de vidro e de aramida. Pelos motivos apresentados a presente dissertação irá centrar o seu estudo nos compósitos reforçados com fibras de carbono.

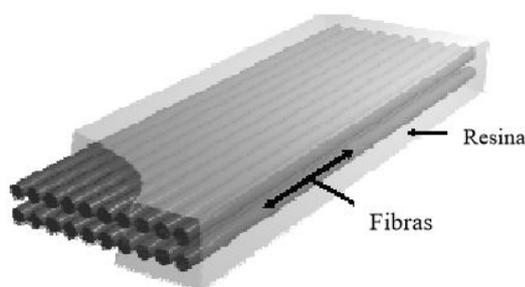


Figura 2 - Constituição dos materiais compósitos de FRP (Machado, 2007).

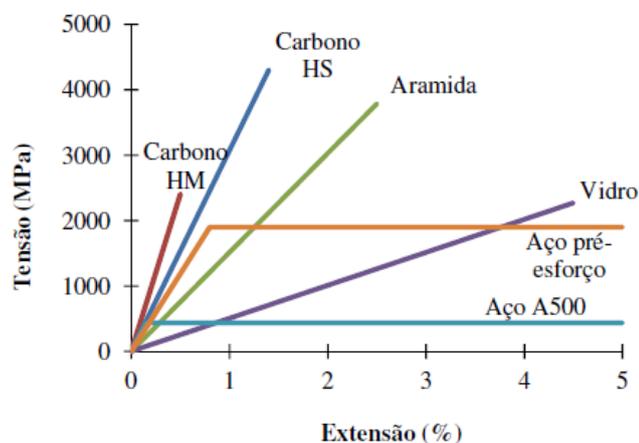


Figura 3 - Relação tensão *vs* extensão das fibras de aramida, carbono e vidro, do aço A500 e de cordões de pré-esforço (ACI 440R-96, 2002).

Na Tabela 1 apresentam-se os valores típicos do módulo de elasticidade, da resistência à compressão, da resistência à tração e da densidade do aço, do betão e das fibras de carbono. Da análise desta tabela verifica-se que as fibras de carbono, além de serem mais leves, apresentam valores do módulo de elasticidade e da resistência à tração muito superiores aos valores apresentados pelo aço e pelo betão. Dos dados da Tabela 1 destaca-se o valor da

densidade das fibras de carbono, que corresponde a 24% da densidade do aço, e o valor da resistência máxima à tração das fibras, que é 7,8 vezes superior à do aço.

Tabela 1 - Propriedades do betão, do aço e das fibras de carbono (Carolin, 2003; NP EN 1992-1-1, 2010).

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Densidade (kg/m ³)
Betão	20-40	10-60	1-3	2400
Aço	200-210	400-690	400-690	7800
Fibras de carbono ⁽¹⁾	200-800	---	2500-6000	1750-1950

⁽¹⁾ Propriedades das fibras de carbono e não do compósito.

Relativamente à matriz, esta é responsável por envolver as fibras com o objetivo de as manter na posição pretendida, de garantir a transferência e distribuição das cargas pelas fibras garantindo que estas funcionem em conjunto, de oferecer resistência à encurvadura das fibras (quando solicitadas à compressão) e de proteger as fibras dos agentes agressores ambientais (Lubin, 1998). A matriz polimérica é composta por resinas, que podem ser divididas em dois grupos: as resinas termoplásticas e as resinas termoendurecidas (ACI 440.2R-02 (2002)). No âmbito da engenharia civil, a resina mais utilizada é a termoendurecida do tipo epóxi, por apresentar boa aderência à maioria dos materiais, não absorver a água e possuir melhores propriedades mecânicas.

Os sistemas de CFRP utilizados no reforço de estruturas de betão podem ser classificados em sistemas pré-fabricados e em sistemas curados “*in situ*”. Os sistemas pré-fabricados normalmente assumem a forma unidirecional e podem ser laminados ou varões. Estes sistemas são fornecidos sob a forma de perfis pré-fabricados e têm as características mecânicas e físicas garantidas pelos fabricantes. Os sistemas curados “*in situ*” são constituídos por mantas ou tecidos de fibras numa ou em várias direções, respetivamente, sendo aplicados feixes de fibras contínuas em estado seco ou pré-impregnado, sobre uma resina epoxídica previamente espalhada na superfície a reforçar. A resina de saturação tem as funções de impregnar o grupo de fibras, proporcionar a polimerização do conjunto num compósito de CFRP e, por fim, desenvolver propriedades de aderência na ligação CFRP-betão.

Na Figura 4 apresentam-se alguns dos tipos de materiais de CFRP que podem ser utilizados no reforço estrutural.

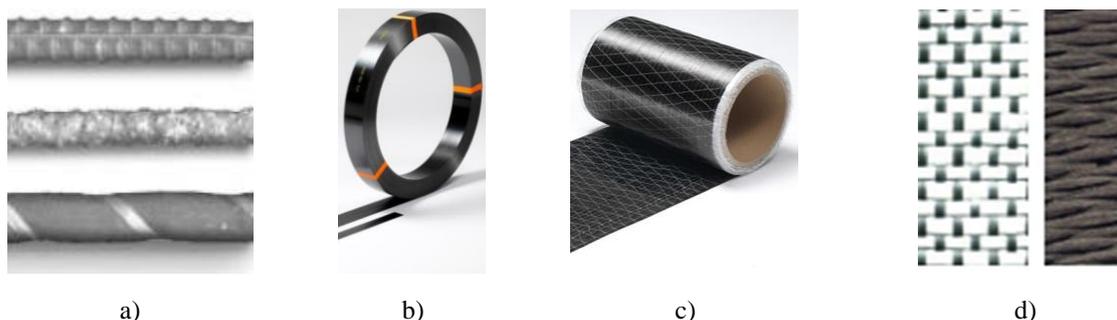


Figura 4 - Compósitos de CFRP: a) varões (ACI, 2006), b) laminados (S&P, 2016), c) mantas (S&P, 2016), d) tecidos (Rodrigues, 2005).

Os compósitos de CFRP apresentam peso específico reduzido, valores elevados de resistência a tração e de módulo de elasticidade e têm elevada resistência à corrosão. A sua leveza permite que sejam transportados, manipulados e aplicados de forma fácil. Os elevados valores da relação resistência à tração/peso específico dos CFRP permitem que o aumento do peso próprio da estrutura reforçada seja insignificante e que não haja alterações significativas a nível arquitetónico da estrutura (o que não acontece, por exemplo, com a técnica do encamisamento). Para além disso, os CFRP estão disponíveis em várias formas, com dimensões muito variadas, pelo que proporcionam soluções de reforço que se adaptam a qualquer tipo de estrutura e em qualquer secção transversal, salientando-se ainda o facto de dispensarem emendas, uma vez que estão disponíveis no mercado comprimentos de CFRP quase ilimitados (o que não acontece com as chapas de aço usadas quando se utiliza a técnica de reforço por colagem externa). Ainda neste âmbito importa referir que mesmo em zonas de difícil acesso ou em zonas onde o normal funcionamento da estrutura não possa ser posto em causa, as soluções de reforço com CFRP são indicadas devido à sua simplicidade e rapidez de execução e ao tempo de cura muito reduzido dos adesivos. Por outro lado, a imunidade à corrosão destes materiais, permite não só a sua utilização em zonas agressivas, como por exemplo zonas costeiras diminuindo os custos de manutenção da estrutura ao longo do seu período de vida útil.

O preço dos compósitos de CFRP e o seu comportamento a elevadas temperaturas são ainda os aspetos menos positivos da utilização destes materiais. Apesar do preço do material em si ainda ser elevado, deve-se ter em consideração no âmbito do custo da solução de reforço de CFRP de todas as vantagens anteriormente referidas. O comportamento de uma solução de reforço com CFRP quando exposta a altas temperaturas, nomeadamente à ação do fogo, deve ser alvo de uma atenção muito especial, uma vez que a temperatura de transição vítrea do adesivo/resina da ligação CFRP/betão é da ordem dos 50 a 60°C, valores estes rapidamente

alcançáveis num cenário de incêndio (Barnes e Fidell, 2006). Perante este cenário recomenda-se que complementarmente à solução de reforço seja usada uma proteção para temperaturas elevadas.

2.4. Técnicas de reforço utilizando materiais compósitos de CFRP

O reforço de uma estrutura de betão armado recorrendo a compósitos de CFRP pode ser efetuado recorrendo às seguintes técnicas (Figura 5): i) a técnica da colagem externa do CFRP, designada na literatura internacional por técnica Externally Bonded Reinforcement (EBR); ii) a técnica da inserção do CFRP em entalhes realizados no betão de recobrimento, designada na literatura internacional por técnica Near Surface Mounted (NSM); iii) a técnica de reforço que recorre a ancoragens para fixar o CFRP ao substrato, designada na literatura internacional por Mechanically Fastened FRP Technique (MF-FRP); iv) a técnica que consiste na colagem externa do reforço de CFRP sendo a ligação ao substrato complementada com a adição de ancoragens, que não é mais do que a combinação da técnica EBR com a técnica MF-FRP. Esta última técnica é designada na literatura internacional por Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement Technique (MF-EBR).

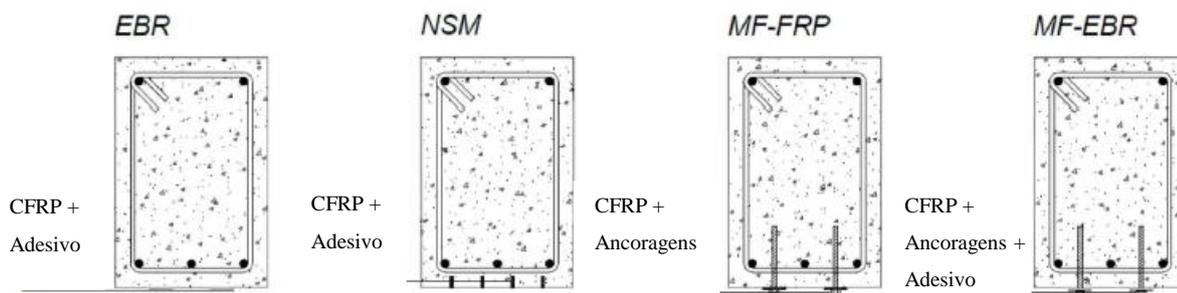


Figura 5 - Técnicas de reforço inovadoras com compósitos de CFRP (adaptado de Sena Cruz *et al.*, 2011).

No âmbito da presente revisão bibliográfica, será dado particular relevo às técnicas EBR e NSM com compósitos de CFRP por serem as que estão diretamente relacionadas com o trabalho de investigação desta dissertação.

2.4.1. Técnica de colagem externa com CFRP (técnica EBR)

A técnica de colagem externa com materiais compósitos de CFRP é uma solução possível para o reforço de vigas de betão armado e pode ser utilizada com vista a solucionar várias necessidades. Por intermédio da colagem do CFRP na face tracionada é possível efetuar o reforço à flexão; através da colagem nas faces laterais (dois lados da secção transversal), ou colagem em forma de U (três lados da secção transversal), ou quando possível envolvendo

totalmente a secção transversal é possível aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal. O reforço ao corte usando a técnica EBR pode ser aplicado de forma discreta ou contínua, com uma ou mais camadas de CFRP e com orientações diferentes para as fibras (45° , 60° , 90° ...), como apresentado na Figura 6.

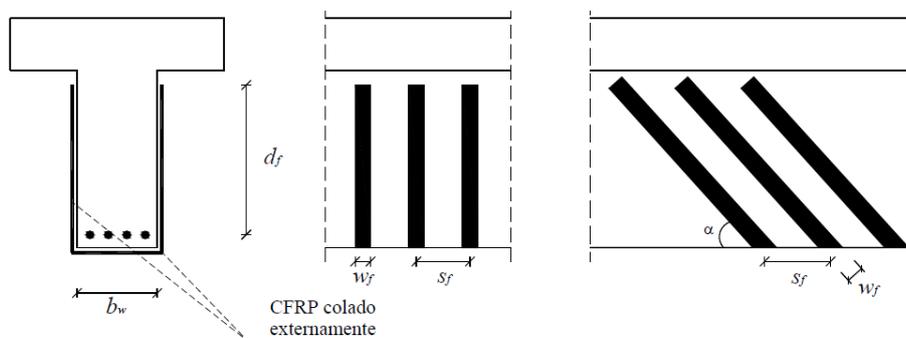


Figura 6 - Reforço ao corte com CFRP colado externamente (Barros, 2004).

A aplicação de sistemas compósitos de CFRP no reforço de elementos de betão segundo a técnica EBR envolve essencialmente três tarefas (Juvandes *et al.*, 2003): a preparação da superfície do substrato (garantir que a base tenha boas condições de aderência: em sistemas curados “*in situ*” a superfície deve ser esmerilada, enquanto que no sistema pré-fabricado esta deve ser bojardada, por exemplo, com recurso a um martelo de agulhas ou jatos de areia), a colagem propriamente dita do reforço (mistura correta da resina e do endurecedor, respeitando integralmente as especificações dos fabricantes e aplicação adequada do adesivo no substrato e no reforço) e o controlo de qualidade da técnica de reforço, antes, durante e após a aplicação (o desempenho do reforço de CFRP depende da qualidade dos materiais aplicados e da qualidade da aplicação da técnica).

Dias *et al.* (2006) apresentam alguns procedimentos de controlo de qualidade da aplicação da técnica EBR. Na preparação da superfície do substrato: (i) remoção da leitada superficial, regularização da superfície e arredondamento das arestas; (ii) controlo de qualidade: resistência, irregularidades, fendas e corrosão... reparar se necessário; (iii) o betão deve apresentar-se seco e isento de poeiras e (iv) corte com as dimensões desejadas, limpeza da superfície verificando a existência de irregularidades. Na fase da colagem propriamente dita do reforço, caso se esteja perante um sistema pré-fabricado (laminado) os passos são: (i) aplicação do primário (opcional) e da argamassa de regularização (se for necessário); (ii) aplicação do adesivo na superfície de betão a reforçar; (iii) aplicação do adesivo no CFRP e (iv) colagem do CFRP, comprimindo-o ao betão, retirando o adesivo em excesso. No caso da aplicação de um sistema curado “*in situ*” (manta), os procedimentos são: (i) aplicação do

primário e da argamassa de regularização (se for necessário); (ii) aplicação da resina; (iii) aplicação do CFRP e (iv) aplicação da resina (impregnação do CFRP). Quanto ao controlo de qualidade da técnica de reforço, antes, durante e após a aplicação: (i) nos materiais utilizados (testes normalizados nos CFRP e nos adesivos/resinas); (ii) nas condições de aplicação (condições ambientais) e (iii) durante a aplicação (posição do CFRP, direção das fibras, qualidade da colagem e existência de vazios). Nesta fase, pode ainda ser considerada uma fase opcional de acabamento, que consiste na aplicação de uma pintura, ou de betão projetado (estética, proteção ao fogo e raios ultravioletas). Na Figura 7 apresentam-se algumas das etapas da aplicação de um reforço à flexão com mantas e laminados de CFRP aplicados com a técnica da colagem externa.

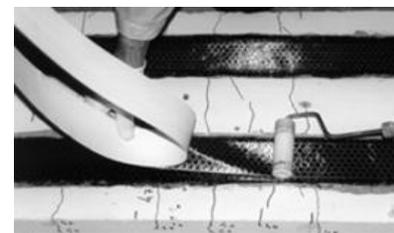
Sistema curado "in situ" (manta)



Aplicação do esmeril



Aplicação do primário

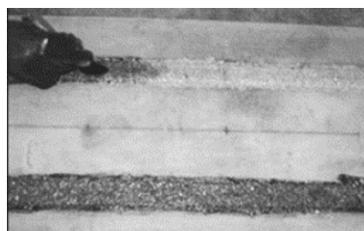


Colagem da manta

Sistema pré-fabricado (laminado)



Aplicação do martelo de agulhas



Aplicação de primário



Colagem do laminado

Figura 7 - Aplicação de sistemas de reforço de CFRP com a técnica EBR aplicada com um sistema curado "in situ" e com um sistema pré-fabricado (Dias, 2001).

Apesar da técnica de colagem externa com CFRP ser extremamente simples e de rápida execução, bem como conferir acréscimos de carga significativos, estudos realizados mostram que tipicamente o modo de rotura associado a esta técnica de reforço é a descolagem prematura do CFRP. Esta ocorrência está associada a modos de rotura frágeis que ocorrem sem qualquer tipo de aviso, não se conseguindo mobilizar a totalidade da capacidade dos compósitos de CFRP. Muitas vezes o destacamento prematuro ocorre para níveis baixos de tensão mobilizada no CFRP, levando ao desaproveitamento do material e tornando a solução mais cara (Figura 8).



Figura 8 - Rotura por destacamento do CFRP colado externamente: a) ao corte (El-Ghandour, 2011), b) à flexão (Coelho *et al.*, 2012).

Com vista a evitar ou retardar a ocorrência de modos de ruína prematuros e ao mesmo tempo, aumentar a capacidade de carga e ductilidade dos elementos estruturais reforçados, tem sido sugerida a utilização de mecanismos exteriores de fixação do reforço de CFRP (Khalifa, 1999; Dias *et al.*, 2002 e Dimande, 2003).

Ainda no âmbito da técnica EBR, refira-se que, uma vez que o reforço é aplicado externamente fica exposto a agentes ambientais agressivos, suscetível a impactos e raios ultravioletas, sujeito a absorção de humidade, atos de vandalismo e à ação do fogo.

2.4.2. Técnica de inserção do CFRP no betão de recobrimento (técnica NSM)

A técnica NSM com CFRP pode ser usada no reforço à flexão de elementos de betão armado inserindo laminados ou varões em entalhes efetuados no betão de recobrimento da face tracionada. O aumento da capacidade resistente ao corte pode ser alcançado usando a técnica NSM inserindo o CFRP (laminados ou varões) em entalhes efetuados nas faces laterais do elemento a reforçar.

A técnica NSM usando compósitos de CFRP surgiu na tentativa de resolver algumas das limitações da técnica de colagem externa, nomeadamente, evitar ou retardar a ruína prematura do reforço por descolagem, conferir mais ductilidade e capacidade de carga ao elemento reforçado e aumentar o nível de proteção do reforço (em vez do reforço estar colado externamente está inserido no betão). Refira-se que a técnica de reforço NSM foi adotada inicialmente com recurso a varões de aço (Asplund, 1949). A substituição destes por compósitos de CFRP tem como vantagens a adoção de materiais com imunidade à corrosão, mais leves e mais resistentes, traduzindo-se assim em soluções de reforço mais duráveis e mais ligeiras (uso de menor quantidade de material pode originar também uma menor quantidade de entalhes a realizar).

Os compósitos de CFRP utilizados na técnica de reforço NSM podem assumir secções transversais circulares, quadradas e retangulares, tal como ilustrado na Figura 9. Nesta figura também são apresentadas algumas recomendações para as dimensões dos entalhes, bem como a nomenclatura normalmente utilizada para as distâncias mais importantes a considerar no reforço com a técnica NSM. Apesar dos laminados de CFRP (secções retangulares) terem menor secção transversal apresentam maior perímetro de colagem, o que lhes confere uma melhor aderência do reforço ao betão e consequentemente um melhor desempenho da solução de reforço (El-Hacha e Rizkalla, 2004; Cisnero *et al.*, 2012).

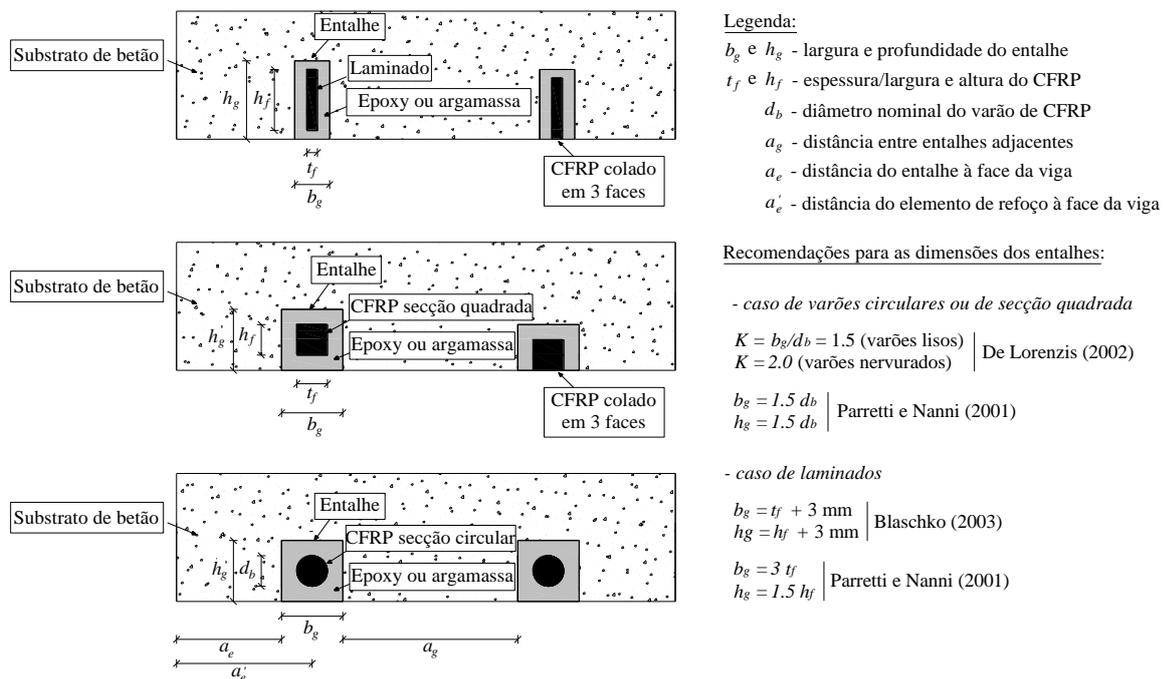


Figura 9 - Secção dos elementos de CFRP usados no reforço com a técnica NSM (De Lorenzis e Teng, 2007).

Dias (2008) apresenta os procedimentos fundamentais de controlo de qualidade da aplicação da técnica NSM. Numa fase inicial tem lugar a abertura dos entalhes englobando as seguintes tarefas: (i) garantir o alinhamento e as dimensões dos entalhes (largura e profundidade); (ii) garantir que as armaduras existentes não sejam danificadas (longitudinais e transversais) e (iii) betão deve apresentar-se seco, isento de gorduras e poeiras (necessidade de aplicação de jatos de ar). Posteriormente segue-se a preparação dos materiais para a aplicação do reforço: (i) corte dos laminados de CFRP com o comprimento desejado; (ii) limpeza dos laminados de CFRP com um desengordurante e (iii) preparação do adesivo epoxídico (garantir as dosagens das suas componentes e do seu modo de mistura). A fase seguinte está associada à inserção dos laminados de CFRP que engloba as etapas: (i) preenchimento do entalhe com adesivo; (ii) aplicação de adesivo no laminado de CFRP; (iii) inserção do laminado de CFRP no entalhe e

(iv) remoção do adesivo em excesso. Em termos de controlo de qualidade (antes, durante e após a aplicação) deve ser garantido: (i) nos materiais utilizados (testes normalizados nos CFRP e nos adesivos); (ii) nas condições de aplicação (condições ambientais, "pot life" do adesivo epoxídico) e (iii) durante a aplicação (controlo do número de laminados aplicados, existência de vazios). Tal como na secção anterior o acabamento é opcional e consiste na aplicação de uma pintura, ou de betão projetado (estética, proteção ao fogo e raios ultravioletas). Na Figura 10 são apresentadas algumas das etapas da aplicação de um reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos.

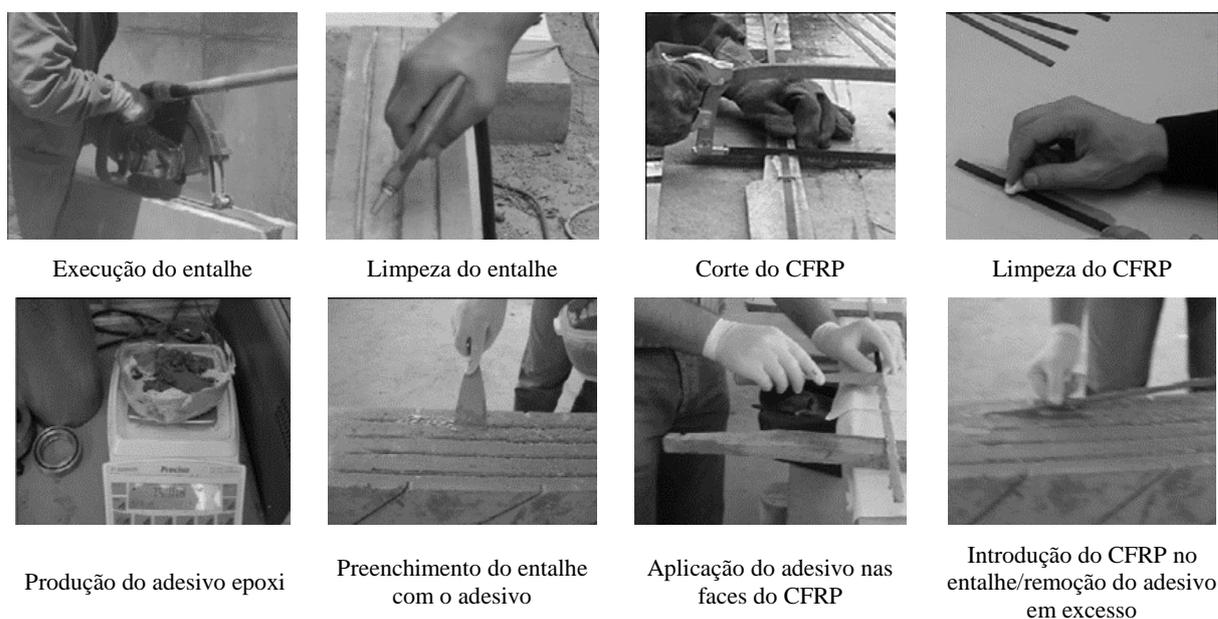


Figura 10 - Procedimento para aplicação do reforço à flexão de uma viga com laminados de CFRP inseridos (Dias, 2008).

2.4.3. Comparação do grau de eficácia das técnicas EBR e NSM usando compósitos de CFRP

A técnica NSM apresenta algumas vantagens relativamente à técnica EBR: i) duplicação da área de colagem (Figura 11) permitindo assim o aumento do grau de fixação do reforço ao betão o que terá como consequência retardar ou mesmo evitar a ocorrência de roturas prematuras; ii) técnica mais fácil de aplicar e iii) garante maior proteção do reforço a ações mecânicas, desgaste, impacto, vandalismo e às altas temperaturas pois o reforço não está colado externamente mas inserido no betão de recobrimento.

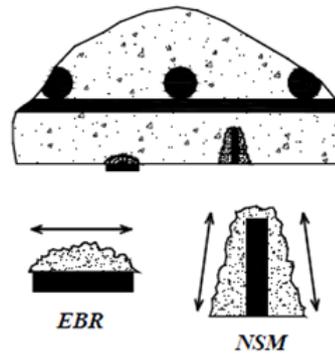


Figura 11 - Ancoragem conferida pela técnica EBR e pela técnica NSM (adaptado de Carolin (2003)).

De seguida são apresentados, resumidamente, dois trabalhos experimentais já realizados (um sobre o reforço à flexão e outro sobre o reforço ao corte) para, a título de exemplo, comprovar o melhor desempenho da técnica NSM em relação à técnica EBR.

No âmbito do reforço à flexão de vigas de betão armado com CFRP, Bilotta *et al.* (2015) efetuaram um programa experimental com vista a comparar a eficiência do reforço aplicado com a técnica NSM com laminados de CFRP com a do reforço aplicado com a técnica EBR. Para isso, ensaiaram 10 vigas de betão armado com 2,1 m de vão sendo testados dois tipos de carregamentos distintos, um simulando uma carga pontual (carregamento tipo I) e outro uma carga distribuída (carregamento tipo II). As vigas tinham secção transversal retangular ($120 \times 160 \text{ mm}^2$) e estavam armadas, longitudinalmente com 4 varões de 10 mm (dois à tração e dois à compressão), e transversalmente com varões de 6 mm espaçados de 200 mm ($\phi 6 @ 200 \text{ mm}$). A resistência média do betão à compressão avaliada em cubos era de 21 MPa.

Para ambos os sistemas de carregamento testados, foram ensaiadas cinco vigas: uma viga de referência sem CFRP, duas vigas reforçadas com a técnica EBR usando um laminado de $1,4 \times 40 \text{ mm}^2$ colado na face tracionada das vigas e duas vigas reforçadas com a técnica NSM (uma com dois e outra com três laminados de secção transversal $1,4 \times 10 \text{ mm}^2$), tal como representado na Figura 12. De acordo com esta figura os entalhes onde foram inseridos os laminados (técnica NSM) tinham dimensões de 5 mm de largura e 15 mm de profundidade.

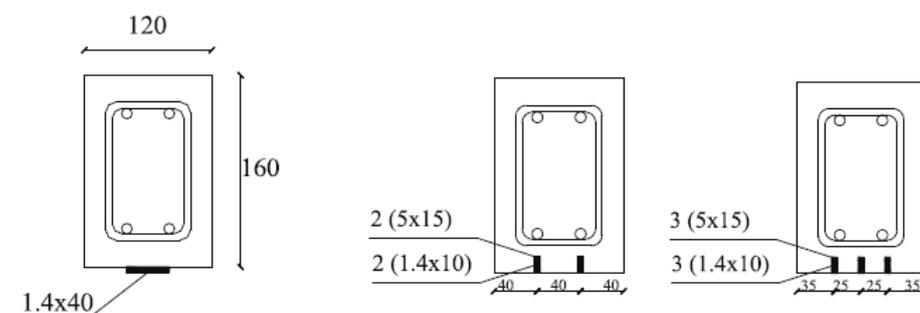


Figura 12 - Soluções de reforço de CFRP testadas por Bilotta *et al.* (2015), dimensões em mm.

De acordo com a Figura 13, Bilotta *et al.* (2015) concluíram que no sistema de cargas concentradas, o aumento da capacidade de carga em relação à viga de referência foi relevante para todos os tipos de reforço testados. As vigas reforçadas com a técnica EBR tiveram incrementos de capacidade de carga máxima que variou entre os 75% e os 81%, enquanto que com a técnica NSM usando 2 laminados e 3 laminados, os incrementos de capacidade de carga máxima foram 61% e 66%, respectivamente. As vigas reforçadas com a técnica NSM tiveram valores de capacidade de carga máxima semelhantes e ligeiramente inferiores aos das vigas reforçadas com a técnica EBR. No entanto, se se tiver em conta a quantidade de reforço de CFRP usado em cada viga, verifica-se uma maior eficiência da técnica de reforço NSM. Com efeito, de acordo com os valores da Tabela 2, o aumento de carga máxima por mm^2 de reforço de CFRP foi de 0,28 (valor médio das duas vigas) para a técnica EBR e 0,44 e 0,31 para a técnica NSM com 2 e 3 laminados, respectivamente. No caso das vigas com carregamento correspondente a cargas uniformemente distribuídas, o aumento de carga máxima por mm^2 de reforço de CFRP foi de 0,43 (valor médio das duas vigas) para a técnica EBR e 0,90 e 0,51 para a técnica NSM com 2 e 3 laminados, respectivamente. Desta forma, os autores deste estudo verificaram que independentemente do tipo de carregamento, a técnica NSM foi mais eficaz que a técnica EBR.

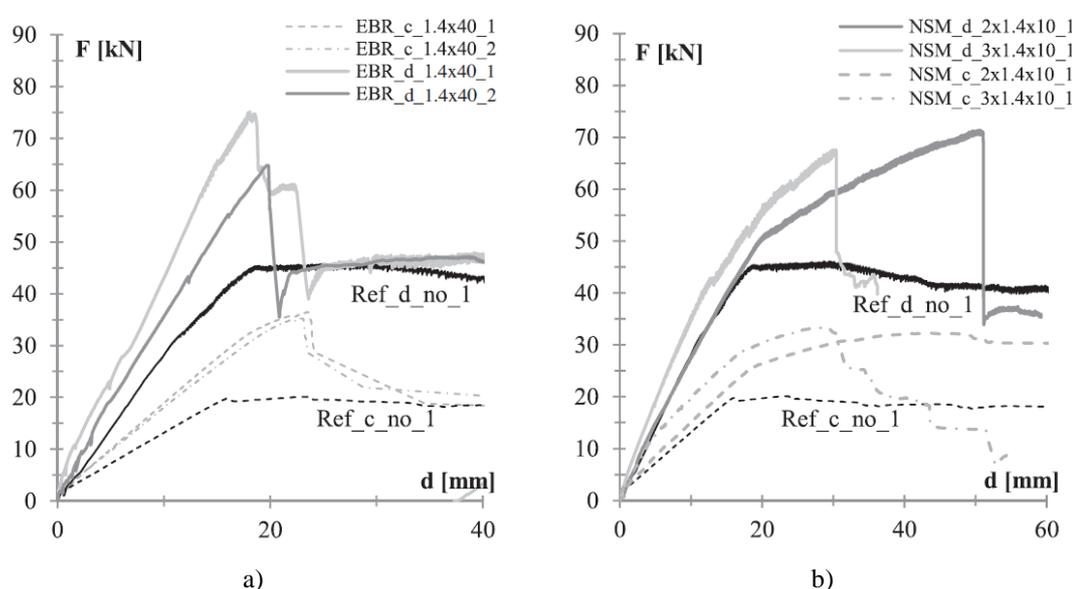


Figura 13 - Curvas força vs flecha a maio-vão para as vigas de referência e reforçadas com CFRP, para os dois tipos de carregamentos testados: a) vigas reforçadas com a técnica EBR, b) vigas reforçadas com a técnica NSM (Bilotta *et al.*, 2015).

Tabela 2 -Reforço à flexão de vigas de betão armado com CFRP: comparação do grau de eficácia da técnica NSM e da técnica EBR.

Tipo de Carregamento	Viga	Área de CFRP (mm^2)	Força máxima (kN)	Acréscimo de força máxima (kN)	Acréscimo de força máxima por mm^2 de CFRP aplicado (kN/mm^2)
Concentrado	Ref_c_nº_1	-	20,1	-	-
	EBR_c_1,4x10_1	56	36,5	16,4	0,29
	EBR_c_1,4x10_2	56	35,2	15,1	0,27
	NSM_c_2x1,4x10_1	28	32,3	12,2	0,44
	NSM_c_3x1,4x10_1	42	33,3	13,2	0,31
Distribuído	Ref_d_nº_1	-	46,1	-	-
	EBR_d_1,4x10_1	56	75,1	29,0	0,52
	EBR_d_1,4x10_2	56	64,8	18,7	0,33
	NSM_d_2x1,4x10_1	28	71,3	25,2	0,90
	NSM_d_3x1,4x10_1	42	67,6	21,5	0,51

No âmbito do reforço ao corte de vigas de betão armado, Dias e Barros (2010) desenvolveram um estudo experimental com vista a comparar a eficiência da técnica NSM usando laminados de CFRP com a técnica EBR recorrendo a mantas discretas de CFRP. Foram testadas três percentagens de reforço ao corte com a técnica NSM, sendo que para cada percentagem de CFRP foram analisadas três orientações para os laminados (45°, 60° e 90°). Para cada percentagem de laminados de CFRP testada havia uma viga em que o reforço ao corte foi executado com a técnica EBR.

Na Figura 14 apresenta-se o grau de eficácia das soluções de reforço testadas por Dias e Barros (2010) em termos do aumento percentual da capacidade de carga máxima proporcionado pelo CFRP. Da análise da Figura 14 verifica-se que a solução de laminados de CFRP a 45° foi a mais eficaz das orientações testadas, independentemente da percentagem de reforço (esta situação deveu-se ao facto da inclinação das fendas de corte surgirem numa direção aproximadamente ortogonal à direção dos laminados). As soluções com laminados de CFRP a 60° tiveram uma melhor prestação que as soluções de laminados de CFRP a 90°. Por outro lado, verificou-se ainda que as soluções de laminados inclinados, quando comparadas com as de laminados verticais, potenciaram melhores condições de aderência e consequentemente um melhor rendimento do CFRP. Conclui-se ainda que independente da orientação do reforço, os valores da capacidade de carga aumentam com a percentagem de reforço de CFRP. Neste estudo foi possível concluir que, tendo por base a viga não reforçada, as soluções com laminados permitiram um incremento médio da capacidade de carga máxima de 30,3% e as soluções com mantas a 10,4%. Em termos do nível de mobilização do reforço

de CFRP, verificou-se que para as vigas reforçadas com a técnica NSM, o valor médio da extensão máxima registada nos CFRP testados foi de 8,4%, ao passo que na técnica EBR, esse valor foi de 6,5%.

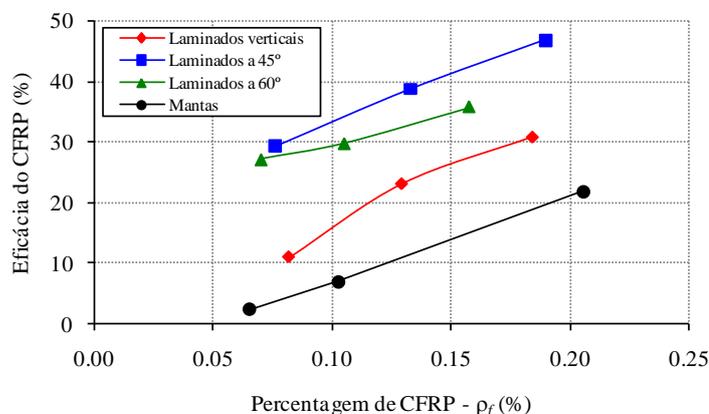


Figura 14 - Eficácia do reforço em termos de acréscimo de carga máxima vs percentagem de CFRP (Dias e Barros (2010)).

2.5. Reforço de vigas de betão armado com compósitos de CFRP

Com vista a uma melhor compreensão do comportamento de vigas de betão armado reforçadas com compósitos de CFRP à flexão, ao corte ou simultaneamente à flexão e ao corte, são apresentados de seguida, alguns dos estudos experimentais já desenvolvidos no âmbito desta temática.

2.5.1. Reforço à flexão de vigas de betão armado

Dias *et al.* (2006) realizaram um programa experimental com o objetivo de avaliar a viabilidade de soluções de reforço com compósitos de CFRP unidirecionais, adotando a técnica EBR. Assim, foram testadas seis vigas de betão armado, uma viga de referência (sem reforço de CFRP) e cinco reforçadas à flexão com CFRP por forma a terem capacidades resistentes similares. Em cada sistema de reforço testado (sistema curado “*in situ*” com mantas e sistema pré-fabricado com laminados) analisaram-se duas soluções de reforço à flexão, que se distinguiram pela adição ou ausência de mecanismos exteriores de fixação do reforço longitudinal de CFRP (no caso dos laminados o mecanismo de fixação situou-se nas extremidades e no caso das mantas era composto por três faixas em cada vão de corte de acordo com o apresentado na Figura 15 e Figura 16. A viga V1 foi de referência, as vigas V2 e V3 foram reforçadas com mantas de CFRP e as restantes três (V4, V5 e V6) foram reforçadas com laminados de CFRP (o betão das vigas tinha uma resistência à compressão de 41 MPa). A secção transversal adotada para os modelos de vigas testados foi retangular com dimensões 0,12x0,18 m², estando armadas longitudinalmente com dois varões de 8 mm de

diâmetro na face inferior, correspondendo a uma percentagem de armadura longitudinal de 0,54% ($\rho_{sl}=0,54\%$), e dois varões de 6 mm de diâmetro na face superior. Para evitar a rotura por corte foram colocados varões de 6 mm de diâmetro afastados de 100 mm ($\phi 6@100mm$), a que corresponde uma percentagem de armadura transversal de 0,47% ($\rho_{sw}=0,47\%$).

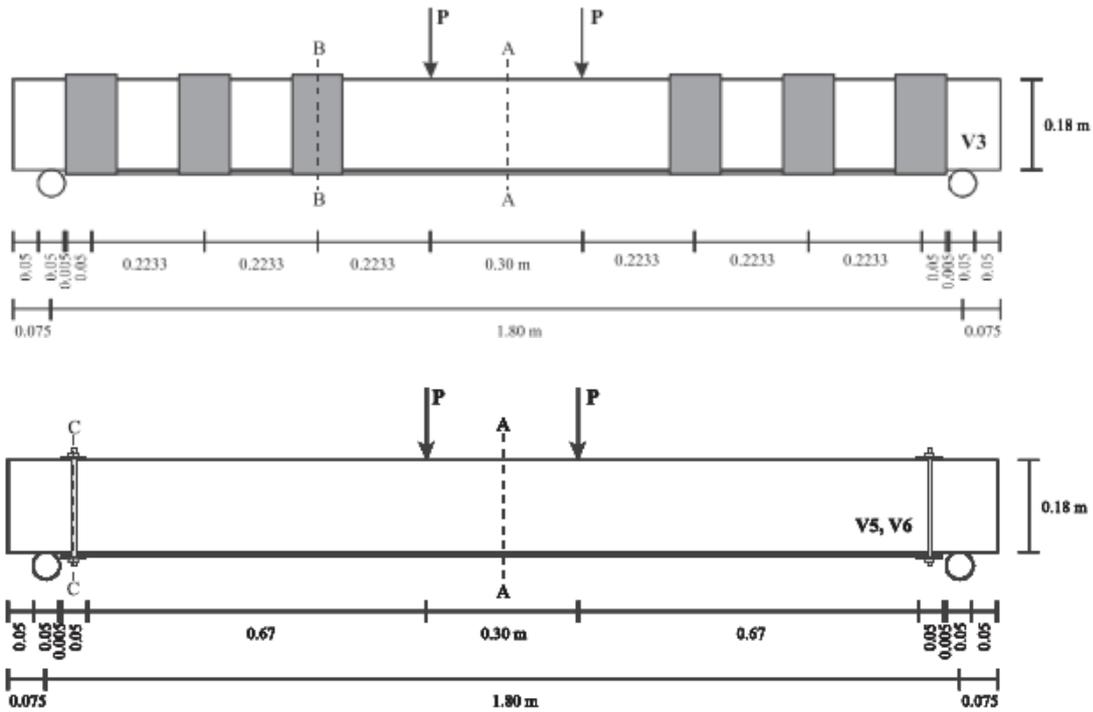


Figura 15 - Alçado das vigas com mecanismo de fixação que foram testadas por Dias *et al.* (2006).

Secção A-A			
<p>V2 e V3</p>	<p>V4, V5 e V6</p>		
Secção B-B			
<p>V3 (Mecanismo de fixação)</p>	<th colspan="2">Secção C-C</th>	Secção C-C	
<p>V5 e V6 (Mecanismo de fixação)</p>			

Figura 16 - Detalhes das secções transversais das vigas testadas por Dias *et al.* (2006).

Em termos de reforço de CFRP foi adotada uma quantidade (Figuras 15 e 16) que conduziu a um incremento na capacidade de carga máxima de cerca de 50% relativamente à viga de referência. Deste modo, para a solução de reforço com o sistema de manta flexível foram aplicadas duas camadas sobrepostas, de secção transversal $0,111 \times 70 \text{ mm}^2$, correspondendo a uma percentagem de reforço longitudinal de 0,04% ($\rho_{fl}=0,04\%$). Para a solução de reforço com o sistema pré-fabricado foi aplicada uma tira de laminado com $1,4 \times 20 \text{ mm}^2$, a que corresponde uma percentagem ρ_{fl} de 0,13%.

As percentagens de armadura e de reforço anteriormente apresentadas foram obtidas usando as seguintes equações:

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w \times d} \times 100 \quad (1)$$

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w \times s_w} \times 100 \quad (2)$$

$$\rho_{fl} = \frac{A_f}{A_c} \times 100 \quad (3)$$

em que:

A_{sl} - área da secção transversal dos varões de aço colocados longitudinalmente; b_w - largura da secção transversal da viga; d - altura útil da viga; A_{sw} - área resistente ao corte de cada um dos estribos de aço colocados na viga com um espaçamento s_w ; A_f - área do reforço; A_c - área da secção transversal da viga.

A Figura 17 apresenta as curvas de comportamento carga total vs deslocamento central das seis vigas ensaiadas. Da análise desta figura, verifica-se que a viga de referência apresentou três fases: (i) desde o início do carregamento até ao início da fendilhação do betão; (ii) desde a fendilhação do betão até à cedência das armaduras e (iii) após a cedência das armaduras até à rotura (patamar de cedência). Nas vigas reforçadas as primeiras duas fases anteriormente referidas são idênticas, apesar do início da fendilhação e da cedência das armaduras ocorrerem mais tarde. Na fase após a cedência das armaduras até à rotura existe um ganho significativo na capacidade de carga conferido pelo reforço.

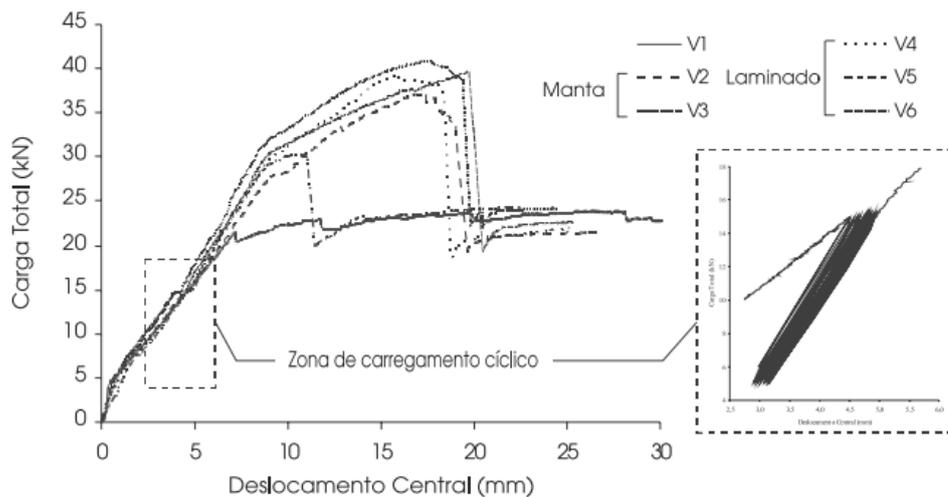


Figura 17 - Curvas carga total vs deslocamento central das vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2006).

Na Tabela 3 apresentam-se os principais resultados obtidos em cada uma das vigas testadas por Dias *et al.* (2006). Estes autores verificaram que existiu um aumento da carga de início de fendilhação para todas as vigas testadas com a exceção da V4. Comparativamente à viga de referência, o reforço das vigas com o compósito de CFRP proporcionou um acréscimo médio da carga correspondente à cedência das armaduras de 39% e uma carga máxima média 1,57 vezes superior. A aplicação do reforço permitiu também um aumento da rigidez em todas as vigas testadas. Pela análise da Tabela 3 verifica-se ainda que todas as vigas reforçadas tiveram como modo de rotura o destacamento do CFRP, com exceção da V3 onde ocorreu a rotura do CFRP.

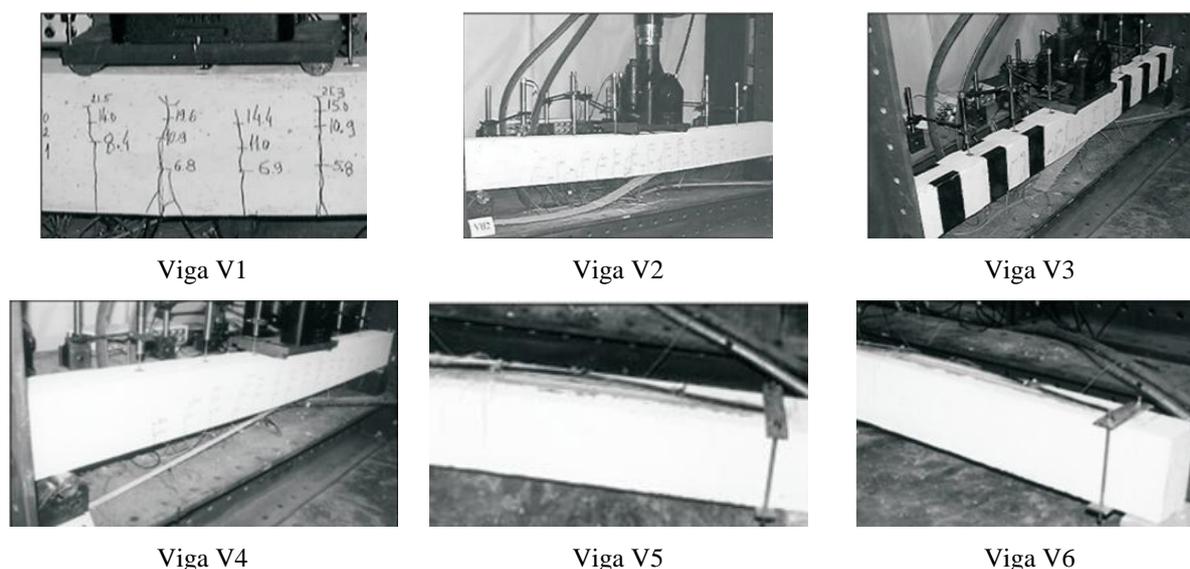
Foi ainda constatado que, no caso das mantas fixadas exteriormente com presilhas compostas por duas camadas de manta aplicadas discretamente ao longo do vão da viga (uma com as fibras orientadas a 0° e outra com as fibras orientadas a 90°), se verificou um acréscimo de deformação de 15% e um aumento da capacidade resistente de 7%, pelo que se torna recomendável para estes casos o seu uso. Por outro lado, o sistema de fixação adotado para os laminados mostrou-se pouco eficiente, uma vez que foi incapaz de evitar o destacamento do reforço. Este foi unicamente aplicado nas extremidades tal como apresentado na Figura 18, devendo ser aplicado discretamente ao longo do comprimento efetivo de ancoragem do CFRP.

Tabela 3 - Principais resultados de cada um dos modelos ensaiados por Dias *et al.* (2006).

Propriedades	Vigas					
	Manta			Laminado		
	V1	V2	V3 ⁽²⁾	V4	V5 ⁽²⁾	V6 ⁽²⁾
$F_{fend}(kN)$	4,47	5,0	5,36	4,20	5,75	6,4
$F_{fend}/F_{fend,V1}$	1,0	1,12	1,2	0,94	1,29	1,43
$F_{sy}(kN)$	21,18	28,39	29,8	28,75	29,38	31,0
$F_{sy}/F_{sy,V1}$	1,0	1,34	1,41	1,36	1,39	1,46
$u_{sy}(mm)$	7,2	9,2	8,8	9,0	9,1	8,6
$u_{sy}/a_{sy,V1}$	1,0	1,28	1,22	1,25	1,26	1,19
$F_{máx}(kN)$	23,87	37,19	39,64	39,22	30,33	40,81
$F_{máx}/F_{máx,V1}$	1,0	1,56	1,66	1,64	1,27	1,71
$u_{máx}(mm)^{(1)}$	41,37	17,16	19,74	15,62	10,69	17,35
$u_{máx}/\delta_{máx,V1}$	1,0	0,41	0,48	0,38	0,26	0,42
$\epsilon_{máx,CFRP}(\%)$	---	8,1	8,7	6,9	4,1	7,2
$\epsilon_{máx}/\epsilon_{u,CFRP}(\%)$	---	54	58	63	37	65
Modos de rotura (ver Figura 18)	Esmagamento do betão	Destacamento do CFRP na interface com o betão	Rotura do CFRP	Destacamento do CFRP pelo adesivo e pelo betão	Destacamento do CFRP pela ligação adesivo/CFRP e perda de ancoragem	Destacamento do CFRP pelo adesivo e pelo betão e perda de ancoragem

⁽¹⁾ Para a viga V1 corresponde à carga de rotura; ⁽²⁾ Modelos com mecanismos exteriores de fixação do CFRP.

F_{fend} - carga de início de fendilhação; F_{sy} - carga de cedência do aço; u_{sy} - flecha aquando da cedência do aço; $F_{máx}$ - carga máxima; $u_{máx}$ - flecha aquando da carga máxima; $\epsilon_{máx}$ - extensão máxima registada nos extensómetros colados no CFRP; ϵ_u - extensão última do CFRP.

Figura 18 - Modos de rotura das vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2006).

No âmbito da avaliação do desempenho de vigas de betão armado reforçadas à flexão com recurso à técnica de inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento, Dias *et al.* (2012) conceberam e ensaiaram quatro vigas: uma de referência sem reforço e as restantes três reforçadas com um laminado, com dois laminados e com três laminados de CFRP (o betão das vigas tinha uma resistência à compressão de 50,2 MPa). A secção transversal retangular adotada para os modelos de vigas testados tinham dimensões 0,15×0,3 m², estando

armadas longitudinalmente com dois varões de 10 mm de diâmetro na face inferior ($\rho_{st}=0,38\%$), e dois varões de 8 mm de diâmetro na face superior (Figura 19). Para evitar a rotura por corte foram colocados varões de 6 mm de diâmetro afastados de 75 mm ($\rho_{sw}=0,50\%$). Os laminados utilizados para o reforço das vigas tinham uma secção transversal de $1,4 \times 10 \text{ mm}^2$ ($\rho_{fl}= 0,03\%$ por laminado de CFRP aplicado), um comprimento de 2300 mm e as secções de interrupção dos laminados nas vigas ensaiadas estavam localizadas a 50 mm dos apoios (Figura 20).

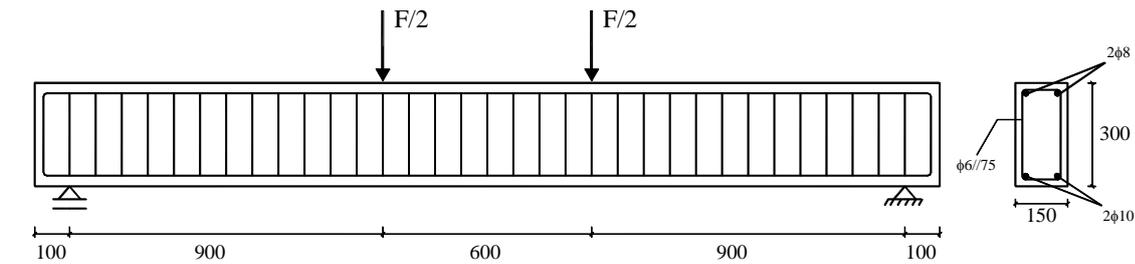


Figura 19 - Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço comuns a todas as vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012) (dimensões em mm).

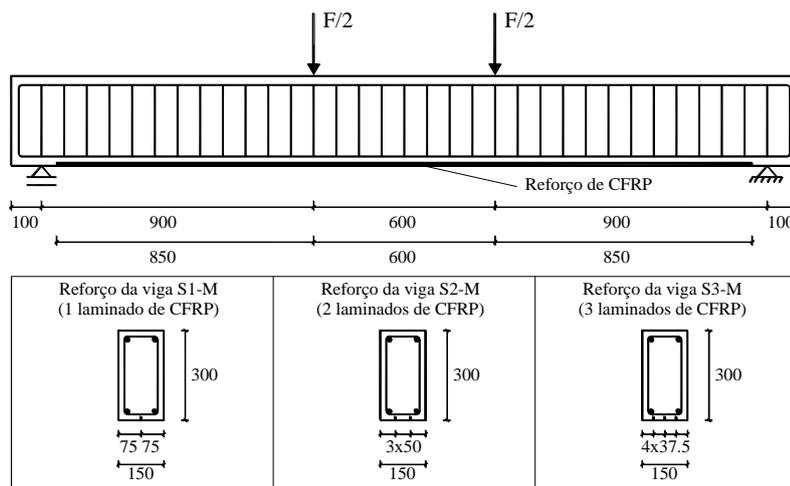


Figura 20 - Soluções de reforço com CFRP das vigas testadas por Dias *et al.* (2012) (dimensões em mm).

A Figura 21 apresenta a relação força *versus* flecha a meio vão das quatro vigas ensaiadas com um carregamento monotónico até à rotura. As curvas apresentadas refletem o comportamento das vigas desde o início do carregamento até ao instante em que se verifica a capacidade de carga máxima. Como se pode verificar, as vigas apresentaram um comportamento típico com três fases bem definidas: (i) betão não fendilhado; (ii) betão fendilhado com o aço não plastificado e (iii) betão fendilhado após cedência do aço das armaduras longitudinais. À semelhança do que verificou no comportamento das vigas reforçadas com CFRP aplicado com a técnica EBR, anteriormente apresentado (Figura 17), também nas vigas reforçadas com laminados de CFRP inseridos se verificou que após a

cedência das armaduras longitudinais apenas o reforço de CFRP contribui para o aumento da capacidade resistente das vigas (motivo pelo qual o patamar da curva da viga de referência é substituído pelo troço retilíneo ascendente do compósito).

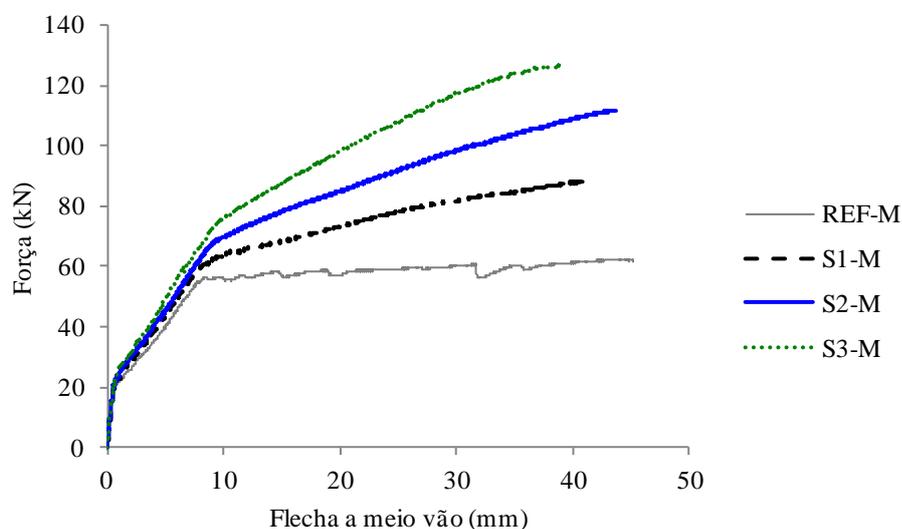


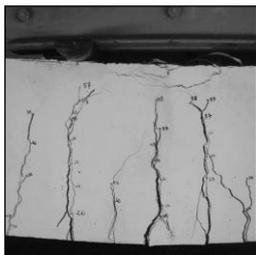
Figura 21 - Relação força vs flecha a meio vão das vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012).

Na Tabela 4 apresentam-se os resultados obtidos em termos da carga de início de fendilhação do betão (F_{fend}), da carga correspondente à cedência das armaduras de aço (F_{sy}), da carga máxima ($F_{máx}$) e a respetiva flecha a meio vão ($u_{máx}$), do acréscimo percentual da carga de cedência das armaduras e da carga máxima, assim como os valores da extensão máxima registada no CFRP. Em função dos resultados apresentados na Tabela 4 e na Figura 21, os autores concluíram que, independentemente da percentagem de reforço utilizada, a técnica NSM com laminados de CFRP aplicada no reforço à flexão de vigas de betão armado, proporcionou um incremento da capacidade de carga das vigas. Relativamente à carga de início de fendilhação, verificou-se um acréscimo com o aumento da quantidade de reforço que variou entre os 4% e os 19%. Em termos de carga de cedência das armaduras as soluções de reforço proporcionaram aumentos tão maiores quanto maior a percentagem de CFRP, variando entre 10% e 34%. Para a carga máxima os resultados obtidos mostraram que as soluções de reforço testadas permitiram aumentos que variaram entre os 42% na viga S1-M e 103% na viga S3-M. Mesmo com o destacamento do reforço nas vigas reforçadas com dois e três laminados (na viga reforçada com um laminado ocorreu rotura do CFRP – ver Figura 22), o valor médio da extensão máxima do CFRP foi de 16,7%, mostrando ter existido um elevado grau de mobilização/aproveitamento do reforço (à volta de 93%), valores estes bastantes superiores ao alcançado por Dias *et al.* (2006) com vigas reforçadas com CFRP aplicados com a técnica EBR.

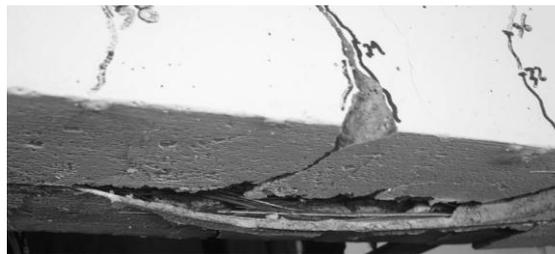
Tabela 4 - Resultados da capacidade de carga das vigas testadas por Dias *et al.* (2012).

Vigas	F_{fend} (kN)	F_{sy} (kN)	Acréscimo da carga de cedência das armaduras (%)	$F_{máx}$ (kN)	Acréscimo da carga máxima (%)	$u_{Fmáx}$ (mm)	Extensão máxima registada no CFRP (‰) ⁽¹⁾
REF-M	20,1	56,6	---	62,3	---	45,1	---
S1-M	21,0	62,4	10	88,4	42	41,2	17,9 (99%)
S2-M	22,2	69,5	23	111,9	80	43,6	17,4 (97%)
S3-M	24,0	76,0	34	126,6	103	38,9	14,9 (83%)

⁽¹⁾ Nível de mobilização do CFRP (Extensão máxima registada no CFRP/ ϵ_{fu} x100, em que ϵ_{fu} =18‰).



Viga de referência sem reforço



Viga reforçada com um laminado



Viga reforçada com dois laminados



Viga reforçada com três laminados

Figura 22 - Modos de rotura ocorridos nas vigas testadas por Dias *et al.* (2012).

Para além deste estudo, em todos os outros estudos realizados no âmbito do reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso à técnica NSM com laminados de CFRP, ficou comprovado o elevado desempenho desta técnica de reforço (Barros e Fortes, 2005; Kotynia, 2007; Barros e Kotynia, 2008, Bilotta *et al.*, 2015). Barros e Kotynia (2008) verificaram existir uma tendência para a diminuição da eficácia do reforço com o aumento da percentagem de reforço equivalente e que existe uma tendência do aumento do nível de mobilização do reforço de CFRP com o aumento da relação entre espaçamento dos laminados e a largura da viga (s_f/b) (Figura 23).

Os estudos realizados até ao presente permitem verificar que a eficiência da técnica NSM com laminados de CFRP também é influenciada por parâmetros como a percentagem de armadura longitudinal, a percentagem de CFRP, a classe de resistência do betão, o tipo de carregamento, o espaçamento entre laminados adjacentes, a distância do laminado à face do

elemento a reforçar, a distância a que o reforço fica do apoio, o tipo de laminado, o tipo de adesivo e a espessura da camada do adesivo.

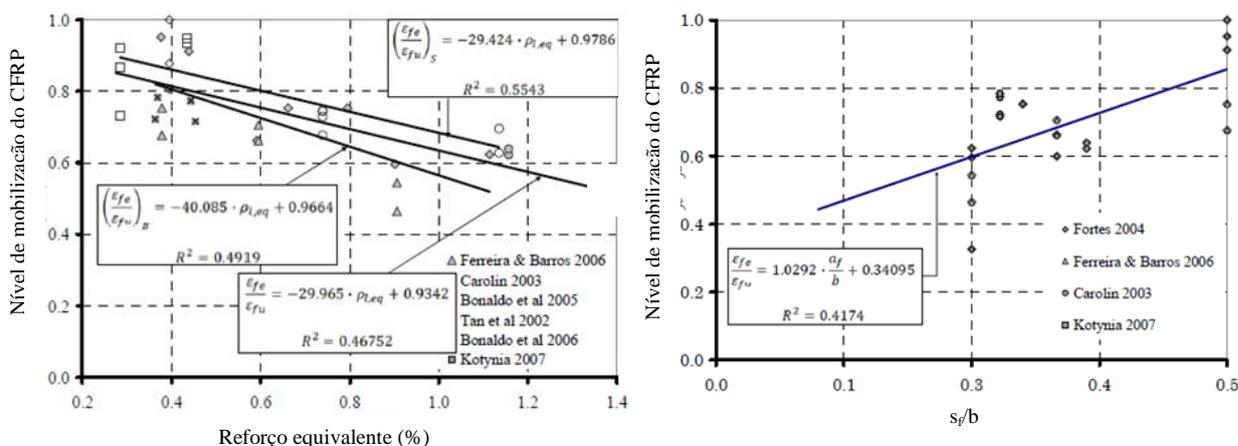


Figura 23 - Influência no nível de mobilização do CFRP (Barros e Kotynia, 2008).

2.5.2. Reforço ao corte de vigas de betão armado

No âmbito do reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP aplicados segundo a técnica EBR, Mofidi e Chaallal (2014) levaram a cabo um programa experimental com vista a avaliar o comportamento de doze vigas de betão armado, testadas à flexão em três pontos de carga. As vigas tinham um comprimento de 4520 mm, um vão de 3110 mm e a carga foi aplicada a 1050 mm medidos a partir do apoio da direita, tal como representado na Figura 24. A secção transversal das vigas era em T, o banzo tinha 508 mm de largura e 102 mm de altura e a alma tinha 152 mm de largura e 304 mm de altura.

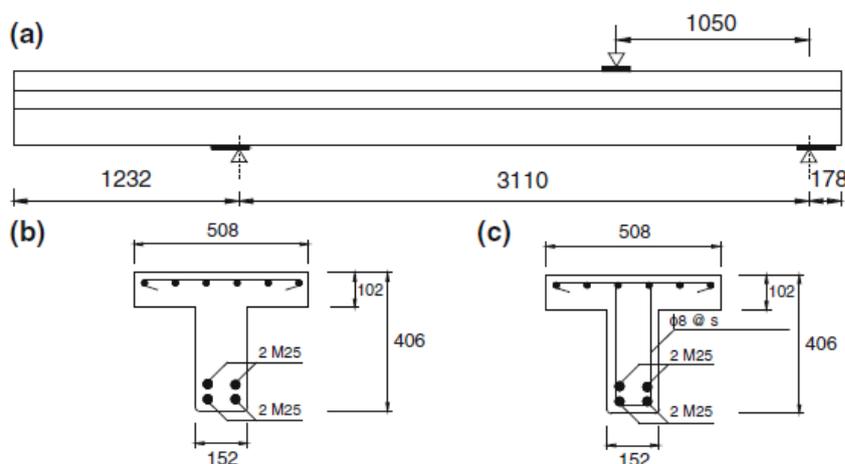


Figura 24 - Detalhes das vigas ensaiadas por Mofidi e Chaallal (2014): a) alçado, b) secção transversal das vigas sem estribos, c) secção transversal das vigas com estribos.

As vigas foram divididas em dois grupos distintos, o grupo de vigas sem armaduras de esforço transversal (grupo NT) e o grupo de vigas com armaduras de esforço transversal (grupo WT), sendo este composto por estribos de 8 mm de diâmetro espaçados de 175 mm ($\rho_{sw}=0,38\%$). Relativamente à armadura longitudinal, na face tracionada todas as vigas continham quatro varões de 25 mm de diâmetro ($\rho_{sl}=3,69\%$). A resistência média do betão à compressão em cilindros à data da realização dos ensaios era de 31 MPa.

Das doze vigas ensaiadas duas eram de referência, não contendo reforço de CFRP (vigas RF), três foram reforçadas com mantas de CFRP aplicadas de forma contínua (vigas SH) e as restantes sete foram reforçadas com faixas discretas de manta de CFRP (vigas ST). A identificação de cada uma das vigas foi completada com a percentagem de área da viga coberta pelo reforço, dada pela relação entre a faixa de manta e o seu espaçamento vezes cem ($((w_f/s_f)\times 100)$), assim por exemplo, a designação WT-ST-70 correspondia a uma viga com armadura de esforço transversal (WT), reforçada com faixas discretas de manta de CFRP (ST) de 87,5 mm de largura e espaçadas de 125 mm ($((w_f/s_f)\times 100=70)$).

Os parâmetros estudados pelos autores foram: a influência da existência ou não de armadura transversal na contribuição do reforço ao corte de CFRP; a influência da largura das faixas de manta de CFRP e o respetivo espaçamento e a eficácia do reforço ao corte de CFRP com mantas aplicadas de forma contínua vs eficácia do reforço ao corte de CFRP com faixas discretas de manta.

Na Tabela 5 e na Figura 25 apresentam-se os resultados experimentais obtidos nos modelos ensaiados por Mofidi e Chaallal (2014), nomeadamente ao nível de força máxima ($F_{máx}$), dos esforços transversais resistentes conferidos pelo betão (V_c) pelo aço (V_s) e pelo reforço (V_f), o ganho conferido pelo FRP e o deslocamento máximo.

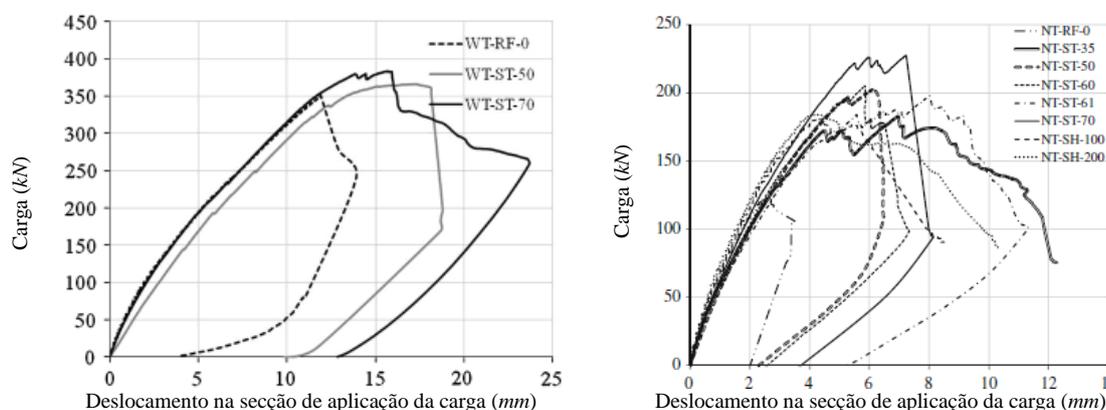


Figura 25 - Relação força vs deslocamento das vigas ensaiadas por Mofidi e Chaallal (2014).

Tabela 5 - Resultados obtidos por Mofidi e Chaallal (2014).

Viga	w_f/s_f	$F_{máx}$ (kN)	V_{total} (kN)	V_c (kN)	V_s (kN)	V_f (kN)	Ganho conferido pelo CFRP(%)	u (mm)
NT-RF-0	---	122,7	81,2	81,2	0	0	0	2,60
NT-ST-35	40/115	182,6	120,9	81,2	0	39,7	49	6,95
NT-ST-50	87,5/175	203,1	134,5	81,2	0	53,3	66	6,16
NT-ST-60	30/50	197,9	131,1	81,2	0	49,9	61	8,03
NT-ST-61	53/87,5	204,9	135,7	81,2	0	54,5	67	5,85
NT-ST-70	87,5/125	227,3	150,6	81,2	0	69,3	85	7,23
NT-SH-100	1 ⁽¹⁾	181,2	120	81,2	0	38,7	48	4,20
NT-SH-200	1 ⁽¹⁾	183,8	121,7	81,2	0	40,4	50	4,10
WT-RF-0	---	350,6	232,2	81,2	151,0	0	0	11,90
WT-ST-50	87,5/175	372,5	246,7	81,2	151,0	14,5	6	15,93
WT-ST-70	87,5/125	383,4	253,9	81,2	151,0	21,7	9	15,73
WT-SH-100	1 ⁽¹⁾	378,3	250,6	81,2	151,0	18,4	8	15,24

⁽¹⁾ Viga com reforço ao corte de CFRP aplicado continuamente.

Os autores concluíram que o reforço com compósitos de CFRP proporcionou um aumento da capacidade de carga resistente das vigas de betão armado (em média 61% para as vigas sem estribos e 6,7% para as vigas com estribos). Além disso, verificaram que o reforço aplicado de forma contínua foi menos eficaz que o reforço aplicado de forma discreta e que a eficácia da técnica EBR no reforço ao corte de vigas de betão armado diminuiu com o aumento da percentagem da armadura transversal. O modo de rotura que se verificou nas vigas reforçadas foi o destacamento do reforço de CFRP (Figura 26).



Por corte NT-RF-0



Por destacamento do reforço de CFRP NT-SH-100



Por destacamento do reforço de CFRP NT-ST-35



Por destacamento do reforço de CFRP NT-SH-200

Figura 26 - Modos de rotura verificados por Mofidi e Chaallal (2014).

No trabalho de investigação de Dias (2008) foi realizada uma investigação experimental sobre o reforço ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP recorrendo à técnica NSM. Foram testadas quatro séries de vigas de betão armado com secção transversal em T (A, B, C e D) cujas características se encontram registadas na Tabela 6 (ver também Figura 27): percentagem de armadura longitudinal (ρ_{sl}), percentagem de reforço de CFRP (ρ_f), orientação do reforço de CFRP (θ_f), percentagem de armadura transversal (ρ_{sw}), valor medio da resistência à compressão do betão à data do ensaio das vigas (f_{cm}) e da relação a/d (relação entre o vão de corte a e a altura útil das armaduras longitudinais d).

As vigas foram testadas com três pontos de carga e foi ainda imposta para todas as vigas a rotura no vão de corte a (Figura 27). Para isso as vigas foram suficientemente estribadas no outro vão de corte b . Em cada uma das séries de vigas testadas as diferenças entre vigas ficaram restritas aos elementos resistentes ao esforço transverso existentes vão de corte a .

Tabela 6 - Parâmetros avaliados nas quatro séries de vigas testadas por Dias (2008).

Série	ρ_{fw} (%)	θ_f (°)	ρ_{sw} (%)	f_{cm} (MPa)	a/d		
A ($\rho_{sl}=2,9\%$)	0,06	90	45	60	0,10	31,1	2,5
	0,09-0,1						
	0,13-0,16						
B ($\rho_{sl}=2,8\%$)	0,07-0,08	90	45	60	0,10	39,7	2,5
	0,11-0,13						
	0,16-0,19						
C ($\rho_{sl}=2,8\%$)	0,07-0,08	90	45	60	0,10	18,6	2,5
	0,11-0,13						
	0,07-0,08						
D ($\rho_{sl}=2,8\%$)	0,11-0,13	---	45	60	0,17	18,6	2,5
	0,07-0,08						
	0,11-0,13						
D ($\rho_{sl}=2,8\%$)	0,07-0,08	90	45	60	0,10	59,4	3,3
	0,11-0,13						
	0,07-0,08						
D ($\rho_{sl}=2,8\%$)	0,11-0,13	---	45	60	0,17	59,4	3,3
	0,07-0,08						

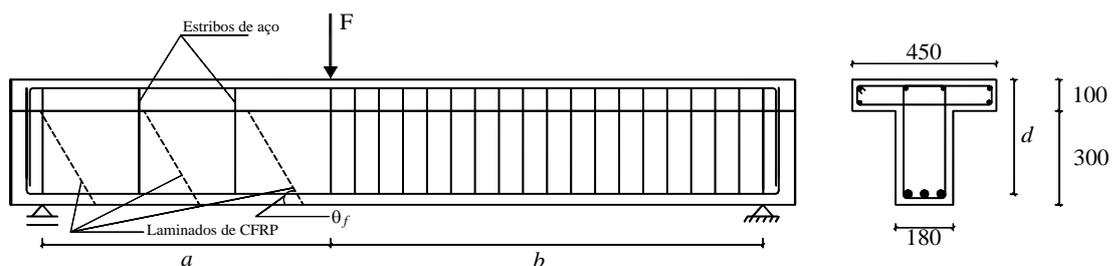


Figura 27 - Dados gerais sobre as vigas ensaiadas por Dias (2008) (dimensões em mm).

Na Figura 28 apresenta-se o comportamento típico de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos que é comparado com o da viga sem reforço. As curvas de comportamento apresentam duas fases distintas, a primeira, até ao momento em que se formam as fendas de corte na viga sem CFRP (o diagrama do comportamento da viga não reforçada é similar ao diagrama do comportamento da viga com CFRP) e a segunda fase, onde a contribuição conjugada do CFRP com os estribos restringem mais eficazmente o desenvolvimento das fendas de corte, o que se traduz num aumento de rigidez relativamente à viga não reforçada. Para as percentagens de CFRP estudadas neste trabalho de um modo geral a rigidez aumenta com a percentagem de CFRP. Na segunda fase da curva de comportamento, para cada nível de deslocamento, as vigas reforçadas possuem uma capacidade de carga superior à da correspondente viga de referência.

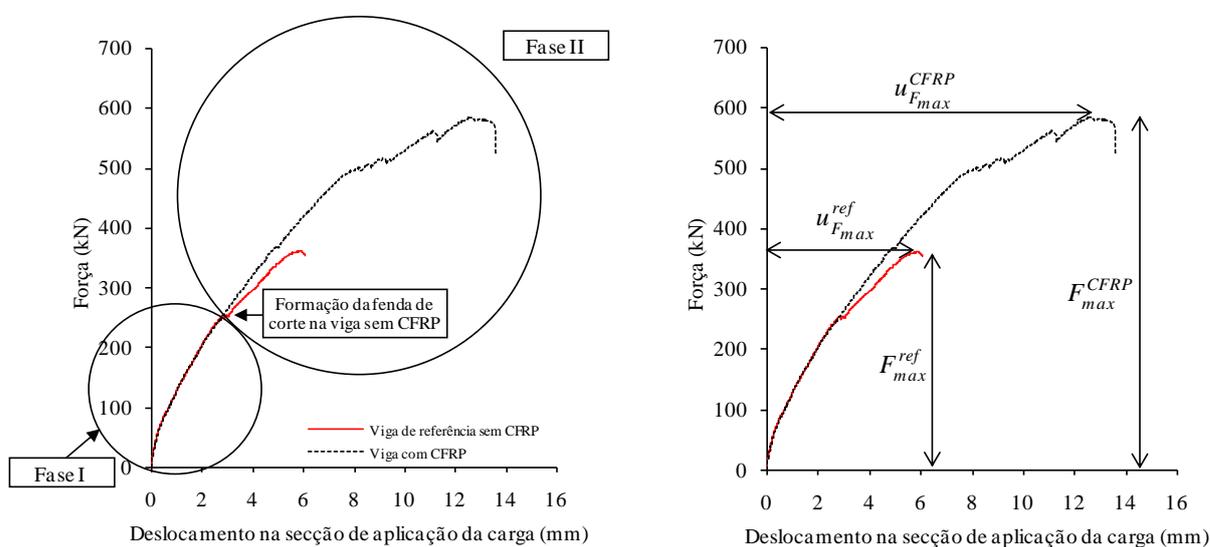


Figura 28 - Comparação do comportamento de uma viga reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos com o de uma viga não reforçada (Dias, 2008).

Após o ensaio das quatro séries de vigas de betão armado reforçadas ao corte com a técnica NSM, verificou-se que os modos de rotura foram condicionados pela resistência do betão. Nas séries A e B (séries com betões de classe de resistência média) e C (série com betões de classe de resistência baixa), o modo de rotura foi a cedência do reforço devido ao destacamento do betão adjacente ao CFRP, sendo que este modo de rotura é retardado à medida que a classe de resistência do betão melhora. Relativamente à série D, onde as vigas tinham um betão com uma classe de resistência mais elevada, o elemento condicionante do modo de rotura deixou de ser o betão e passou a ser a ligação adesivo-CFRP, uma vez que se verificou o escorregamento do CFRP, ou até mesmo a rotura do CFRP. Deste modo, para classes de resistência de betão mais elevadas, existem aumentos mais significativos no desempenho do

sistema de reforço de CFRP e no desempenho das vigas reforçadas (nesta série ocorreu o maior grau de mobilização do reforço que, de acordo com a Tabela 7, foi de 71%).

De salientar ainda que a aplicação de elevadas percentagens de CFRP, pode originar uma rotura por efeito de grupo, penalizando a rentabilidade do sistema de reforço. Com efeito, nestes casos não se verificou uma cedência individual do laminado atravessado pelas fendas de corte, mas sim, o destacamento de uma parede de “betão mais CFRP”.

Tabela 7 - Valores máximos das extensões registadas nos laminados de CFRP instrumentados (Dias, 2008).

Grau de mobilização do CFRP	Série A ($f_{cm}=31,1MPa$)	Série B ($f_{cm}=39,7MPa$)	Série C ($f_{cm}=18,6MPa$)	Série D ($f_{cm}=59,4MPa$)
Valor médio da extensão máxima registada nos extensómetros colados no CFRP (%)	8,5	8,3	7,2	11,6
Extensão máxima registada nos extensómetros colados no CFRP (%)	11,1	10,8	9,4	15,0
Nível de rendimento do reforço (%)	48	52	44	71

Dias (2008) também verificou que outro parâmetro que influencia o desempenho da técnica de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos é a percentagem de armadura transversal verificando-se que o reforço foi mais eficaz quando aplicado a vigas com menor percentagem de armadura (Figura 29). Foi ainda possível concluir que maiores percentagens de reforço de CFRP proporcionaram maiores aumentos na capacidade resistente ao esforço transversal das vigas de betão armado (Figura 30) e que os laminados inclinados foram mais eficazes que os laminados verticais.

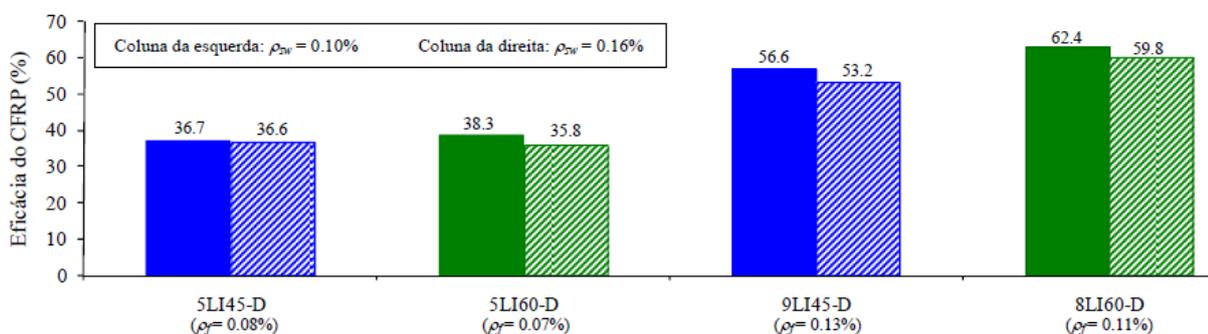


Figura 29 - Efeito da percentagem de armadura transversal (vigas da série D) (Dias, 2008).

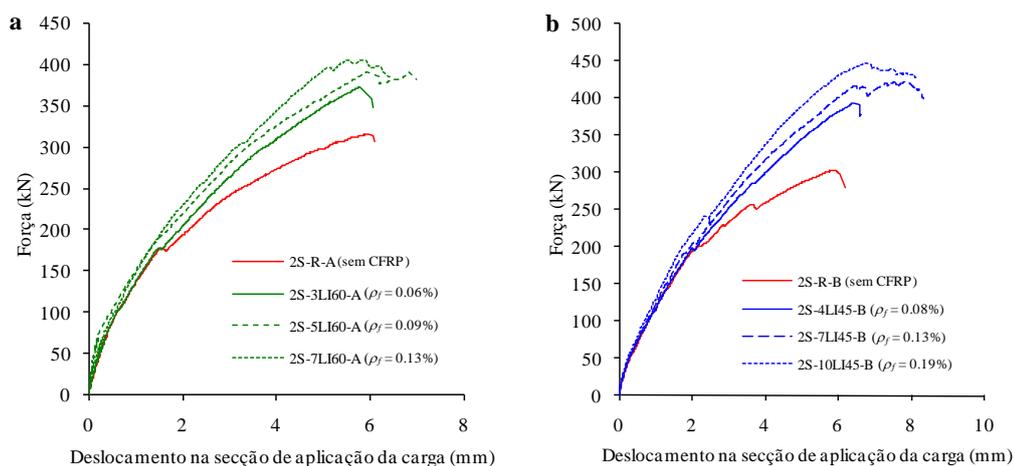


Figura 30 - Efeito da percentagem de CFRP: a) três percentagens de reforço com laminados a 60°, b) três percentagens de reforço com laminados a 45° (Dias, 2008).

2.5.3. Reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado

Uma intervenção de reforço à flexão origina um incremento da capacidade de carga em termos de flexão do elemento reforçado, pelo que é necessário verificar se esse elemento tem capacidade de resistir às novas forças de corte associadas ao referido incremento de capacidade de carga, para o qual o elemento não foi inicialmente dimensionado. Deste modo, o reforço à flexão de um elemento estrutural pode levar à necessidade de reforço ao esforço transversal.

Dias e Barros (2005) realizaram um programa experimental que consistiu no ensaio de 16 vigas de betão armado de secção transversal em T, algumas delas reforçadas simultaneamente à flexão e ao corte com laminados de CFRP aplicados segundo a técnica NSM. Todas as vigas tinham estribos de 6 mm de diâmetro espaçados de 75 mm ($\rho_{sw}=0,21\%$) no vão de corte b (maior vão de corte), por forma a impor a rotura por corte no vão a (menor vão de corte), onde foi colocado o reforço de CFRP para aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal (Figura 31 e Figura 32). Longitudinalmente as vigas tinham na face tracionada três varões de 25 mm de diâmetro ($\rho_{sl}=2,27\%$) e as que foram reforçadas à flexão (12 vigas) tinham quatro laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM ($\rho_f=0,01\%$). Tanto no reforço à flexão como no reforço ao corte, foram utilizados laminados com $1,4 \times 10 \text{ mm}^2$ de secção transversal. O betão das vigas tinha um valor médio de resistência à compressão de 47,9 MPa. Na Tabela 8 apresentam-se as características das vigas testadas e os resultados obtidos em termos da força máxima (F_{max}), da força correspondente a uma flecha na secção de aplicação da carga de $l/400$ ($F_{l/400}$), em que o l é o vão da viga (2250 mm), da flecha na secção de aplicação da carga correspondente à força máxima (u_{max}) e do modo de rotura.

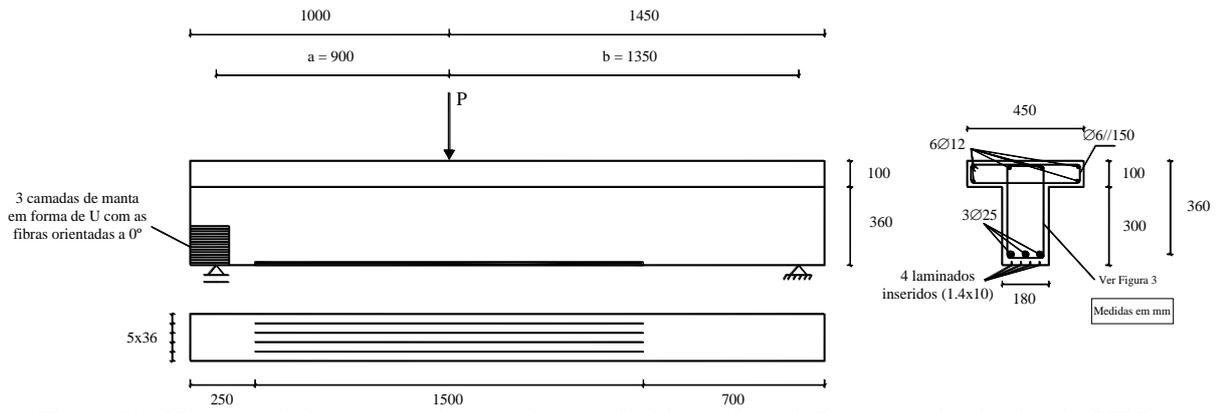


Figura 31 - Vigas ensaiadas: geometria, armaduras ordinárias, reforço à flexão com laminados de CFRP e reforço com manta de CFRP do canto inferior esquerdo (Dias e Barros, 2005).

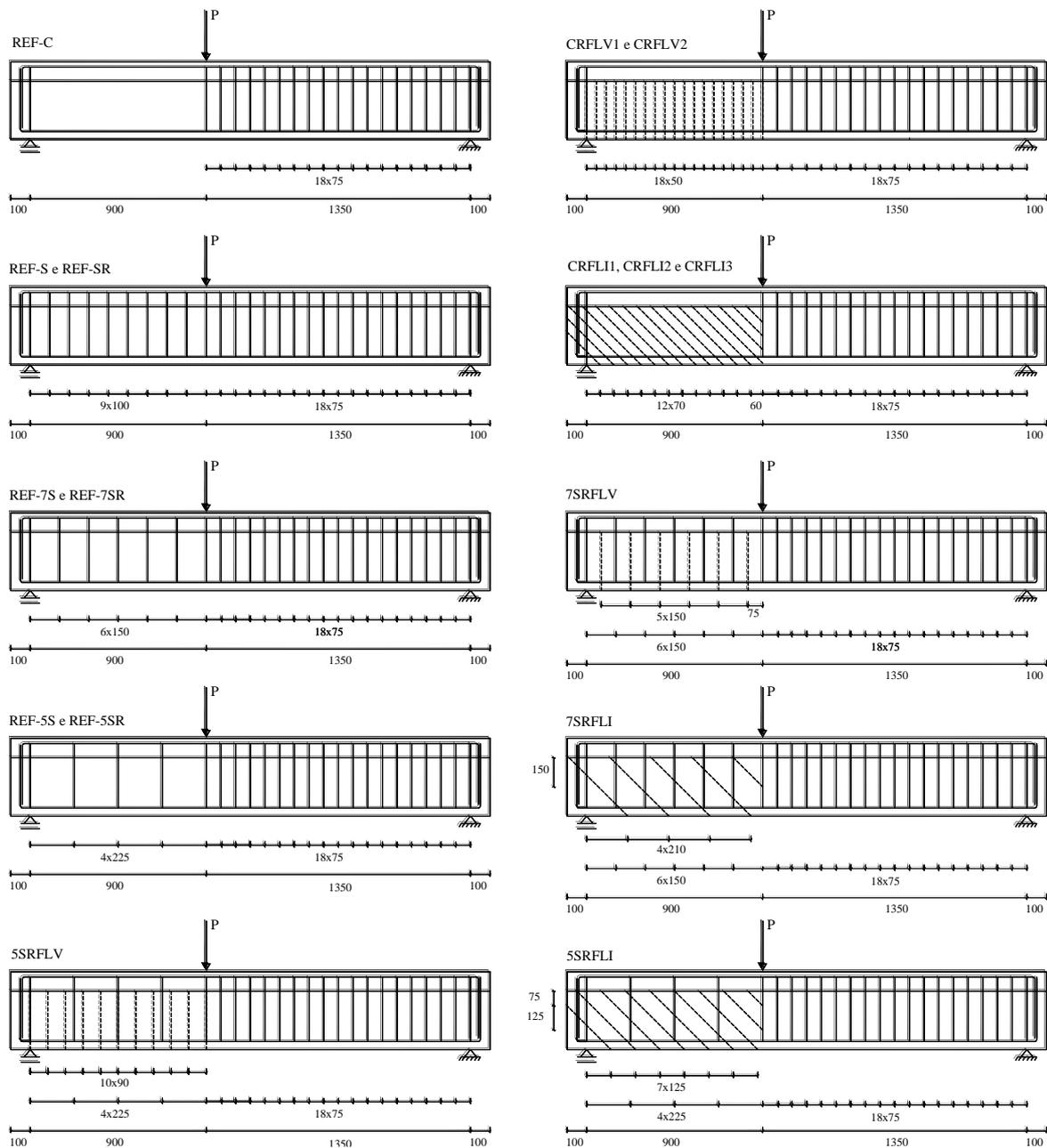


Figura 32 - Vigas ensaiadas por Dias e Barros (2005): localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado).

Tabela 8 - Principais resultados obtidos de cada um dos modelos ensaiados (Dias e Barros, 2005).

Vigas	Reforço à flexão	Reforço ao corte	$F_{l/400}$ (kN)	$F_{máx}$ (kN)	$u_{máx}^{(2)}$ (mm)	Modo de rotura
REF-C	Não	---	(1)	177,6	3,14	Corte
REF-S	Não	Estribos de aço (100%)	341,7	451,7	40,74	Flexão
REF-7S	Não	Estribos de aço (70%)	349,9	429,6	8,33	Corte
REF-5S	Não	Estribos de aço (50%)	359,4	432,1	7,81	Corte
REF-SR	Sim	Estribos de aço (100%)	386,7	488,1	13,39	Corte (cedência da armadura)
REF-7SR	Sim	Estribos de aço (70%)	338,6	392,7	8,42	Corte
REF-5SR	Sim	Estribos de aço (50%)	373,6	404,2	8,92	Corte
CRFLV1	Sim	Laminados de CFRP	(1)	338,3	4,81	Corte
CRFLV2	Sim	Laminados de CFRP	(1)	345,9	5,22	Corte
CRFLI1	Sim	Laminados de CFRP	416,9	423,2	5,88	Corte
CRFLI2	Sim	Laminados de CFRP	410,0	416,4	5,88	Corte
CRFLI3	Sim	Laminados de CFRP	427,7	436,7	5,83	Corte
7SRFLV	Sim	Estribos de aço (70%) + Laminados de CFRP	386,0	503,9	18,57	Flexão
7SRFLI	Sim	Estribos de aço (70%) + Laminados de CFRP	386,2	>475,7 ⁽³⁾	>10,80	Destacamento do betão no canto inferior esquerdo
5SRFLV	Sim	Estribos de aço (50%) + Laminados de CFRP	380,3	437,9	7,30	Corte
5SRFLI	Sim	Estribos de aço (50%) + Laminados de CFRP	406,1	>504,5 ⁽³⁾	>14,98	Não atingiu a rotura por limitação do equipamento

⁽¹⁾ A flecha corresponde a $l/400=5,625 \text{ mm}$ só foi atingida após $F_{máx}$; ⁽²⁾ Deslocamento na secção de aplicação da carga referente a $F_{máx}$;

⁽³⁾ Vigas que não atingiram a sua capacidade máxima de carga.

Na análise de resultados, os autores verificaram que a aplicação da técnica de reforço ao corte (NSM com laminados de CFRP) pode ser efetuada em vigas de betão armado com e sem estribos de aço. Foi verificado que o reforço ao corte com laminados inclinados a 45° foi mais eficaz que o reforço ao corte com laminados na vertical. Os autores verificaram que em relação ao reforço simultâneo à flexão e ao corte é necessário ter em conta as interações

existentes, nomeadamente, a influência no comportamento do elemento reforçado na zona de interrupção do reforço longitudinal com laminados de CFRP. Em termos de carga máxima, o reforço à flexão permitiu incrementos de pelo menos 12%.

Na Figura 33 apresenta-se o modo de rotura das vigas ensaiadas que obtiveram maior capacidade de carga máxima: a viga 5SRFLV, com modo de rotura por corte, e a viga 7SRFLV com modo de rotura por flexão. Com efeito, nesta última viga verificou-se que o seu desempenho foi condicionado pelo destacamento do reforço longitudinal de CFRP.



Figura 33 - Modos de rotura das vigas com maior capacidade de carga máxima (Dias e Barros, 2005).

Ainda no contexto de reforços à flexão e ao corte com CFRP, Barros *et al.* (2010) desenvolveram investigação experimental com o objetivo de avaliar a eficácia de uma solução de reforço com CFRP que visava aumentar a resistência tanto à flexão como ao corte de vigas de betão armado. O programa experimental foi constituído por três séries de vigas de betão armado de secção transversal retangular ($b \times h$) de acordo com o representado na Figura 34 e Tabela 9: VRi – viga de betão armado de referência; VEi – Viga igual à anterior, mas com o ramo inferior do estribo cortado; VLi – Viga igual a VEi mas reforçada à flexão com laminados de CFRP aplicados segundo a técnica NSM; VLMi – Viga igual à VLi, mas reforçada ao corte com faixas de mantas de CFRP aplicados em U usando a técnica EBR (em que $i=1, 2$ e 3 respetivamente para as séries 1, 2 e 3). Relativamente às armaduras longitudinais, todas as vigas continham $\rho_{sl}= 0,37\%$. Em termos de armaduras transversais foram usadas as seguintes soluções: Série 1 - estribos com varões de 6 mm de diâmetro espaçados de 95 mm ($\rho_{sw1}= 0,29\%$); Série 2 - estribos com varões de 6 mm de diâmetro espaçados de 130 mm ($\rho_{sw2}= 0,22\%$); Série 3 - estribos com varões de 6 mm de diâmetro espaçados de 140 mm ($\rho_{sw3}= 0,2\%$). Com vista a evitar a rotura por corte no vão de corte L2, o espaçamento entre estribos de aço neste vão de corte foi metade do espaçamento dos estribos em L1.

A quantidade de laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM nas vigas do tipo VLi e VLMi foi determinada para que fosse duplicada a capacidade de carga da viga de referência.

No entanto, para que fosse totalmente mobilizada esta capacidade das vigas à flexão teve que se reforçar as vigas ao esforço transversal, uma vez que as vigas VL iriam romper prematuramente por corte. Esta foi a razão pela qual se introduziram no estudo as vigas VLM.

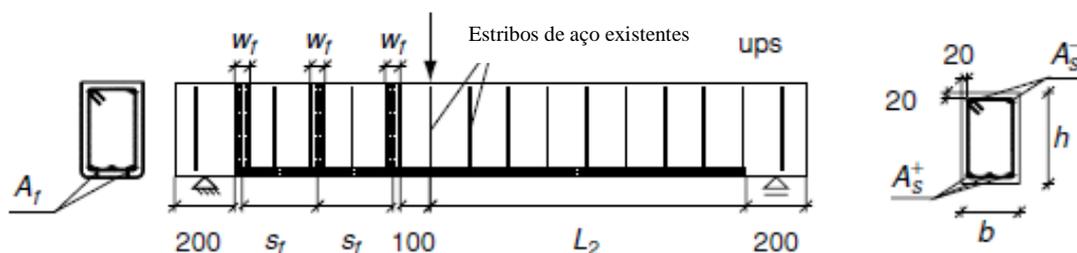


Figura 34 - Representação do reforço à flexão e ao corte, geometria das vigas e condições de carregamento das vigas testadas por Barros *et al.* (2010) (dimensões em *mm*).

Tabela 9 - Geometria das três séries de vigas ensaiadas (Barros *et al.*, 2010).

Série	L ₁ (<i>mm</i>)	L ₂ (<i>mm</i>)	b (<i>mm</i>)	h (<i>mm</i>)	A _s ⁺⁽¹⁾ (<i>mm</i> ²)	A _s ⁻⁽²⁾ (<i>mm</i> ²)
1	550	950	200	250	2φ10+1φ6 (185)	2φ10 (157)
2	750	1150	200	320	2φ10+1φ10 (236)	2φ10 (157)
3	900	1300	200	380	2φ12+1φ8 (276)	2φ12 (226)

⁽¹⁾ Varões correspondentes à armadura longitudinal de tração (área transversal em *mm*);

⁽²⁾ Varões correspondentes à armadura longitudinal de compressão (área transversal em *mm*).

No reforço à flexão foram aplicados dois laminados de CFRP de $1,4 \times 20 \text{ mm}^2$ com as seguintes percentagens de reforço: $\rho_{fl1} = 0,12\%$ (série 1), $\rho_{fl2} = 0,09\%$ (série 2) e $\rho_{fl3} = 0,07\%$ (série 3). Para o reforço ao corte foi adotada uma solução composta por três faixas de manta de CFRP com 50 mm de largura aplicadas de forma discreta (Figura 34) e a percentagens de reforço ao corte de $\rho_{fw1} = 0,12\%$ (série 1), $\rho_{fw2} = 0,04\%$ (série 2) e $\rho_{fw3} = 0,03\%$ (série 3). O betão das vigas tinha uma resistência à compressão média de $31,1 \text{ MPa}$.

De acordo com os dados da Tabela 10 foi possível concluir que o comportamento de VR1 e VE1 foi semelhante, verificando-se em ambos os casos rotura por flexão. A viga VL1 apesar de reforçada à flexão para duplicar a capacidade de carga rompeu por corte com um incremento de capacidade de 43% relativamente à viga VR1. Por sua vez, a viga VLM1 alcançou maior capacidade de carga (80%) devido ao reforço simultâneo à flexão e ao corte. Quer a viga VL1 como a viga VLM1 tiveram rotura por corte, verificando-se que a extensão nos laminados foi, respetivamente, $6,4\%$ e 10% . Verificou-se que o corte do braço inferior dos estribos de aço não teve qualquer influência sobre a capacidade de carga das vigas da série 1. A título de exemplo, na Figura 35 apresenta-se a relação carga *versus* flecha na secção de aplicação da carga das vigas da série 1.

Relativamente à série 2 concluiu-se que o comportamento geral das vigas VR2, VE2 e VL2 seguiu o que foi verificado nas vigas da série 1, destacando-se apenas o facto da viga VL1 ter apresentado uma fenda de corte com inclinação maior quando comparada com VL2 (Figura 36). A viga VLM2 apresentou um excelente desempenho de tal forma que evitou a rotura por corte no vão L1, tendo a rotura (Figura 36) ocorrido por destacamento do reforço à flexão e do betão adjacente no vão de corte L2 (apresentando uma fissuração tipo “*rabo de peixe*” que normalmente ocorre para níveis de tensão muito altos). Nesta série o corte do estribo também não influenciou o desempenho da capacidade resistente das vigas. Na viga VLM2 registou-se um incremento da capacidade de carga de 77% e uma extensão dos laminados de reforço à flexão de 12,3% (na viga VL2, o ganho de capacidade de carga e a extensão máxima registada nos laminados foram, 55% e 9,6%, respetivamente). O comportamento das vigas VR3 e VE3 foi idêntico às séries anteriores, apesar da viga VE3 ter revelado uma capacidade resistente inferior à VR3 em 11%. Na viga VLM3 registou-se um incremento da capacidade de carga de 36% e uma extensão dos laminados de reforço à flexão de 10% (na viga VL3, o ganho de capacidade de carga e a extensão máxima registada nos laminados foram, 28% e 7,6%, respetivamente).

Tabela 10 - Resultados das séries de vigas ensaiadas (Barros *et al.*, 2010).

Viga	ρ_{sl} (%)	ρ_{sw} (%)	ρ_{fl} (%)	ρ_{fw} (%)	F_{sy} (kN)	$F_{máx}$ (kN)	$F_{máx}/F_{VRi}$	$F_{máx}/F_{VEi}$	$\varepsilon_{fl, Fmáx}$ (‰)	Modo de rotura
VR1					58	67	1,00	0,98	---	Flexão
VE1		0,29	0,12	0,12	57	69	1,02	1,00	---	Flexão
VL1					81	96	1,43	1,40	6,4	Corte
VLM1					79	121	1,80	1,76	10,0	Corte
VR2					70	88	1,00	1,00	---	Flexão
VE2					---	89	1,00	1,00	---	Flexão
VL2	37	0,22	0,09	0,04	87	137	1,55	1,55	9,6	Corte
VLM2					---	156	1,77	1,76	12,3	Destacamento do CFRP
VR3					90	116	1,00	1,12	---	Flexão
VE3		0,20	0,07	0,03	85	103	0,89	1,00	---	Flexão
VL3					107	148	1,28	1,44	7,6	Corte
VLM3					112	158	1,36	1,53	10,0	Corte

Barros *et al.* (2010) concluíram que em vigas com percentagens de armadura transversal superior à mínima, quando submetidas a um carregamento monotónico até à rotura, o corte do braço inferior dos estribos efetuado para colocação dos laminados de CFRP como reforço longitudinal, levou a uma perda da capacidade de carga máxima inferior a 10% (quando

comparado com a viga de referencia). Em vigas com percentagens de armadura longitudinal com cerca de 0,4%, foram obtidos incrementos da capacidade de carga máxima superior a 50%, quando reforçadas com laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM (mesmo para as vigas com o braço inferior do estribo cortado), desde que a rotura por corte e por destacamento seja evitada.

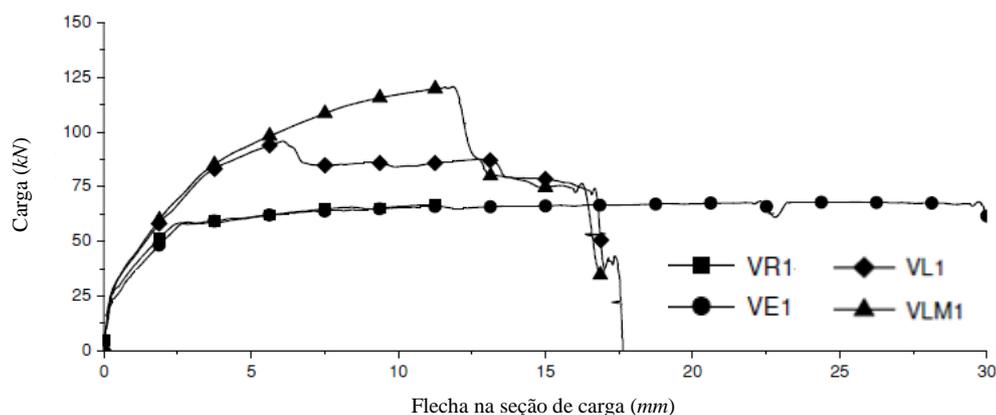
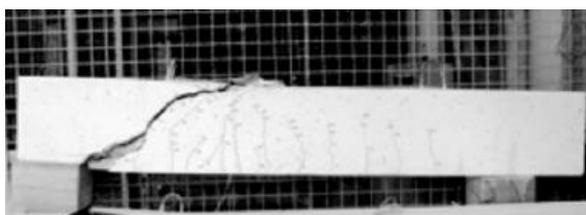


Figura 35 - Relação carga vs flecha das vigas de Série 1 (Barros *et al.*, 2010).



a) VL1 - Viga reforçada à flexão



b) VL2 - Viga reforçada à flexão



c) VLM2 - Viga reforçada à flexão e ao corte



d) VLM3 - Viga reforçada à flexão e ao corte

Figura 36 - Modos de rotura das vigas ensaiadas: a) VL1, b) VL2, c) VLM2, d) VLM3 (Barros *et al.*, 2010).

El-Ghandour (2011) desenvolveu um estudo de investigação experimental sobre a eficiência do reforço de vigas de betão armado à flexão e ao corte com recurso a CFRP. Para isso testou vigas de betão armado com uma secção transversal de 120 mm de largura e 300 mm de altura, comprimento igual a 2000 mm e uma distância entre apoios de 1800 mm. As vigas foram ensaiadas à flexão sob três pontos de carga de acordo com o representado na Figura 37.

No total, El-Ghandour (2011) testou sete vigas de betão armado, duas referentes ao grupo 1 (B1 e B1F), duas ao grupo 2 (B2 e B2S) e três ao terceiro grupo (B3, B3S e B3FS). O betão das vigas tinha uma resistência média à compressão de 48,1 MPa. Tal como apresentado na

Figura 38, as vigas do grupo 1 continham três varões de 16 mm na parte tracionada ($\rho_{sl}=1,86\%$) e dois varões de 8 mm na zona comprimida, enquanto que a nível de estribos tinham varões de 10 mm de diâmetro espaçados de 100 mm ($\rho_{sw}=1,3\%$). Nas vigas do grupo 2 foram colocados seis varões de 18 mm na parte tracionada ($\rho_{sl}=4,71\%$) e dois varões de 10 mm na zona comprimida, enquanto que em termos de estribos, a solução adotada foi varões de 6 mm de diâmetro espaçados de 200 mm ($\rho_{sw}=0,23\%$). Finalmente, as vigas do grupo 3 continham quatro varões de 16 mm na parte tracionada ($\rho_{sl}=2,48\%$) e dois varões de 8 mm na zona comprimida, enquanto que a nível de estribos foram colocados varões de 6 mm de diâmetro espaçados de 200 mm ($\rho_{sw}=0,23\%$).

As vigas B1, B2 e B3 eram de referência, enquanto que a B1F foi reforçada à flexão com uma manta de CFRP de dimensões da secção transversal de $100 \times 0,176 \text{ mm}^2$ ($\rho_{fl}=0,05\%$). Por forma a evitar a descolagem do reforço de flexão, nas extremidades deste foi colocada uma manta de CFRP em forma de U (dimensões de $50 \times 0,176 \text{ mm}^2$) de acordo com o representado na Figura 39. As vigas B2S e B3S foram reforçadas ao corte com faixas de manta coladas em forma de U com dimensões de $50 \times 0,176 \text{ mm}^2$, espaçadas de 187,5 mm ($\rho_{fw}=0,08\%$) de acordo com o representado na Figura 40. A viga B3FS foi reforçada à flexão e ao corte com uma solução que contempla simultaneamente as soluções de reforço das vigas B1F e B2S.

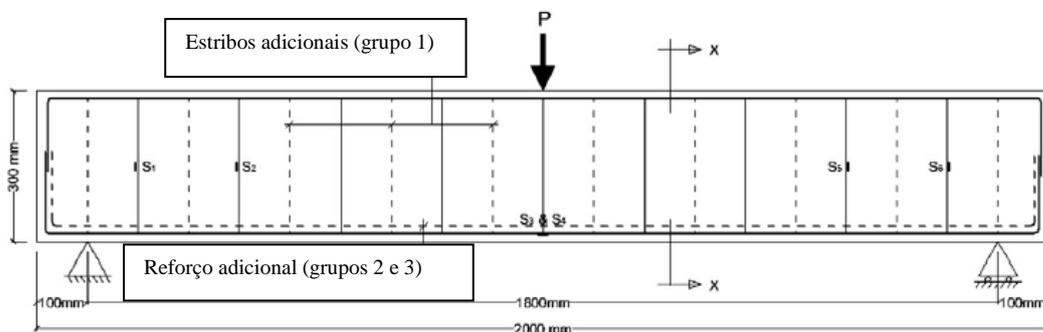
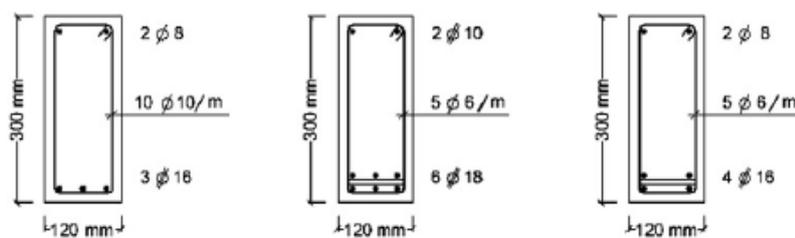


Figura 37 - Esquema das vigas ensaiadas e condições de apoio (El-Ghandour, 2011).



Vigas Grupo 1 - B1 e B1F

Vigas Grupo 2 - B2 e B2S

Vigas Grupo 3 - B3, B3S e B3FS

Figura 38 - Secção transversal das vigas ensaiadas por grupos (El-Ghandour, 2011).

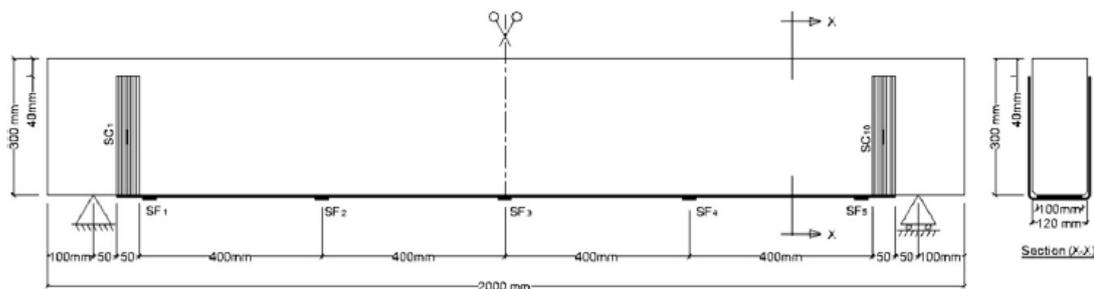


Figura 39 - Solução de reforço da viga B1F testada por El-Ghandour (2011).

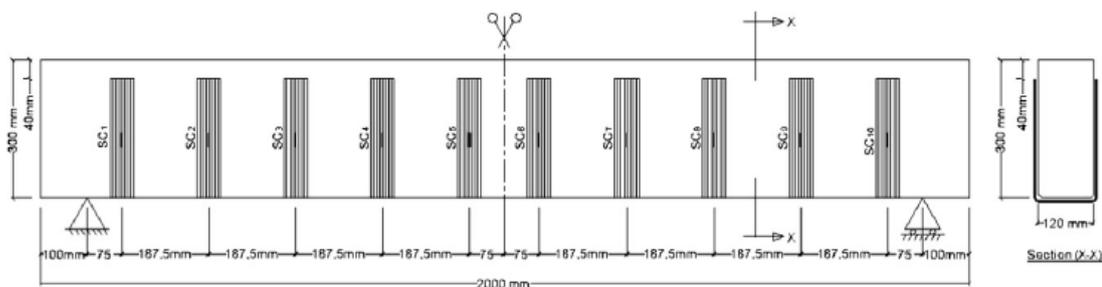


Figura 40 - Soluções de reforço das vigas B2S e B3S testadas por El-Ghandour (2011).

De acordo com os dados da Tabela 11 e da Figura 41, a viga B1F teve uma rotura do reforço à flexão seguido de esmagamento do betão, enquanto que a rotura da viga B3FS foi pela rotura do reforço à flexão seguido de descolagem do reforço ao corte. As vigas do Grupo 2, apesar de terem uma rotura por corte, apresentaram maior capacidade de carga (Figura 42).

Tabela 11 - Resultados obtidos nas vigas ensaiadas por El-Ghandour (2011).

	Viga	ρ_{sl} (%)	ρ_{sw} (%)	ρ_{fl} (%)	ρ_{fw} (%)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	Acréscimo de carga máxima (%)	Modo de rotura
Grupo 1	B1	1,86	1,30	---	---	155	---	Flexão
	B1F			0,05	---	170	9,7	Flexão ⁽¹⁾
Grupo 2	B2	4,71	0,23	---	---	170	---	Corte
	B2S			0,08	225	32,4	Corte ⁽²⁾	
	B3			---	---	125	---	Corte
Grupo 3	B3S	2,48	0,23	---	0,08	150	20	Flexão/Corte ⁽²⁾
	B3FS			0,05	0,08	155	24	Flexão/Corte ⁽³⁾

⁽¹⁾ Rotura do reforço de flexão; ⁽²⁾ Descolagem do reforço de corte; ⁽³⁾ Rotura do reforço de flexão e descolagem do reforço de corte.

O autor concluiu que existiu um incremento da capacidade de carga máxima de 9,7% da viga B1F relativamente à viga B1 e de 32,4% da viga B2S comparativamente à viga B2. Relativamente ao grupo 3 existiu um acréscimo de carga máxima de 20% e de 24%, respetivamente da viga B3S e B3SF, em relação à carga máxima da viga B3.



B1F – Ruptura do reforço



B2S – Descolagem do reforço de corte



B3S – Descolagem do reforço ao corte



B3FS – Ruptura do reforço de flexão seguido de descolagem do reforço de corte

Figura 41 - Modos de rotura das vigas reforçadas ensaiadas (El-Ghandour, 2011).

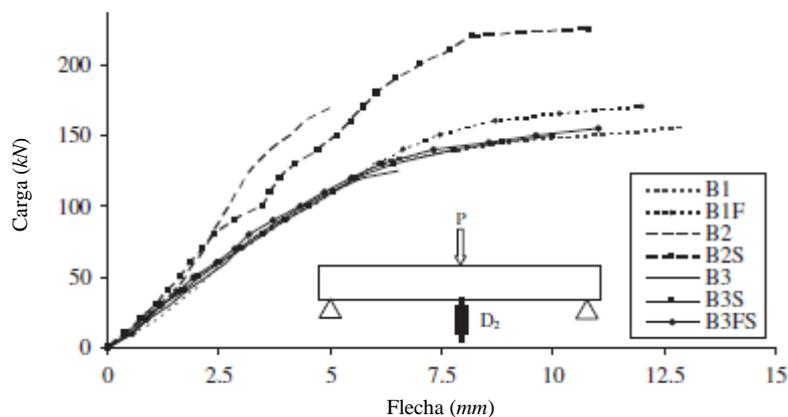


Figura 42 - Relação carga vs flecha (El-Ghandour, 2011).

Dong *et al.* (2013) desenvolveram um estudo sobre o comportamento estrutural de vigas de betão armado reforçadas à flexão e simultaneamente à flexão e ao corte com compósitos de CFRP e GFRP aplicados com a técnica EBR. Assim, foram testados dois grupos de vigas, um de reforço à flexão (CRi) e outro de reforço à flexão e ao corte em simultâneo (SRi) (o grupo das vigas CRi e a viga reforçada com GFRP do grupo SRi (viga SR2) vão ser excluídas da análise por não se enquadrarem no tema desta secção). As vigas foram ensaiadas à flexão em quatro pontos de carga e a sua secção transversal tinha uma largura de 150 mm de acordo com a Figura 43 (as vigas SR1, SR3, SR4, SR6 e SR7 tinham uma altura de 300 mm e viga SR5 tinha uma altura de 250 mm). As vigas possuíam dois varões de 14 mm de armadura

longitudinal na face tracionada e a nível de estribos foram aplicados varões de 6 mm espaçados de 100 mm na viga SR4 e nas restantes o espaçamento foi de 150 mm. As vigas SR1 e SR6 foram de referência (sem reforço) e as outras quatro (SR3, SR4, SR5 e SR7) foram reforçadas à flexão com duas camadas de manta de CFRP coladas externamente com dimensões $1500 \times 100 \times 0,111 \text{ mm}^3$. Além do reforço à flexão, as referidas vigas foram reforçadas ao corte por intermédio da colagem de duas faixas de manta de CFRP (50 mm de largura e 0,111 mm de espessura) em forma de L coladas diagonalmente de acordo com a Figura 44. Além disso, foram coladas duas faixas de manta (fibras dispostas longitudinalmente) na parte superior das faces laterais com o objetivo de ancorar a parte superior das faixas de manta colocadas em L. O valor médio da resistência à compressão do betão aos 28 dias de idade era de 22,8 MPa (vigas SR1, SR3, SR4 e SR5) e 31,3 MPa (vigas SR6 e SR7).

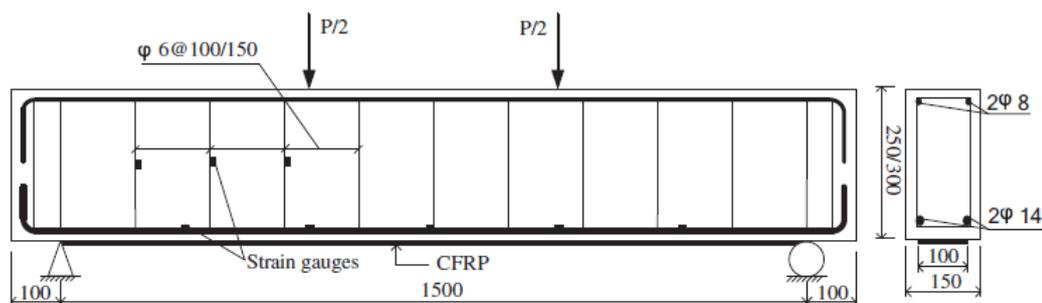


Figura 43 - Alçado e corte das vigas testadas por Dong *et al.* (2013).

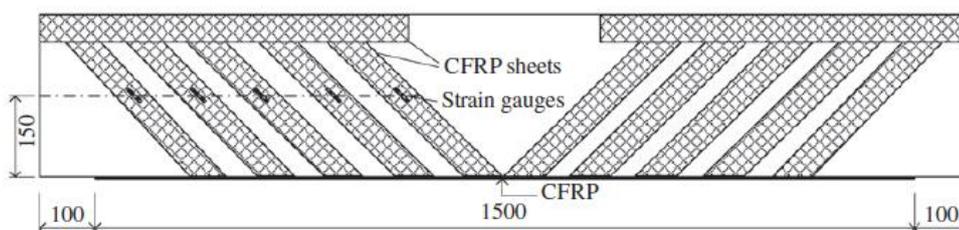


Figura 44 - Configuração do reforço à flexão e ao corte das vigas testadas por Dong *et al.* (2013).

Os principais resultados obtidos por Dong *et al.* (2013) estão representados na Tabela 12 e Figura 45. Os autores verificaram que a rotura da viga SR1 ocorreu por corte (111,49 kN de carga e uma flecha de 4,7 mm) e que a viga SR6, apesar de desenvolver algumas fendas de corte, teve rotura por flexão (115,81 kN de carga e uma flecha de 8,55 mm) de acordo com o representado na Figura 46. As vigas SR3 e SR4, que tiveram um comportamento semelhante, tiveram como modo de rotura a descolagem das mantas de CFRP provocada pela rotura do CFRP que foi colocado na face lateral superior (Figura 47). A viga SR5, com altura de 250 mm, apresentou uma capacidade de carga superior à viga SR1 em 42,2% (viga com 300 mm

de altura sem reforço de CFRP), inferior em 15,3% em relação à carga máxima da viga SR3 (viga com 300 mm de altura e reforçada com CFRP à semelhança da viga SR5). A rotura da viga SR5 ocorreu por descolagem da faixa de manta colocada na extremidade superior da face lateral para uma carga de 158,49 kN e uma flecha de 16,92 mm (a maior de todas as vigas testadas). A viga SR7 apresentou um modo de rotura por descolagem da manta na face inferior, apresentando a maior capacidade de carga de entre as vigas testadas (193,35 kN). Os autores verificaram que capacidade de carga máxima da viga SR5 (com 250 mm de altura) corresponde a 84% do valor médio da capacidade de carga máxima das restantes vigas reforçadas. Os autores concluíram ainda que o reforço simultâneo à flexão e ao corte com recurso a mantas aplicadas com a técnica EBR proporcionou aumentos da resistência, da rigidez, melhorou o controlo das fendas e conferiu maior ductilidade às vigas.

Tabela 12 - Propriedades e resultados obtidos da série de vigas reforçadas à flexão e ao corte (Dong *et al.* 2013).

Viga	h (mm)	ρ_{sl} (%)	ρ_{sw} (%)	f_{cm} (MPa)	ρ_f (%)	Acréscimo $F_{máx}$ (%) ⁽¹⁾	$F_{máx}$ (kN)	$u_{máx}$ (mm)	Modos de rotura
SR1	300	0,70	0,25	22,8	---	---	111,49	4,70	Corte
SR3	300	0,70	0,25	22,8	0,02	67,84	187,12	12,13	Rotura e destacamento CFRP/Flexão
SR4	300	0,70	0,38	22,8	0,02	68,39	187,74	12,40	Rotura e destacamento CFRP/Flexão
SR5	250	0,84	0,25	22,8	0,03	42,17	158,49	16,92	Descolagem CFRP/Corte
SR6	300	0,70	0,25	31,3	---	3,87	115,81	8,55	Flexão
SR7	300	0,70	0,25	31,3	0,02	73,42	193,35	16,12	Descolagem CFRP/Flexão

(1) Comparativamente com SR1.

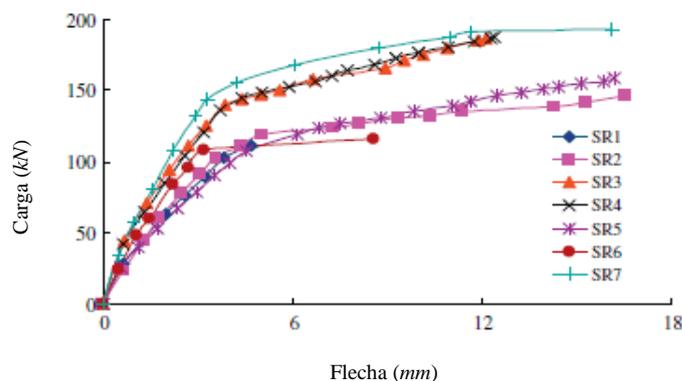
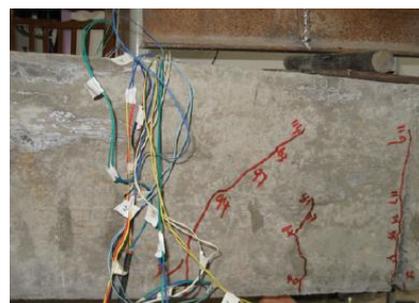


Figura 45 - Curvas carga vs flecha das vigas testadas por Dong *et al.* (2013).



SR1 - Rotura por corte



SR6 - Rotura por flexão

Figura 46 - Modos de rotura nas vigas de referência observados por Dong *et al.* (2013).

SR3/SR4 - Rotura do CFRP na face lateral superior



SR5 - Descolagem das mantas de ancoragem



SR7 - Descolagem do CFRP na face inferior

Figura 47 - Modos de rotura nas vigas reforçadas observados por Dong *et al.* (2013).

Salib (2012) desenvolveu um trabalho experimental com recurso a vigas de betão armado com secção em T reforçadas simultaneamente à flexão e ao corte com diferentes configurações de laminados de CFRP aplicados com a técnica EBR. O objetivo era estudar o efeito do reforço aplicado em termos de capacidade de carga, rigidez, ductilidade e modos de rotura de modo a verificar qual a configuração de reforço mais eficiente. Para isso, foram testadas duas séries de vigas (série I e II) diferenciadas pela rigidez axial do reforço longitudinal aplicado (laminados): na série I a rigidez axial dos laminados de CFRP era metade da que foi aplicada nas vigas da série II. No total foram testadas seis vigas de betão armado com comprimento de 1700 mm e com a secção transversal em T de acordo com a Figura 48: banzo com 300 mm de largura por 60 mm de altura e alma com uma largura de 100 mm e uma altura de 140 mm. As armaduras de compressão eram compostas por quatro varões de 8 mm e as de tração por dois varões de 10 mm de diâmetro ($\rho_{st}=0,9\%$). Quanto aos estribos as vigas tinham varões de 6 mm espaçados de 100 mm ($\rho_{sw}=0,19\%$). As vigas tinham um betão com uma resistência à compressão de $f_{cm}=30 MPa$. Foi testada uma viga de referência sem reforço de CFRP (CB) e as restantes cinco vigas foram divididas nas duas séries anteriormente referidas: serie I (vigas B1, B2 e B3) e serie II (vigas B4 e B5).

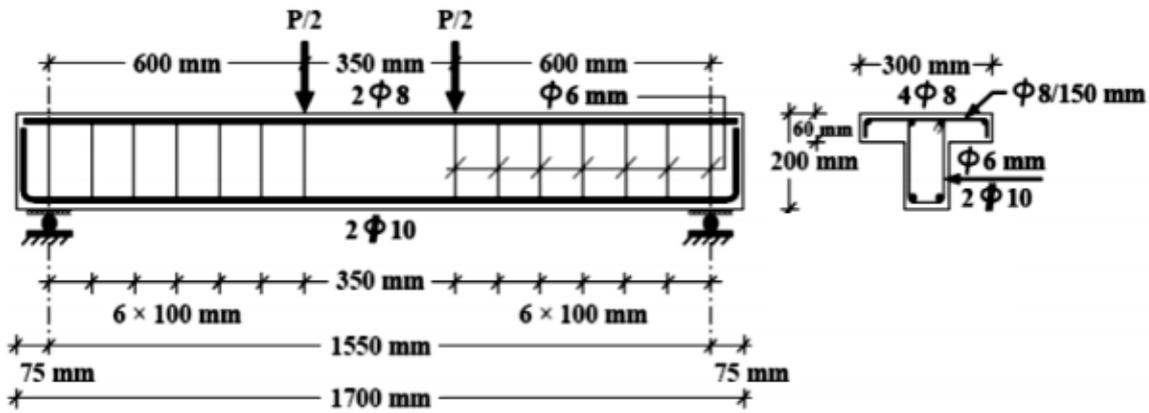


Figura 48 - Esquema de carregamento, seção transversal, longitudinal e armaduras ordinárias das vigas testadas por Salib (2012).

Em termos de reforço à flexão, e no que se refere às vigas da série I, a viga B1 foi reforçada com um laminado de 100 mm de largura por 1,2 mm de espessura ($100 \times 1,2 \text{ mm}^2$) na face inferior, a viga B2 com dois laminados de $50 \times 1,2 \text{ mm}^2$ na face inferior, a viga B3 com dois laminados de $50 \times 1,2 \text{ mm}^2$ colados nas faces laterais de acordo com a Figura 49. Em relação às vigas da série II, a viga B4 foi reforçada à flexão com dois laminados de $100 \times 1,2 \text{ mm}^2$ colados na face inferior e a viga B5 foi reforçada à flexão com um laminado de $100 \times 1,2 \text{ mm}^2$ colado na face inferior e dois laminados de $50 \times 1,2 \text{ mm}^2$ colados nas faces laterais de acordo com o representado na Figura 49. Em termos de reforço ao corte, a configuração do reforço adotada foi a mesma em todas as vigas reforçadas e consistiu na colagem de faixas discretas de manta de CFRP em forma de U com dimensões $50 \times 0,176 \text{ mm}^2$ espaçadas de 100 mm em cada vão de corte das vigas (cinco faixas de manta em cada um dos vãos de corte).



Figura 49 - Vigas testadas por Salib (2012).

O autor concluiu que as soluções de reforço testadas proporcionaram aumentos significativos dos valores de carga máxima, mas em contrapartida originaram uma diminuição da ductilidade da estrutura reforçada que foi tanto maior quanto maior a rigidez do reforço longitudinal, tal como apresentado na Tabela 13 e na Figura 50. As vigas da série I tiveram capacidade de carga máxima similar (as soluções de reforço das vigas B1, B2 e B3 proporcionaram aumentos da carga máxima de 88%, 84% e 81%, respetivamente). As soluções de reforço das vigas B4 e B5 (série II) conferiram um aumento da capacidade de carga máxima de 126% e 110%. Nas vigas da série I não existem diferenças significativas no seu desempenho, pelo que qualquer configuração de reforço poderia ser considerada como uma alternativa válida. Nas vigas da série II, o comportamento da viga B4 foi mais eficiente que B5

Tabela 13 - Principais resultados obtidos (Salib, 2012).

Viga	ρ_{fv} (%)	ρ_{fl} (%)	Acréscimo $F_{máx}$ (%)	$F_{máx}$ (kN)	$u_{máx}$ (mm) Rotura
CB	---	---	---	50,1	72,8
B1	0,18	0,38	88,22	94,3	29,6
B2	0,18	0,38	84,03	92,2	32,1
B3	0,18	0,38	80,64	90,5	30,2
B4	0,18	0,75	126,15	113,3	20,1
B5	0,18	0,75	110,38	105,4	21,8

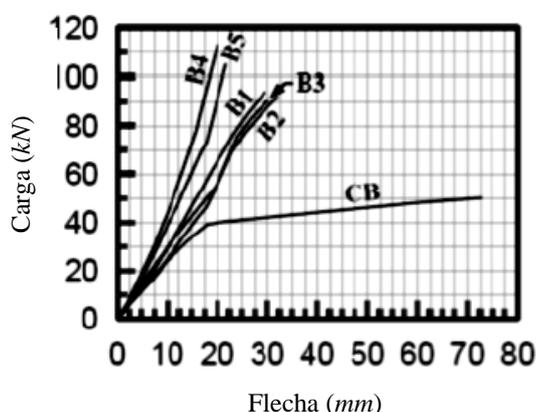


Figura 50 - Relação carga vs flecha a meio vão das vigas testadas por Salib (2012).

O modo de rotura da viga CB foi o esmagamento do betão, enquanto que o das vigas reforçadas, independentemente de serem da série I ou II, foi o destacamento do CFRP, verificando-se que não se conseguiu mobilizar a totalidade das elevadas capacidades do material do reforço utilizado (Figura 51).

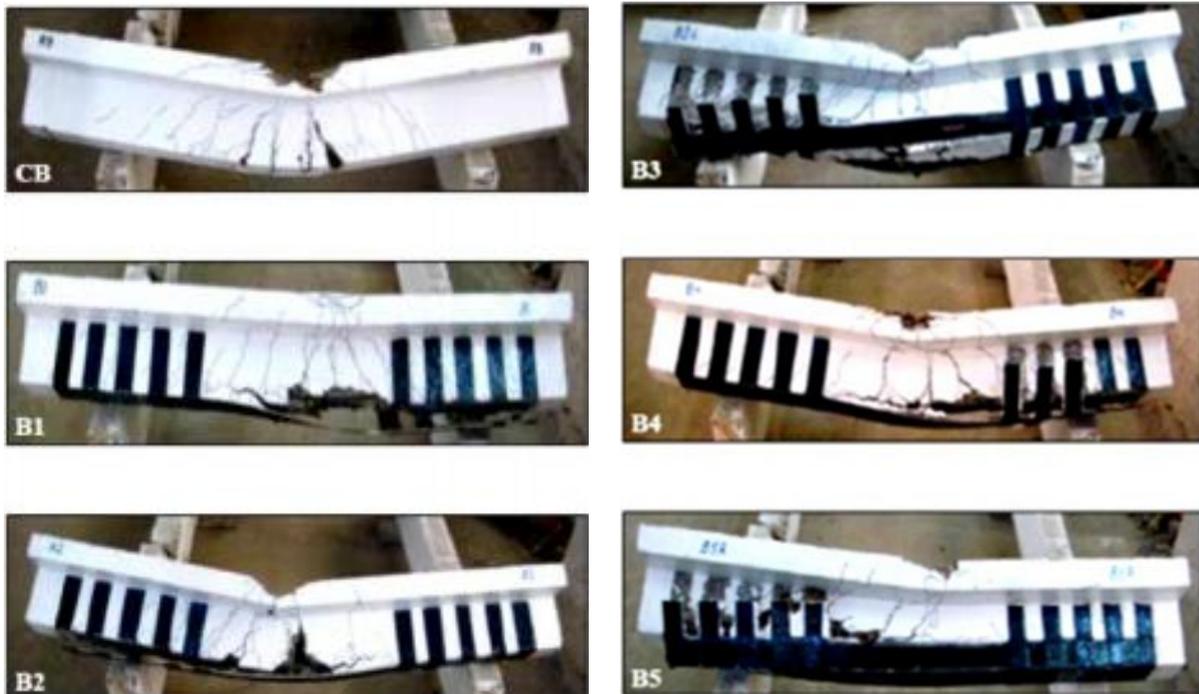


Figura 51 - Modos de rotura das vigas ensaiadas por Salib (2012).

Costa (2013) desenvolveu um estudo experimental com vista a verificar a exequibilidade e a eficiência do reforço simultâneo à flexão e ao corte, com laminados de CFRP inseridos, em vigas de betão armado pré-fendilhadas. Para isso, foram concebidas e testadas duas vigas de betão armado (secção transversal em T) à escala real, uma de referência, a viga 1 (Figura 52), e outra reforçada com CFRP, a viga 2 (Figura 53). O valor médio da resistência à compressão do betão das vigas era de $f_{cm} = 31,26 \text{ MPa}$. As vigas continham, em termos de armaduras longitudinais, dois varões de 16 mm de diâmetro na face tracionada ($\rho_{sl} = 0,51\%$) e seis varões de 10 mm de diâmetro no banzo, enquanto que em termos de armadura transversal, as vigas tinham varões de 6 mm espaçados de 300 mm ($\rho_{sw} = 0,12\%$). Neste estudo foi tido em conta o facto da maior parte das situações de reforço ocorrerem com os elementos já fendilhados (em serviço). Para o efeito, antes da aplicação do reforço as vigas foram submetidas a um carregamento, que introduziu um certo dano inicial e provocou a formação de um conjunto de fendas iniciais.

Em termos de reforço, a viga 2 foi reforçada simultaneamente à flexão e ao corte usando a técnica NSM com laminados de CFRP. De acordo com a Figura 53, a viga foi reforçada à flexão, com três laminados de secção transversal $1,4 \times 20 \text{ mm}^2$ ($\rho_{fl} = 0,08\%$), e ao corte com laminados de secção transversal $1,4 \times 20 \text{ mm}^2$ inseridos nas faces laterais da viga com um espaçamento de 300 mm ($\rho_{fv} = 0,12\%$).

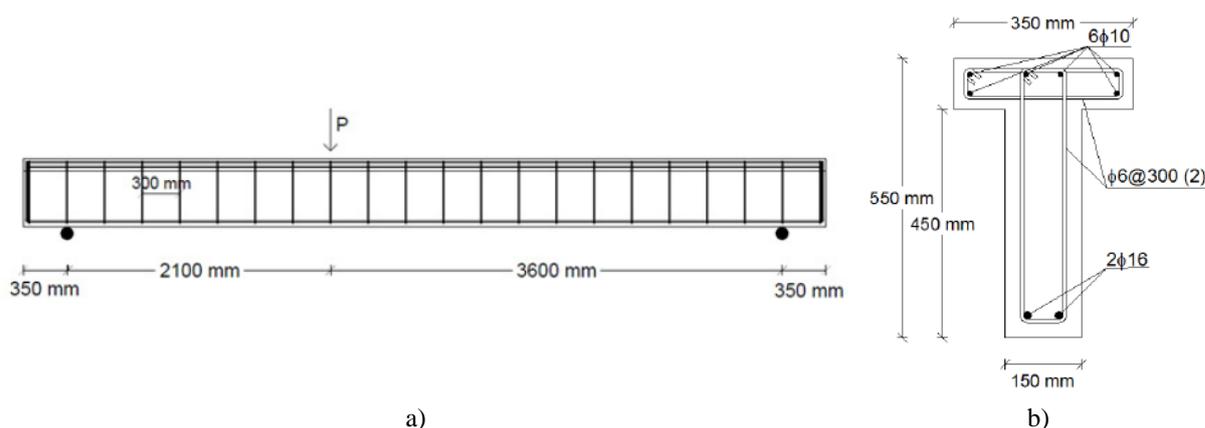


Figura 52 - Viga de referência ensaiada: a) corte longitudinal, b) secção transversal (Costa, 2013).

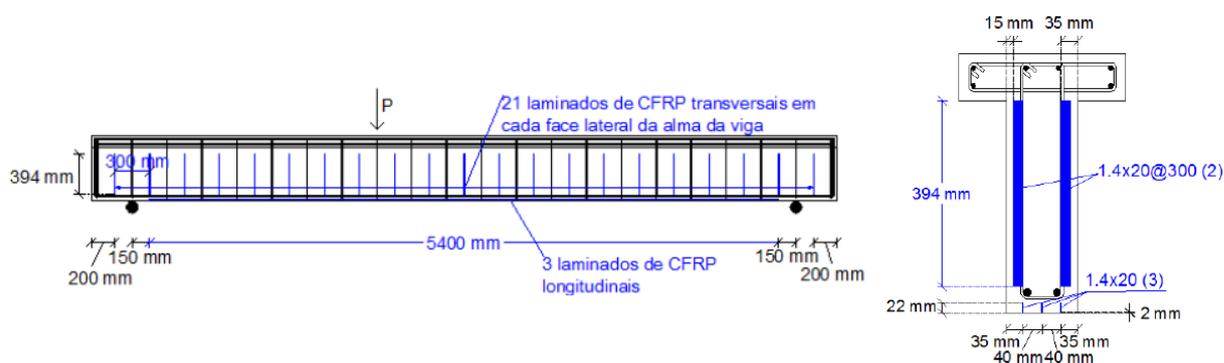


Figura 53 - Corte longitudinal e secção transversal da viga reforçada (Costa, 2013).

Tendo como base o comportamento da viga de referência sem reforço de CFRP (viga 1), verificou-se que a solução de reforço simultâneo à flexão e ao corte com laminados de CFRP inseridos aplicada na viga 2 proporcionou consideráveis acréscimos de capacidade de carga: 19,4% no caso da carga correspondente à cedência das armaduras e 56,7% no caso da carga máxima (Figura 54). O modo de rotura da viga reforçada foi o destacamento dos laminados de CFRP referentes ao reforço à flexão (Figura 55). A extensão máxima registada nos laminados de CFRP de reforço à flexão foi de 10,26% e, considerando que no ensaio de caracterização dos laminados de CFRP o valor médio da extensão de rotura obtido foi de 14,81%, verificou-se um grau de mobilização do reforço de CFRP à flexão de 69,3%. Devido à rotura da viga reforçada ter sido por flexão por destacamento dos laminados longitudinais, nos laminados de CFRP de reforço ao corte apenas se verificou uma mobilização de 7,9% da sua capacidade de carga total. Em termos do deslocamento correspondente à força máxima registou-se uma diminuição do valor obtido na viga de referência (108,17 mm na viga de referência e 59,3 mm na viga reforçada), o que denota uma diminuição da ductilidade da viga reforçada.

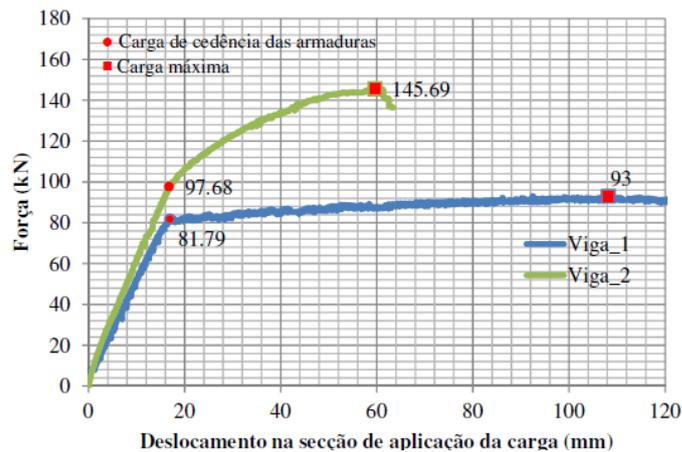


Figura 54 - Comparação do comportamento até à rotura das vigas testadas (Costa, 2013).



Figura 55 - Modo de rotura da viga reforçada (Costa, 2013).

2.6. Proposta da solução de reforço à flexão e ao corte de vigas de betão armado com uma solução híbrida de CFRP

Nos estudos já realizados sobre o reforço simultâneo à flexão e ao corte com CFRP, independentemente da técnica de reforço adotada, tem-se verificado a ocorrência de roturas prematuras: ver a Figura 51 no caso de reforço à flexão e ao corte com o CFRP aplicado com a técnica EBR; ver a Figura 33 (viga 7SRFLV) e a Figura 55 no caso de reforço à flexão e ao corte com o CFRP aplicado a técnica NSM.

Por forma a tentar contornar os modos de rotura prematuros anteriormente referidos e melhorar assim o desempenho do CFRP para situações de necessidade simultânea de reforço à flexão e ao corte, no âmbito desta dissertação, pretende-se avaliar o grau de eficácia de uma solução de reforço híbrido com CFRP aplicado a vigas de secção transversal em T de betão armado. Esta solução consiste na aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP inseridos no reforço à flexão e na aplicação da técnica EBR no reforço ao corte com faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente em forma de U, reforço este complementado com um sistema que permite a ancoragem das faixas de manta de CFRP nas suas extremidades.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se o programa experimental realizado com vista a avaliar o desempenho de uma solução híbrida com CFRP para o reforço simultâneo à flexão e ao corte que consiste no reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos e no reforço ao corte com faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente em forma de U, reforço este complementado com um sistema que permite a ancoragem das faixas de manta de CFRP nas suas extremidades.

Após a descrição das séries de modelos de vigas de betão armado a ensaiar (geometria, armadura e soluções de reforço adotadas), apresentam-se as principais propriedades dos materiais utilizados (betão, aço, laminado de CFRP, manta de CFRP, adesivo epoxídico e resina epoxídica), algumas delas obtidas experimentalmente no presente trabalho de investigação, assim como, o estudo que foi realizado para estabelecer, no âmbito de uma ligação manta/manta, o comprimento de colagem necessário para que o modo de rotura num ensaio de tração uniaxial, não seja pela ligação das mantas mas sim pela rotura de uma das mantas. Posteriormente, é descrita a forma como foram realizados os reforços de CFRP das vigas de betão armado. Previamente à apresentação e análise dos resultados obtidos, é descrito o sistema de ensaio e de monitorização adotado para os ensaios das vigas.

3.1. Conceção dos modelos de vigas de betão armado

O programa experimental realizado englobou o ensaio de seis vigas de betão armado, que foram divididas em duas séries (série 1 com três vigas e série 2 com três vigas). As vigas tinham uma secção transversal em T (que melhor simula o cenário mais frequente que pode ocorrer numa intervenção de reforço de uma viga de betão armado), com um banzo de 450 *mm* de largura e 100 *mm* de altura e uma alma de 180 *mm* de largura e 300 *mm* de altura, tal como representado na Figura 56. O comprimento total das vigas era 2800 *mm*, o vão livre entre apoios era 2400 *mm* e os vãos de corte tinham comprimentos de 900 *mm* e 1500 *mm*, de acordo com o representado na Figura 57. A diferença entre os vãos de corte teve como objetivo, de acordo com o esquema estrutural representado na Figura 57, que a existir rotura por corte ela fosse localizada num determinado vão de corte (o menor).

Tal com referido anteriormente, as seis vigas foram divididas em duas séries (série 1 e 2), cada uma com três vigas. As vigas da série 1 (S1REF, S1SFS e S1SFS-A) foram armadas longitudinalmente com três varões de 20 *mm* de diâmetro na face tracionada e 6 varões de 12

mm de diâmetro no banço das vigas. Em termos de armadura de esforço transversal, as vigas da série 1 tinham estribos de aço verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro com um espaçamento entre eles de 300 mm. Assim, a percentagem de armadura longitudinal de tração e de armadura transversal das vigas da série 1 era, respetivamente, de $\rho_{sl}=1,46\%$ e $\rho_{sw}=0,10\%$. As vigas da série 2 (S2REF, S2SFS e S2SFS-A) foram armadas longitudinalmente com dois varões de 20 mm de diâmetro e um varão de 25 mm de diâmetro na face tracionada e 6 varões de 12 mm de diâmetro no banço das vigas. Em termos de armadura de esforço transversal, as vigas da série 2 tinham estribos de aço verticais (dois ramos) de 6 mm de diâmetro com um espaçamento entre eles de 150 mm. Assim, a percentagem de armadura longitudinal de tração e de armadura transversal das vigas da série 2 era, respetivamente, de $\rho_{sl}=1,74\%$ e $\rho_{sw}=0,21\%$. Na Figura 56 e na Figura 57 estão representadas as armaduras das vigas de cada uma das séries testadas.

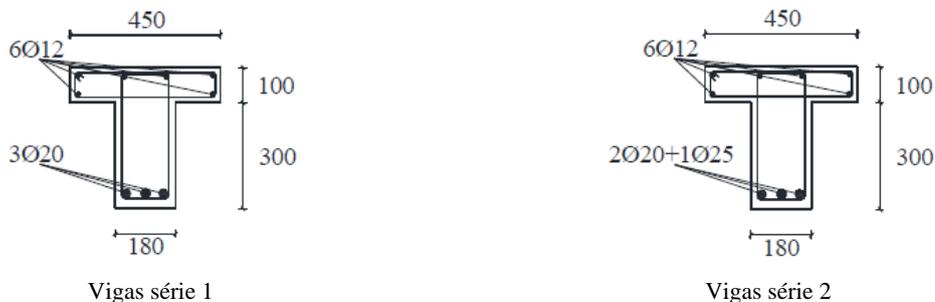


Figura 56 - Seção transversal em T das vigas de betão armado da série 1 e da série 2.

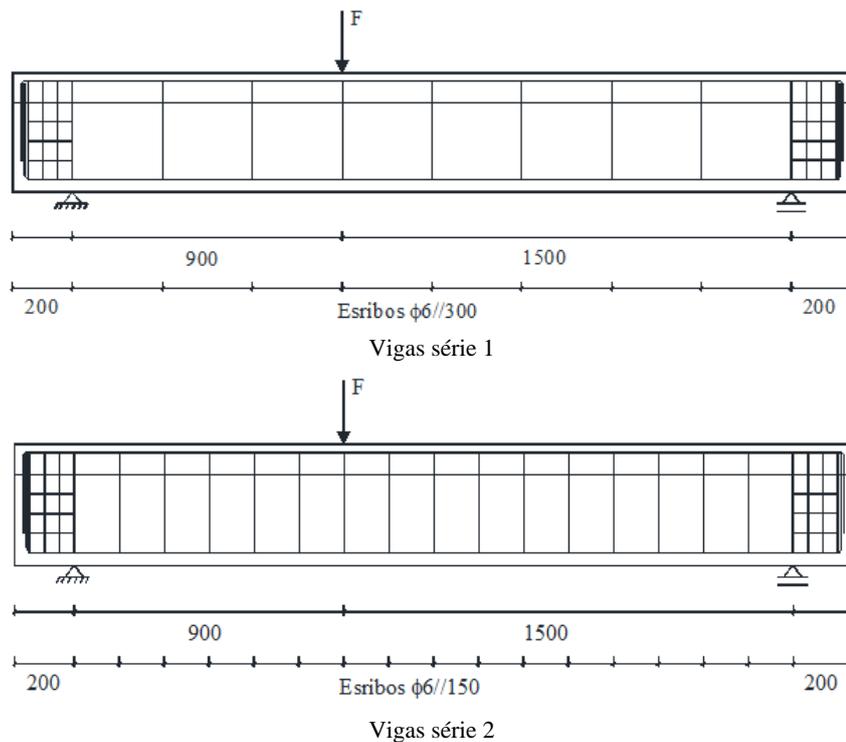
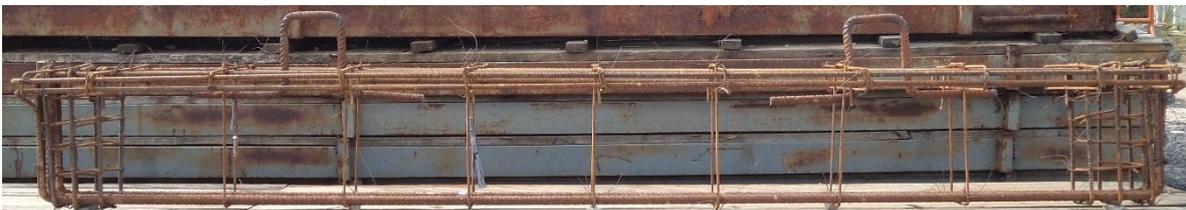
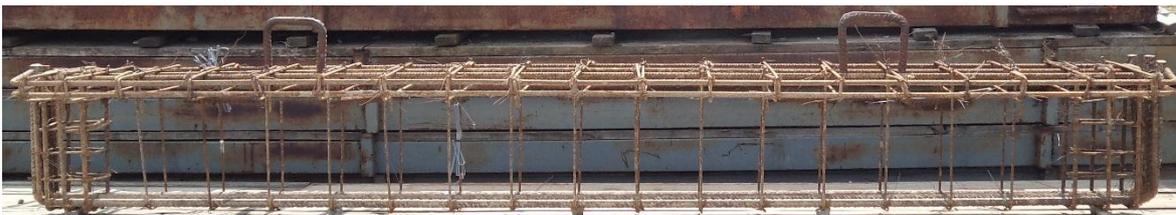


Figura 57 - Corte longitudinal das vigas de betão armado da série 1 e da série 2.

Na Figura 58 são apresentadas algumas tarefas realizadas no âmbito da execução das vigas de betão armado usadas no presente programa experimental.



Aspetto geral das armaduras das vigas da série 1



Aspetto geral das armaduras das vigas da série 2



Verificação da posição dos estribos



Aspetto geral das armaduras inseridas na cofragem



Betonagem das vigas



Provetes cilíndricos betonados para caracterização do betão



Vigas após a descofragem

Figura 58 - Execução das vigas de betão armado.

Em cada uma das séries de vigas testadas havia uma viga de referência sem reforço de CFRP (viga S1REF no caso da série 1 e viga S2REF no caso da série 2) e duas vigas reforçadas à flexão e ao corte com compósitos de CFRP: à flexão com laminados de CFRP inseridos e ao corte com faixas discretas de manta de CFRP em forma de U coladas externamente. Em cada uma das séries a diferença existente nas duas vigas reforçadas com CFRP era unicamente o facto de numa delas ter sido adotado um sistema de fixação do reforço ao corte por forma a evitar ou retardar o destacamento prematuro do CFRP.

As vigas reforçadas da série 1, sem e com o mecanismo de fixação anteriormente referidas, respetivamente as vigas S1SFS e S1SFS-A, foram reforçadas à flexão com 4 laminados de CFRP, cada um com dimensões $1,4 \times 10 \text{ mm}^2$, e ao corte com faixas discretas de manta de CFRP (2 camadas, cada uma com $0,176 \text{ mm}$ de espessura e 60 mm de largura) espaçadas de 150 mm . Estas soluções de CFRP correspondem a percentagens de reforço à flexão e ao corte de $\rho_{ff}=0,01\%$ e $\rho_{fw}=0,16\%$, respetivamente. As características principais das vigas da série 1 estão representadas na Figura 59 e na Tabela 14.

As vigas reforçadas da série 2, sem e com o mecanismo de fixação anteriormente referidas, respetivamente as vigas S2SFS e S2SFS-A, foram reforçadas à flexão com 4 laminados de CFRP, cada um com dimensões $1,4 \times 10 \text{ mm}^2$, e ao corte com faixas discretas de manta de CFRP (1 camada com $0,176 \text{ mm}$ de espessura e 60 mm de largura) espaçadas de 150 mm . Estas soluções de CFRP correspondem a percentagens de reforço à flexão e ao corte de $\rho_{ff}=0,01\%$ e $\rho_{fw}=0,08\%$, respetivamente. As características principais das vigas da série 2 estão representadas na Figura 60 e na Tabela 14.

As soluções de reforço de CFRP das vigas S1SFS e S2SFS foram definidas por forma a que a rotura ocorresse por corte e, assim ser possível avaliar, até que ponto o sistema de fixação do reforço ao corte introduzido nas vigas S1SFS-A e S2SFS-A é eficaz, não só em termos do acréscimo da resistência ao esforço transversal mas também em termos do benefício para o desempenho do reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos (retardar ou evitar o destacamento prematuro).

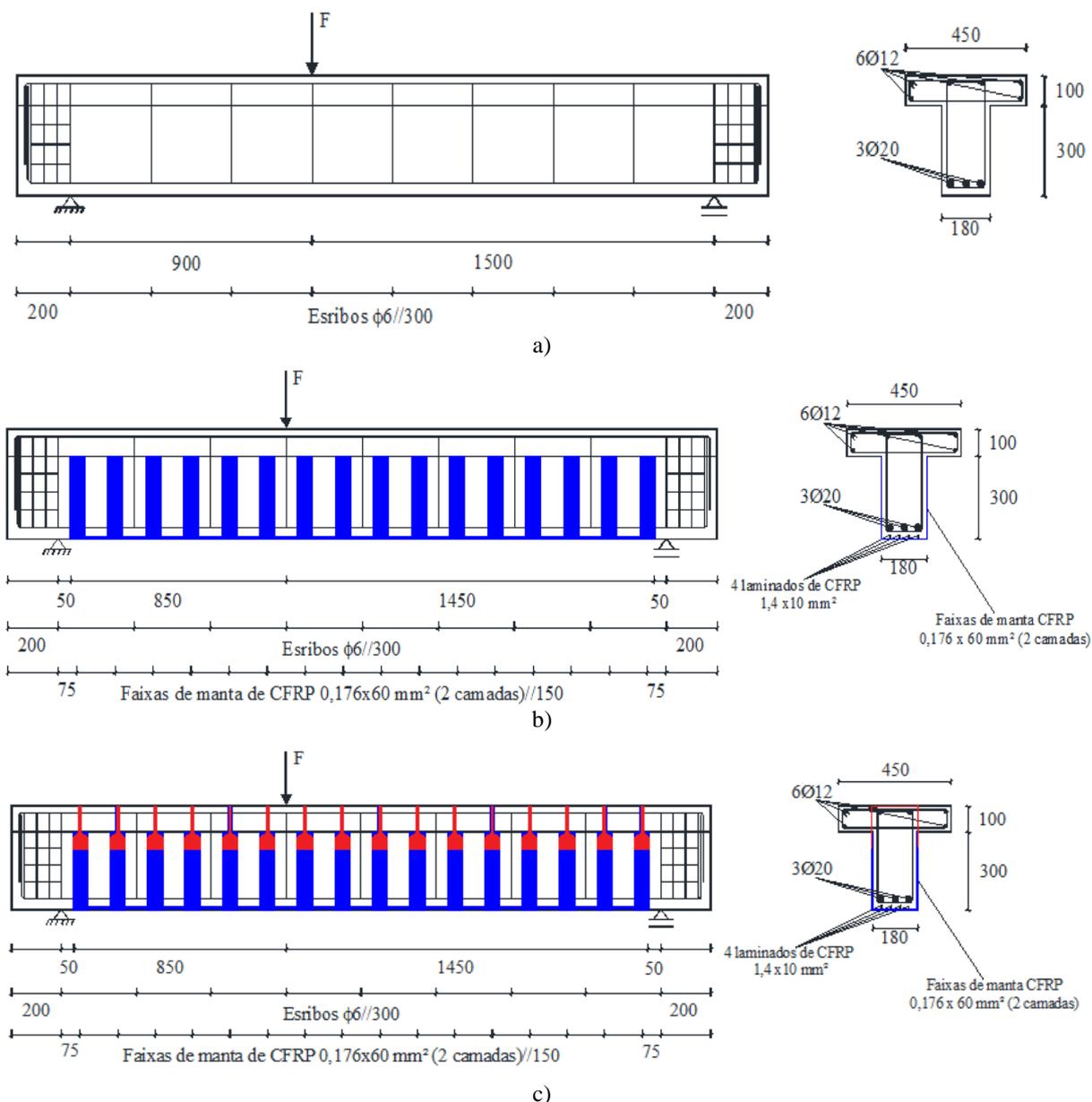


Figura 59 - Vigas da série 1: a) viga de referência (S1REF), b) viga com reforço à flexão e ao corte sem fixação das mantas (S1SFS), c) viga com reforço à flexão e ao corte com fixação das mantas (S1SFS-A).

Tabela 14 - Características das vigas testadas.

Série	Viga	ρ_{sl} (%)	ρ_{sw} (%)	ρ_{fl} (%)	ρ_{fw} (%)	Fixação do reforço ao corte
Série 1	S1REF			----	---	Não (viga de referência sem CFRP)
	S1SFS	1,46	0,10	0,01	0,16	Não
	S1SFS-A			0,01	0,16	Sim
Série 2	S2REF			----	---	Não (viga de referência sem CFRP)
	S2SFS	1,74	0,21	0,01	0,08	Não
	S2SFS-A			0,01	0,08	Sim

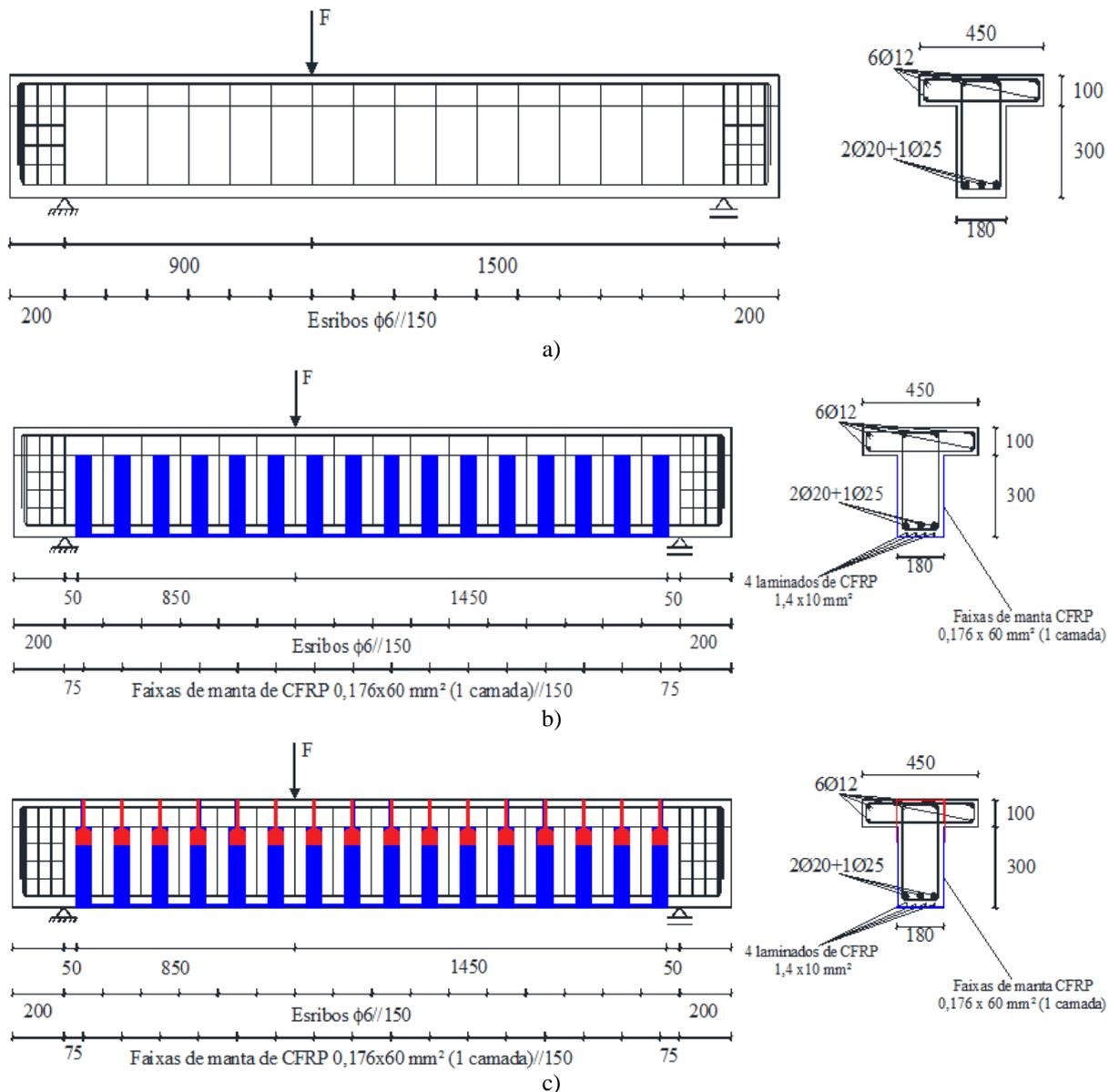


Figura 60 - Vigas da série 2: a) viga de referência (S2REF), b) viga com reforço à flexão e ao corte sem fixação das mantas (S2SFS), c) viga com reforço à flexão e ao corte com fixação das mantas (S2SFS-A).

3.2. Caracterização dos materiais e definição do comprimento de colagem das mantas relativo à técnica de ancoragem das mantas

Para avaliação do comportamento das vigas ensaiadas torna-se necessário saber as propriedades mecânicas dos materiais utilizados na sua concepção. Nesse sentido foram realizados ensaios experimentais por forma a avaliar as principais propriedades do betão, do aço e das mantas de CFRP. A caracterização dos laminados e do adesivo epoxídico já tinha sido feita anteriormente por outros autores.

Além disso, foi realizado um conjunto de ensaios por forma a determinar experimentalmente o comprimento de colagem adequado na ligação manta/manta, para que o modo de rotura de provetes, constituídos por duas mantas coladas numa determinada extensão, quando sujeitos a um ensaio de tração uniaxial seja por rotura do CFRP e não por cedência da ligação colada.

3.2.1. Caracterização dos materiais

3.2.1.1. Betão

Com vista à caracterização mecânica do betão foram betonados e curados, no mesmo local e sob as mesmas condições das vigas, cilindros com 150 *mm* de diâmetro e 300 *mm* de altura (Figura 58). A referida caracterização foi feita em termos da quantificação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do betão à data da realização do ensaio das vigas. No total foram testados quatro cilindros, tendo-se procedido, previamente à realização dos ensaios, à regularização da face superior dos mesmos, de acordo com o procedimento que está ilustrado na Figura 61.



Figura 61 - Processo de retificação dos provetes cilíndricos.

O primeiro dos quatro cilindros foi submetido a um ensaio à compressão uniaxial, segundo as recomendações da norma NP EN 12390-3 (2011), para a determinação do valor da resistência máxima à compressão (Figura 62 a)). Esta informação foi necessária para definir a força máxima do carregamento cíclico a impor nos restantes cilindros para a determinação do módulo de elasticidade do betão. Assim, com base na norma NP EN 12390-13 (2012), foram ensaiados os restantes três cilindros com vista à determinação do módulo de elasticidade (Figura 62 b)). A realização deste ensaio consistiu em impor cinco ciclos de carga e descarga em cada cilindro. Os ciclos de carga variaram entre os 10 *kN* e os 234 *kN* (este valor

corresponde a um terço do valor da força máxima de compressão obtida no ensaio prévio anteriormente referido), sendo que os incrementos de carga e descarga foram feitos com uma velocidade constante de 5 kN/s . Em cada ciclo de carga, após se atingir a força de 234 kN , este valor era mantido durante 60 segundos para posteriormente se iniciar a descarga para os 10 kN . Uma vez efetuado o ensaio para a determinação do módulo de elasticidade, os três cilindros foram, à semelhança do primeiro, submetidos a um ensaio de compressão uniaxial para a determinação do valor da resistência máxima à compressão do betão. Na Figura 63 é possível visualizar o aspeto dos cilindros após a regularização das faces superiores, bem como, os modos de rotura obtidos após os ensaios de compressão.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios realizados (4 provetes para avaliação do valor da resistência à compressão e três provetes para avaliação do módulo de elasticidade), verificou-se que o betão das vigas ensaiadas tinham um valor médio de resistência à compressão de $44,3 \text{ MPa}$ (coeficiente de variação igual de $0,49\%$) e um valor médio para o módulo de elasticidade de $34,1 \text{ GPa}$ (coeficiente de variação igual a $2,7\%$).



Figura 62 - Configuração dos ensaios realizados para a caracterização do betão: a) resistência à compressão, b) módulo de elasticidade.



Figura 63 - Provetes cilíndricos: a) antes do ensaio, b) modos de rotura obtidos.

3.2.1.2. Aço

As armaduras das vigas de betão armado testadas no âmbito do presente trabalho experimental tinham varões de aço nervurado com 6, 12, 20 e 25 *mm* de diâmetro.

Para cada tipo de diâmetro (com exceção dos varões com 12 *mm* de diâmetro), durante o processo de montagem das armaduras das vigas foram retiradas seis amostras de diferentes barras. As propriedades destes varões foram avaliadas experimentalmente (Figura 64) através de ensaios de tração uniaxial realizados segundo a norma NP EN 10002-1 (1990). Concretamente, para cada tipo de diâmetro (6, 20 e 25 *mm*), foram ensaiados seis provetes de aço com 500 *mm* de comprimento. Na Tabela 15 apresentam-se os valores médios, e respetivos coeficientes de variação, da tensão de cedência e da tensão de rotura dos aços que foram testados.

Tabela 15 - Propriedades dos aços das armaduras das vigas.

Diâmetro (<i>mm</i>)	Tensão de cedência (<i>MPa</i>)	Tensão de Rotura (<i>MPa</i>)
6	640,5 (5,6%)	737,2 (3,1%)
20	635,5 (2,4%)	766,9 (2,2%)
25	657,3 (1,2%)	790,3 (1,1%)

Nota: os valores entre parêntesis referem-se ao coeficiente de variação.



a)



b)

Figura 64 - Caracterização experimental do aço das armaduras das vigas: a) ensaio de tração uniaxial, b) varão testado.

3.2.1.3. Laminados de CFRP

No presente trabalho experimental foram utilizados laminados de CFRP com secção transversal de $1,4 \times 10 \text{ mm}^2$ com a designação comercial “S&P Laminates (CFK 150/2000)”. A determinação das propriedades mecânicas dos laminados foi feita no âmbito do trabalho desenvolvido por Dias *et al.* (2012) por intermédio da realização de ensaios de tração uniaxial de acordo com a ISO 527-5 (1997), tendo-se obtido, em termos médios, para a resistência à tração, módulo de elasticidade e extensão máxima, os valores de 3165 MPa , 175 GPa e 18% , respetivamente.

3.2.1.4. Mantas de CFRP

No presente trabalho experimental foram utilizadas faixas discretas de manta de CFRP unidirecional com a designação comercial “S&P C-Sheet 240, 300 g/mm^2 ”.

A caracterização da manta de CFRP foi feita por intermédio de ensaios de tração uniaxial com uma velocidade de deformação de $0,016 \text{ mm/s}$. Para tal foram testados seis provetes de manta que tinham 300 mm de comprimento e 50 mm de largura (Figura 65 a)). Com vista a evitar a rotura prematura das amostras devido a concentração de tensões introduzidas pelas amarras foi colocado em cada uma das faces das extremidades dos provetes um reforço com uma camada de manta com 80 mm de comprimento e 50 mm de largura, complementado com a adição de uma chapa metálica com $50 \times 60 \text{ mm}^2$. Para a determinação da variação da extensão ao longo dos ensaios foi colocado um extensómetro de acordo com o representado na Figura 65 b).

Na Figura 65 apresentam-se a configuração do ensaio e as amostras antes e depois de ensaiadas.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios realizados, verificou-se que a manta de CFRP tinha um valor médio de resistência à tração de $3096,4 \text{ MPa}$ (coeficiente de variação igual de $15,1\%$), um valor médio do módulo de elasticidade de $244,7 \text{ GPa}$ (coeficiente de variação igual a $13,6\%$) e uma extensão máxima de $10,0\%$ (coeficiente de variação igual $13,9\%$).

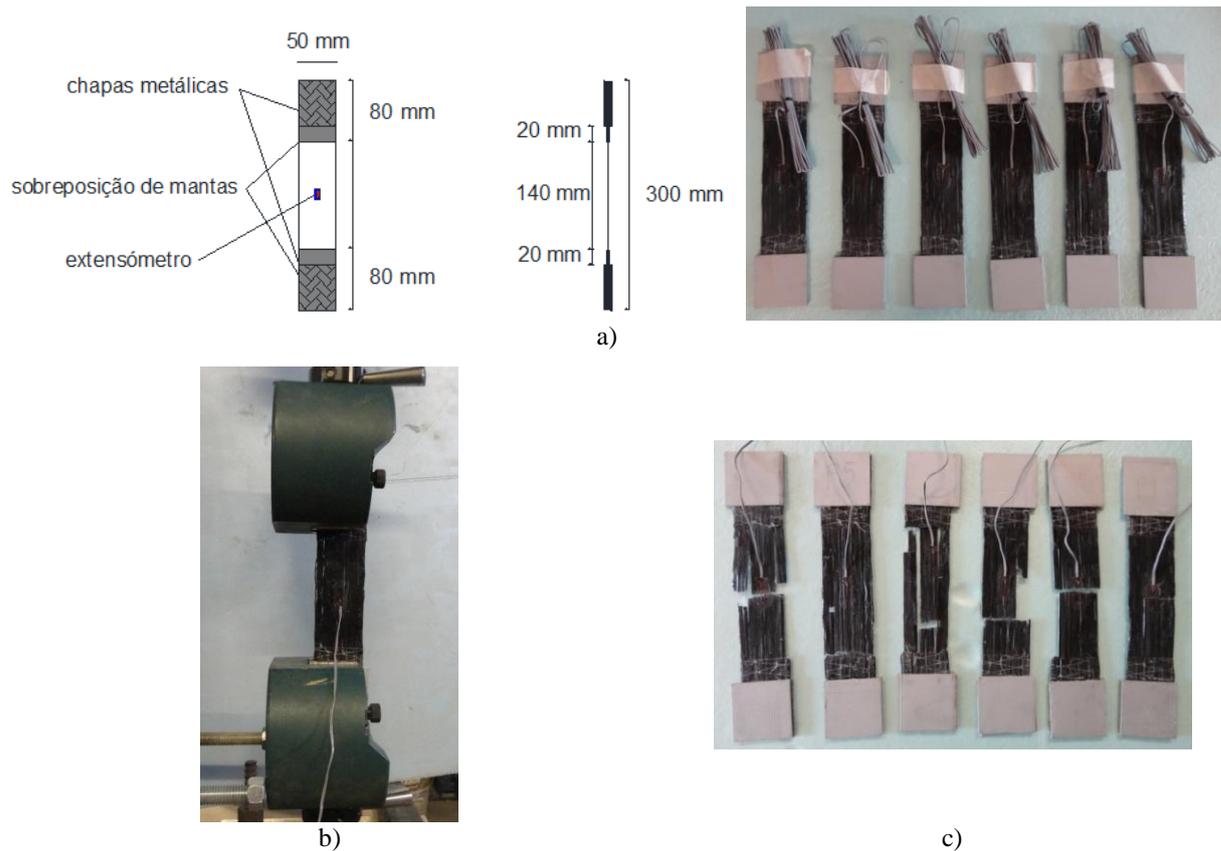


Figura 65 - Ensaio de mantas de CFRP: a) provetes de manta de CFRP, b) configuração do ensaio de tração uniaxial, c) provetes de manta de CFRP depois do ensaio.

3.2.1.5. Adesivo epoxídico

No reforço à flexão das vigas de betão armado com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM, o elemento de ligação do CFRP ao betão utilizado foi o adesivo epoxídico com a designação comercial “*S&P Resin 220 epoxy adhesive*”. O adesivo é constituído por duas componentes (Componente A – Resina e Componente B – Endurecedor), que de acordo com o fabricante, a proporção de mistura do componente A em relação ao componente B é de 4:1.

A determinação das propriedades mecânicas do adesivo epoxídico “*S&P Resin 220 epoxy adhesive*” foi feita no âmbito do trabalho desenvolvido por Fernandes *et al.* (2015) por intermédio da realização de ensaios de tração uniaxial de acordo com a ISO 527-2 (2012), tendo-se obtido, em termos médios, para a resistência à tração, módulo de elasticidade e extensão máxima, os valores de 30 MPa, 7,2 GPa e 3,6%, respetivamente.

3.2.1.6. Resina epoxídica

No reforço ao corte das vigas de betão armado com faixas discretas de manta de CFRP aplicadas com a técnica EBR foi usada uma resina com a designação comercial de “*S&P Resin 55 epoxy*”

adhesive”. Esta resina é constituída por duas componentes (Componente A – Resina e Componente B – Endurecedor), que de acordo com o fabricante, a proporção de mistura do componente A em relação ao componente B é de 3:1. De acordo com a ficha técnica disponibilizada, esta resina tem uma resistência à tração de 35,8 *MPa*, uma extensão máxima de 23% e um módulo de elasticidade em tração superior a 2,6 *GPa*.

3.2.2. Definição do comprimento de colagem das mantas relativo à técnica de ancoragem das mantas aplicadas no reforço ao corte das vigas

Na definição da técnica de ancoragem das faixas discretas de manta de CFRP em forma de U, usadas no reforço ao corte das vigas de betão armado, foi realizado um estudo para estabelecer, no âmbito de uma ligação manta/manta, o comprimento de colagem necessário para que o modo de rotura num ensaio de tração uniaxial, não seja pela ligação manta/manta mas sim pela rotura de uma das mantas.

Este estudo consistiu na realização do ensaio de tração uniaxial semelhante ao descrito na seção 3.2.1.4. No total foram ensaiados 3 provetes constituídos por duas mantas de CFRP, cada uma com 170 *mm* de comprimento e 50 *mm* de largura, e que foram coladas uma à outra de tal forma que o comprimento de sobreposição das mantas fosse de 40 *mm* (área de ligação das mantas igual a $50 \times 40 = 2000 \text{ mm}^2$). Com vista a evitar a rotura prematura dos provetes devido a concentração de tensões introduzidas pelas amarras foi colocado em cada uma das faces das extremidades dos provetes um reforço com uma camada de manta de 80 *mm* de comprimento e 50 *mm* de largura, complementado com a adição de uma chapa metálica com $50 \times 60 \text{ mm}^2$. Para a determinação da variação da extensão ao longo dos ensaios foi colocado um extensómetro de acordo com o representado na Figura 66 a) e 66 c). O ensaio de tração uniaxial foi realizado por controlo de deslocamento com uma velocidade de deformação de 0,016 *mm/s*. O esquema de ensaio adotado e o aspeto dos provetes após os ensaios estão representados na Figura 66.

De acordo com o ilustrado na Figura 66 d), verificou-se que a área de sobreposição das duas faixas de manta adotada ($50 \times 40 = 2000 \text{ mm}^2$) foi suficiente para que o modo de rotura dos provetes não ocorresse na ligação colada manta/manta. Com efeito, a rotura dos provetes ocorreu fora da zona da ligação das duas mantas (após o ensaio a zona de colagem das duas mantas estava perfeitamente intacta).

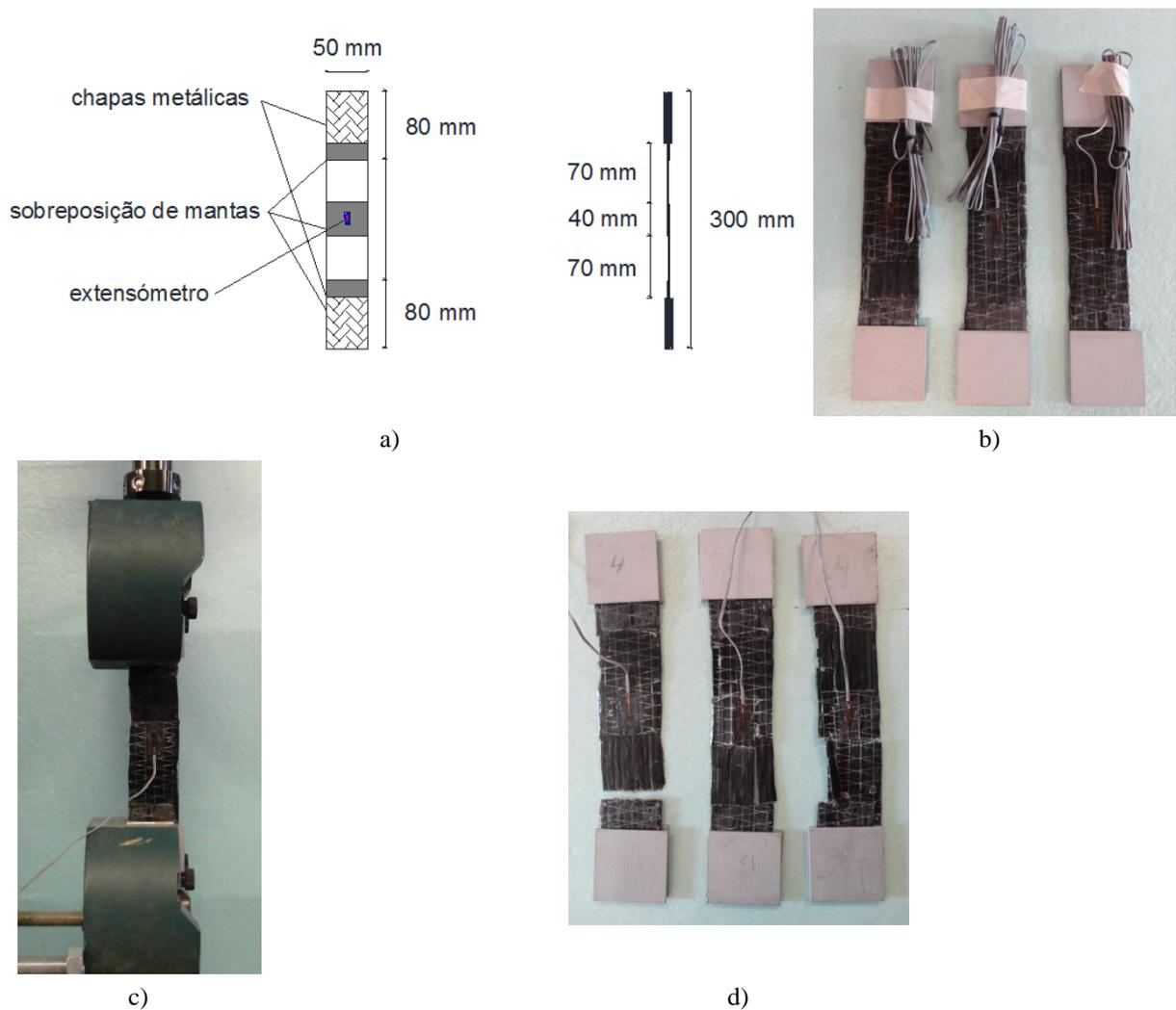


Figura 66 - Ensaio à tração das faixas de manta de CFRP: a) características dos provetes testados, b) provetes antes do ensaio, c) configuração do ensaio de tração uniaxial realizado, d) provetes após o ensaio (modos de rotura).

Na Figura 67 apresentam-se os diagramas tensão *versus* extensão obtidos nos ensaios dos três provetes anteriormente referidos. Dos ensaios realizados, verificou-se que o valor médio da força máxima e da tensão de rotura foram respetivamente, 24,5 *kN* (coeficiente de variação de 10,7%) e 2736,1 *MPa* (coeficiente de variação de 13,2%). Registe-se que o valor médio da força máxima obtida (24,5 *kN*) foi ligeiramente inferior ao valor médio da força máxima obtida nos provetes que foram testados para a caracterização das mantas (27,1 *kN*). Este facto pode dever-se a uma distribuição menos uniforme das fibras de carbono nas faixas de manta usadas para a construção dos provetes representados na Figura 66. Neste contexto, refira-se que o valor da força máxima indicada na ficha técnica disponibilizada pelo fabricante é de 27,9 *kN*.

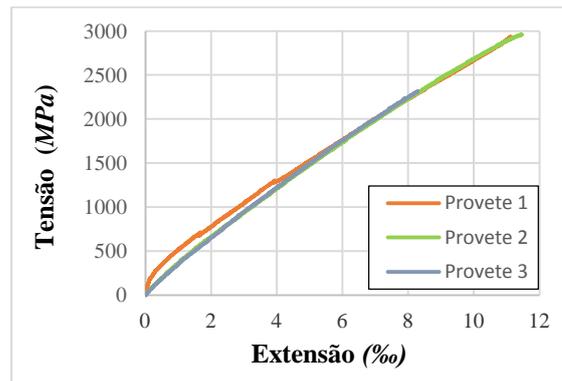


Figura 67 - Diagrama tensão *versus* extensão dos provetes ensaiados.

3.3. Aplicação do reforço de CFRP

3.3.1. Vigas reforçadas simultaneamente à flexão e ao corte sem fixação do reforço ao corte

Nesta secção são apresentadas as etapas fundamentais da aplicação dos reforços de CFRP nas vigas S1SFS e S2SFS (vigas em que não foi adotado o sistema de fixação das extremidades das faixas discretas de manta em forma de U usadas para o reforço ao corte), de acordo com as soluções apresentadas nas Figura 59 b) e Figura 60 b), respetivamente. A intervenção de reforço destas vigas pode ser dividida em três partes: i) preparação das vigas para o reforço à flexão e ao corte, ii) reforço à flexão e iii) reforço ao corte.

3.3.1.1. Preparação das vigas para a execução do reforço à flexão e ao corte

Previamente à execução dos entalhes (Figura 68), foi realizada a marcação na face tracionada das vigas da posição exata de cada um dos laminados a inserir. Os entalhes foram feitos recorrendo a uma máquina de corte de elevada precisão para que fosse obtido em todas as vigas a largura de 5 mm e a profundidade de 15 mm. Devido à espessura adotada para o betão de recobrimento (25 mm) nenhuma armadura foi danificada com a abertura dos entalhes. As dimensões dos entalhes foram verificadas manualmente com recurso a um paquímetro digital em quatro locais distintos e constatou-se a sua conformidade. Com a finalidade de facilitar o processo de execução dos entalhes e remoção de poeiras e resíduos provenientes do processo de corte, este foi efetuado em simultâneo com a aplicação de jatos de água.

Após a abertura dos entalhes, procedeu-se à preparação da superfície de betão de forma a, posteriormente, ser aplicado o reforço ao corte com mantas de CFRP coladas externamente. Assim, recorrendo a um esmeril procedeu-se à remoção da camada superficial das faces da

alma da viga (Figura 69 a)). Também se procedeu ao arredondamento das arestas da base da alma da viga para (Figura 69 b)) evitar concentração de tensões que pudessem provocar uma rotura prematura do reforço ao corte. Posteriormente, aplicaram-se jatos de ar a fim de eliminar as sujidades remanescentes (Figura 69 c)) e procedeu-se à marcação do posicionamento onde seriam coladas as faixas de manta de CFRP (Figura 69 d)).

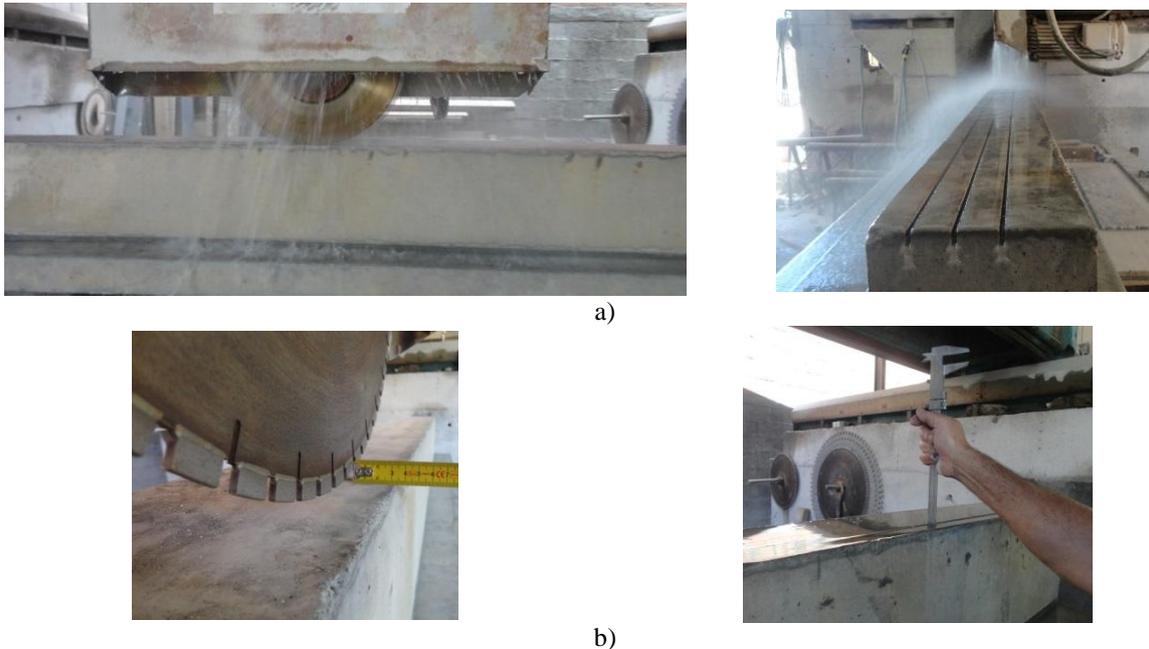


Figura 68 - Abertura dos entalhes para o reforço à flexão usando a técnica NSM com laminados de CFRP inseridos: a) execução dos entalhes, b) verificação da conformidade dos entalhes.

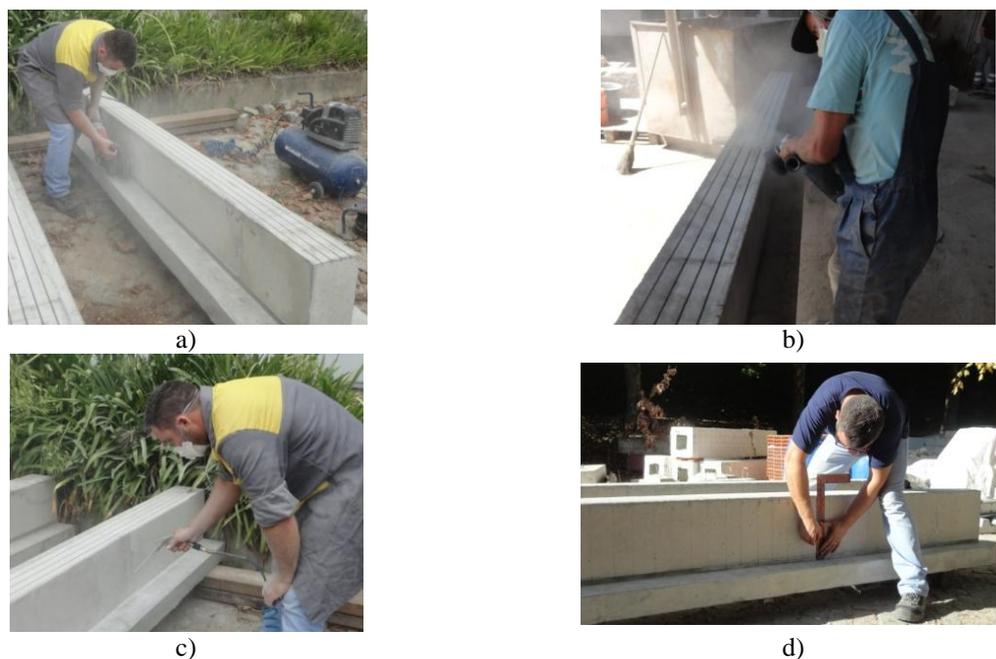


Figura 69 - Preparação da superfície de betão para o reforço ao corte: a) remoção da camada superficial, b) eliminação das arestas da base da alma das vigas, c) aplicação de jatos de ar, d) marcação da posição das mantas.

3.3.1.2. Reforço à flexão

Previamente ao início do reforço à flexão com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM, verificou-se que os entalhes estavam secos e procedeu-se à sua limpeza com jatos de ar, procurando-se assim retirar todas as sujidades remanescentes tendo como objetivo garantir as melhores condições de aderência possível na ligação betão-adesivo. Os laminados fornecidos em rolo com a secção transversal adotada para o reforço foram cortados com o comprimento desejado (2300 *mm* por forma a garantir a distância inicialmente estabelecida entre os apoios da viga e as extremidades do reforço à flexão). Depois de cortados, os laminados foram limpos com um desengordurante (acetona) por forma a garantir boa aderência entre o CFRP e o adesivo.

Na Figura 70 apresentam-se, sequencialmente, as fases mais significativas do processo de aplicação do reforço à flexão de vigas de betão armado por meio da inserção de laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM), que se baseou no procedimento descrito na secção 2.4.2..

3.3.1.3. Reforço ao corte

Previamente ao início do reforço ao corte com faixas discretas de manta de CFRP aplicadas com a técnica EBR, verificou-se a superfície de betão estava seca e procedeu-se novamente à sua limpeza com jatos de ar, procurando-se assim retirar todas as sujidades remanescentes tendo como objetivo garantir as melhores condições de aderência possível na ligação betão-resina.

As mantas fornecidas em rolo com largura de 600 *mm* foram cortadas na direção das fibras com a largura desejada e ortogonalmente às fibras com o comprimento desejado.

Na Figura 71 apresentam-se, sequencialmente, as fases mais significativas do processo de aplicação do reforço ao corte das vigas (técnica EBR com faixas discretas de manta de CFRP coladas em forma de U), que se baseou no procedimento descrito na secção 2.4.1..

No caso do reforço ao corte da viga S1SFS foram aplicadas faixas de duas camadas de manta, enquanto no caso da viga S2SFS foram aplicadas faixas de uma camada de manta (o reforço ao corte destas duas vigas apenas deferiu no número de camadas de manta). Assim sendo, para o caso da viga S1SFS, o procedimento das Figura 71 e), 71 f) e 71 g) foi realizado duas vezes.



a) Vigas a reforçar, laminados e componentes do adesivo



b) Fabrico do adesivo.



c) Aplicação do adesivo no laminado.



d) Aplicação do adesivo no entalhe



e) Inserção do laminado no entalhe



f) Acabamento final com remoção do adesivo em excesso



g) Aspeto geral das vigas após o reforço à flexão

Figura 70 - Fases da aplicação do reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados no betão de recobrimento.



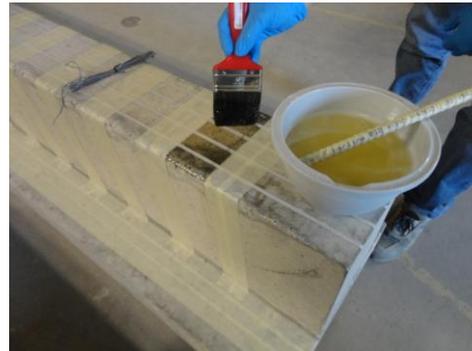
a) Viga a reforçar, mantas e componentes da resina



b) Fabrico da resina



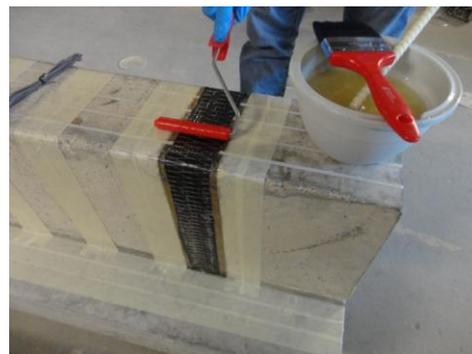
c) Aplicação de resina na manta



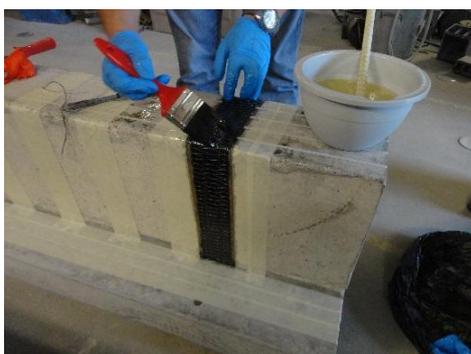
d) Aplicação de resina no betão



e) Processo de colagem de uma camada de manta



f) Alinhamento das fibras e eliminação de eventuais bolhas de ar



g) Aplicação de resina sobre a camada de manta



h) Aspeto geral das vigas após o reforço ao corte

Figura 71 - Fases da aplicação do reforço ao corte com faixas discretas de manta de CFRP (técnica EBR).

3.3.2. Vigas reforçadas simultaneamente à flexão e ao corte com fixação do reforço ao corte

Nesta secção são apresentadas as etapas fundamentais da aplicação dos reforços de CFRP nas vigas S1SFS-A e S2SFS-A (vigas em que foi adotado o sistema de fixação das extremidades das faixas discretas de manta em forma de U usadas para o reforço ao corte), de acordo com as soluções apresentadas nas Figura 59 c) e Figura 60 c), respetivamente. A intervenção de reforço destas vigas pode ser dividida em quatro partes: i) preparação das vigas para o reforço à flexão e ao corte, ii) reforço à flexão, iii) reforço ao corte e iv) aplicação do sistema de fixação das extremidades do reforço ao corte.

As partes i) a iii) são iguais às que se descreveram no âmbito do reforço das vigas S1SFS e S2SFS (a viga S1SFS-A apenas difere da viga S1SFS na questão do sistema de fixação das extremidades do reforço ao corte, que também é a única diferença entre as vigas S2SFS e S2SFS-A). A definição deste sistema teve como base nos resultados obtidos nos ensaios apresentados na secção 3.2.2., através dos quais se conclui que uma área de colagem igual a 2000 mm^2 é suficiente para que não haja cedência da ligação manta/manta.

Desta forma, nesta secção será detalhado a forma como foi executado o sistema de fixação das extremidades do reforço ao corte, que seguiu os seguintes passos: i) realização de orifícios no banzo da viga (a meio da largura de cada faixa de manta) com recurso a uma broca com 10 mm; ii) regularização da superfície de betão na parte superior da viga nas secções em que se introduziu a manta, eliminando todas as zonas salientes capazes de causar concentração de tensões no CFRP; iii) limpeza das zonas onde se executaram as tarefas i) e ii); iv) após o corte das faixas de manta de CFRP e da preparação da resina, procede-se à aplicação desta quer no betão como nas mantas; v) aplicação das faixas de manta (o reforço ao corte em forma de U na alma da viga e a manta enrolada em forma de U invertido a partir da parte superior da viga); vi) sobreposição das faixas de manta com uma área mínima de 2000 mm^2 ; vii) acabamento final. Algumas destas tarefas estão representadas de forma sequencial na Figura 72.



a) Realização de orifícios no banzo da viga



b) Regularização da superfície da parte superior da viga



c) Limpeza das zonas do sistema de fixação



d) Aplicação de resina nas mantas



e) Enrolamento e introdução na manta nos orifícios (U invertido)



f) Colagem da faixa de manta em U (alma da viga)



g) Impregnação conjunta da faixa de manta em U com a manta em U invertido referente ao sistema de fixação



h) Verificação da correta aplicação do reforço



i) Reforço ao corte com manta em forma de U com o sistema de fixação das extremidades



j) Aspeto das mantas na parte superior da viga



k) Aspeto geral da viga reforçada

Figura 72 - Execução do sistema de fixação das extremidades do reforço ao corte.

No caso do reforço ao corte da viga S1SFS-A foram aplicadas faixas discretas de duas camadas de manta, enquanto no caso da viga S2SFS-A foram aplicadas faixas discretas de uma camada de manta (o reforço ao corte destas duas vigas apenas diferiu no número de camadas de manta). Assim sendo, para o caso da viga S1SFS-A, o procedimento das Figura 72 d) a 72 h) foi realizado duas vezes. Na viga S1SFS-A a sequência de camadas de manta, na zona de sobreposição a partir da superfície de betão, foi a seguinte: 1ª camada de manta do reforço ao corte; 1ª camada de manta referente ao sistema de fixação (U invertido); 2ª camada de manta do reforço ao corte; 2ª camada de manta referente ao sistema de fixação (U invertido).

3.4. Sistema de ensaio e instrumentação das vigas

As vigas foram ensaiadas à flexão sob três pontos de carga (Figura 73) até atingirem a sua rotura. A medição da carga aplicada durante o ensaio foi efetuada com recurso a uma célula de carga com capacidade máxima de 1000 *kN* (Figura 74). Os deslocamentos verticais foram medidos em cinco secções da viga com recurso a cinco transdutores de deslocamentos (LVDT's - linear variable differential transformer). Um LVDT foi instalado na secção de aplicação da carga, sendo os restantes instalados da seguinte forma (ver Figura 75): dois no menor vão de corte (espaçados de 300 *mm* medidos a partir da secção de aplicação da carga) e dois no maior vão de corte (espaçados de 450 *mm* medidos também a partir da secção de aplicação da carga).

Os ensaios foram controlados por intermédio do LVDT colocado na secção de aplicação da carga tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento de 0,01 *mm/s*.

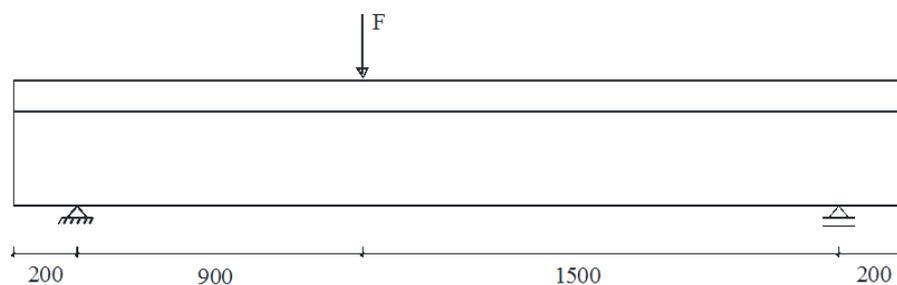
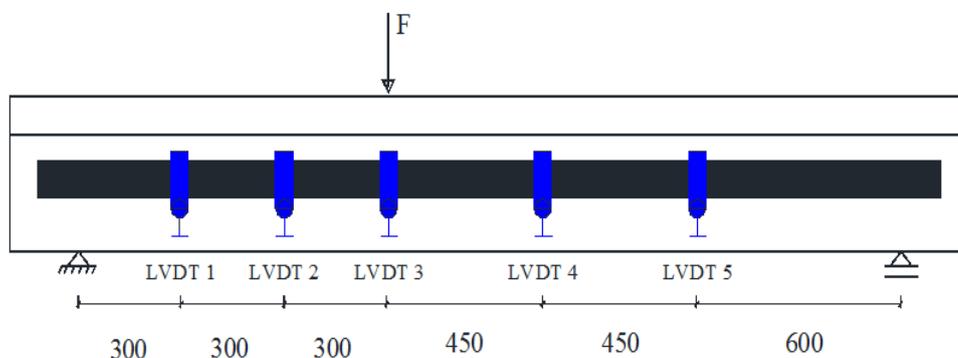


Figura 73 - Esquema de ensaio das vigas à flexão em três pontos de carga (dimensões em *mm*).



Figura 74 - Sistema de ensaio das vigas.

Figura 75 - Disposição dos LVDT na viga (dimensões em *mm*).

Em termos de instrumentação das armaduras, em todas as vigas foram colocados dois extensómetros, um na armadura longitudinal (ext.1) na secção de aplicação da carga e outro no estribo posicionado no menor vão de corte a 600 *mm* da secção de aplicação da carga (ext.2). Em relação à face inferior da viga, o extensómetro que foi colocado no estribo estava a 164 *mm* de altura (Figura 76).

Nas vigas reforçadas também houve instrumentação dos reforços de CFRP. Foram colocados dois extensómetros em dois dos quatro laminados que foram utilizados no reforço à flexão (um na secção de aplicação da carga, o extensómetro ext.3, e outro na secção a meio no menor vão de corte, o extensómetro ext.4). No que se refere ao reforço ao corte, foram instrumentadas duas faixas de manta, cada uma com dois extensómetros. A designação dos quatro extensómetros colocados nas mantas é ext.5, ext.6, ext.7 e ext.8 e a sua localização está representada na Figura 77 e na Figura 78, respetivamente, para as vigas da série 1 e da série 2. A localização dos extensómetros ext.5, ext.6, ext.7 e ext.8 na viga S1SFS é a mesma da viga S1SFS-A (vigas reforçadas da série 1). A localização dos extensómetros ext.5, ext.6, ext.7 e ext.8 na viga S2SFS é a mesma da viga S2SFS-A (vigas reforçadas da série 2). Todas as

configurações de instrumentação visaram monitorizar as zonas de maior solicitação à flexão e ao corte.

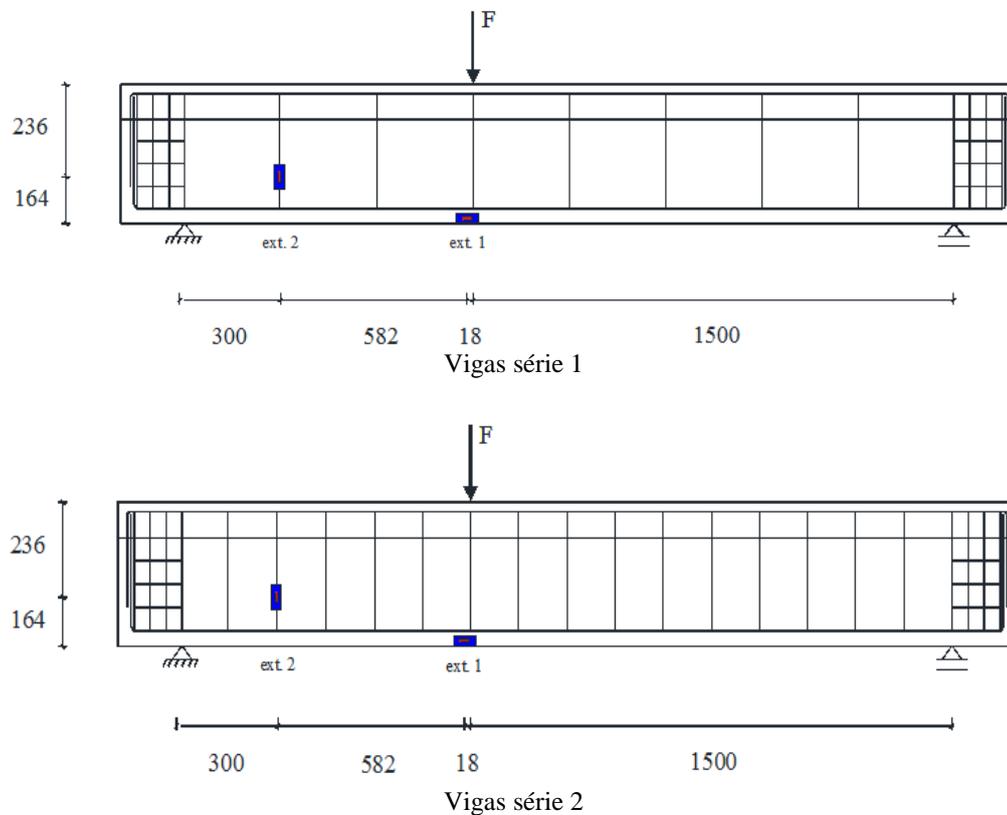


Figura 76 - Instrumentação das armaduras (valores em mm).

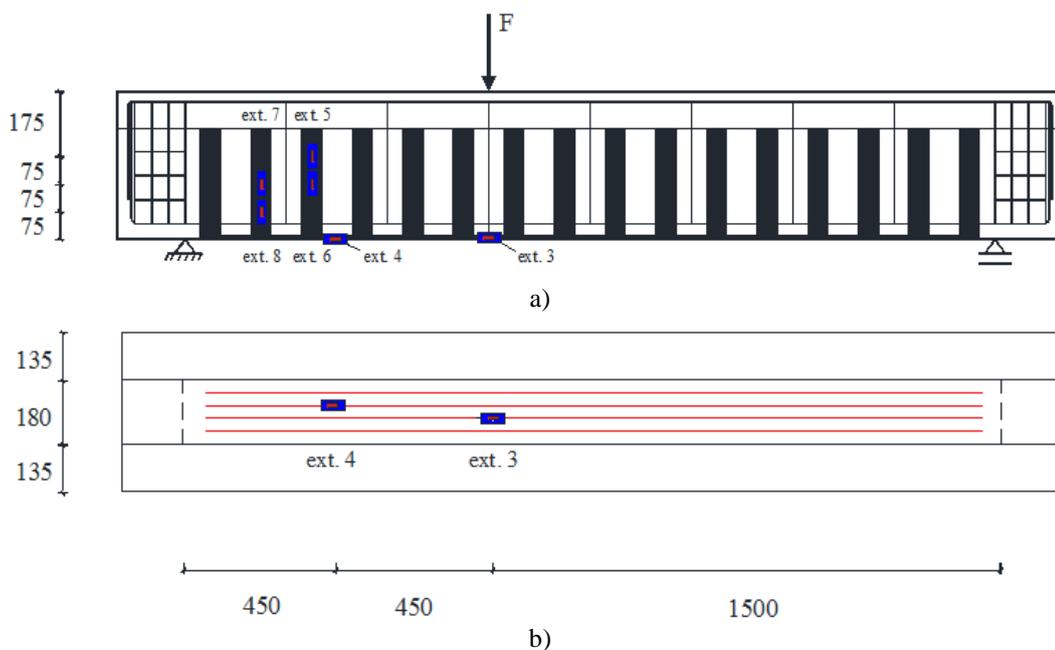


Figura 77 - Instrumentação do CFRP nas vigas reforçadas da série 1 (valores em mm): a) alçado, b) planta.

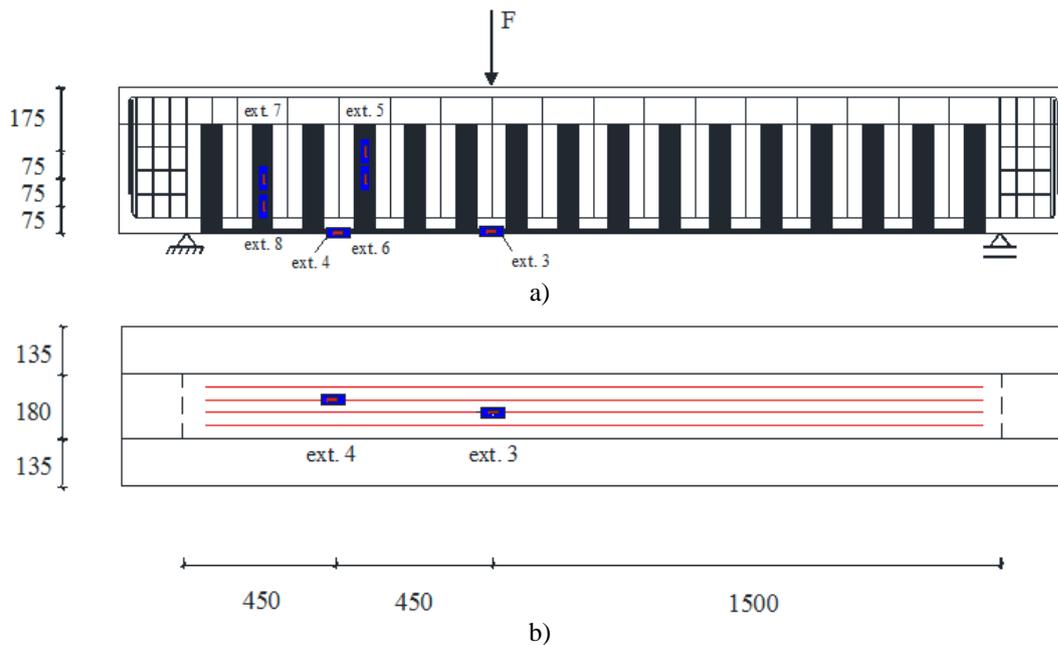


Figura 78 - Instrumentação do CFRP nas vigas reforçadas da série 2 (valores em *mm*): a) alçado, b) planta.

3.5. Apresentação e análise dos resultados das vigas da série 1

Nesta secção serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios das vigas da série 1 em termos de capacidade de carga das vigas, do padrão de fendilhação, dos modos de rotura, do nível de mobilização dos reforços de CFRP e do grau de eficácia da solução proposta para fixação das extremidades do reforço ao corte.

3.5.1. Capacidade de carga das vigas até à rotura

Na Figura 79 apresentam-se as curvas de comportamento força vs deslocamento na secção de aplicação da carga nas vigas da série 1, onde é possível constatar que as soluções de reforço de CFRP adotadas proporcionaram aumentos de rigidez e de capacidade de carga na rotura. A análise da Figura 79 permite verificar que para uma carga cerca dos 155 *kN* verificou-se uma diminuição acentuada da rigidez da viga de referência motivada pelo surgimento de uma fenda diagonal de corte. Devido à presença do reforço de CFRP esta diminuição de rigidez não ocorreu nas vigas reforçadas. Outra constatação que se pode fazer da análise da Figura 79 é que apenas na viga S1SFS-A se verificou a cedência das armaduras longitudinais (para uma carga cerca dos 380 *kN*) e que esta viga teve uma elevada capacidade deformacional, além da deformação associada à referida cedência das armaduras. Na curva de comportamento da viga S1SFS, cerca dos 330 *kN* existe uma momentânea diminuição da capacidade de carga da viga, assim como, uma diminuição da rigidez devido ao destacamento de uma das faixas de manta que atravessam a fenda de corte que motivaria a rotura da viga.

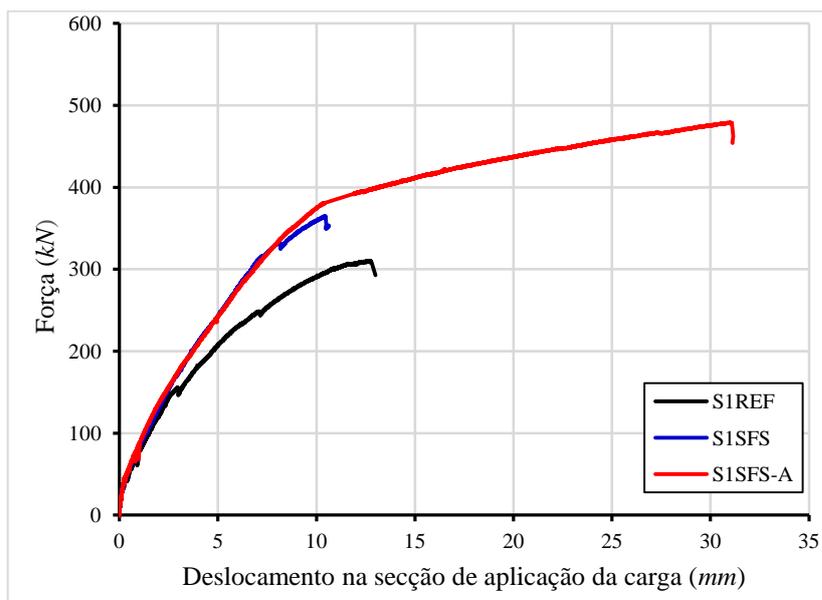


Figura 79 - Comportamento até à rotura das vigas da série 1.

Na Tabela 16 apresenta-se o valor da carga máxima (F_{max}) e o correspondente valor da flecha na secção de aplicação da carga (u_{Fmax}) das três vigas da série 1. Tendo como base os valores de F_{max} e u_{Fmax} da viga de referência S1REF foram determinados os acréscimos de carga máxima e de flecha associada à carga máxima que as soluções de reforço das vigas S1SFS e S1SFS-A proporcionaram.

Os dados da Tabela 16 indicam que as soluções de reforço de CFRP testadas nas vigas da série 1 conduziram a acréscimos de carga máxima que variaram entre os 17,9% e os 54,4%. Em termos de capacidade deformacional na rotura verificou-se, que relativamente à viga de referência S1REF, a viga S1SFS teve uma diminuição de 16,5% enquanto a viga S1SFS-A registou um aumento de 128,7%.

Tabela 16 - Principais resultados obtidos nas vigas da série 1.

Viga	$F_{máx}$ (kN)	Acréscimo de carga máxima (%)	$u_{Fmáx}$ (mm)	Acréscimo da flecha $u_{Fmáx}$ (%)
S1REF	310,3	-	12,54	-
S1SFS	365,1	17,9	10,44	-16,5
S1SFS-A	479,0	54,4	28,59	128,7

3.5.2. Padrão de fendilhação e modos de rotura

3.5.2.1. Viga de referência - S1REF

Na Figura 80 apresenta-se a evolução do padrão de fendilhação registado no menor vão de corte da viga S1REF durante o seu ensaio até à rotura. Nesta figura também se apresenta o padrão de fendilhação final registado na viga S1REF.

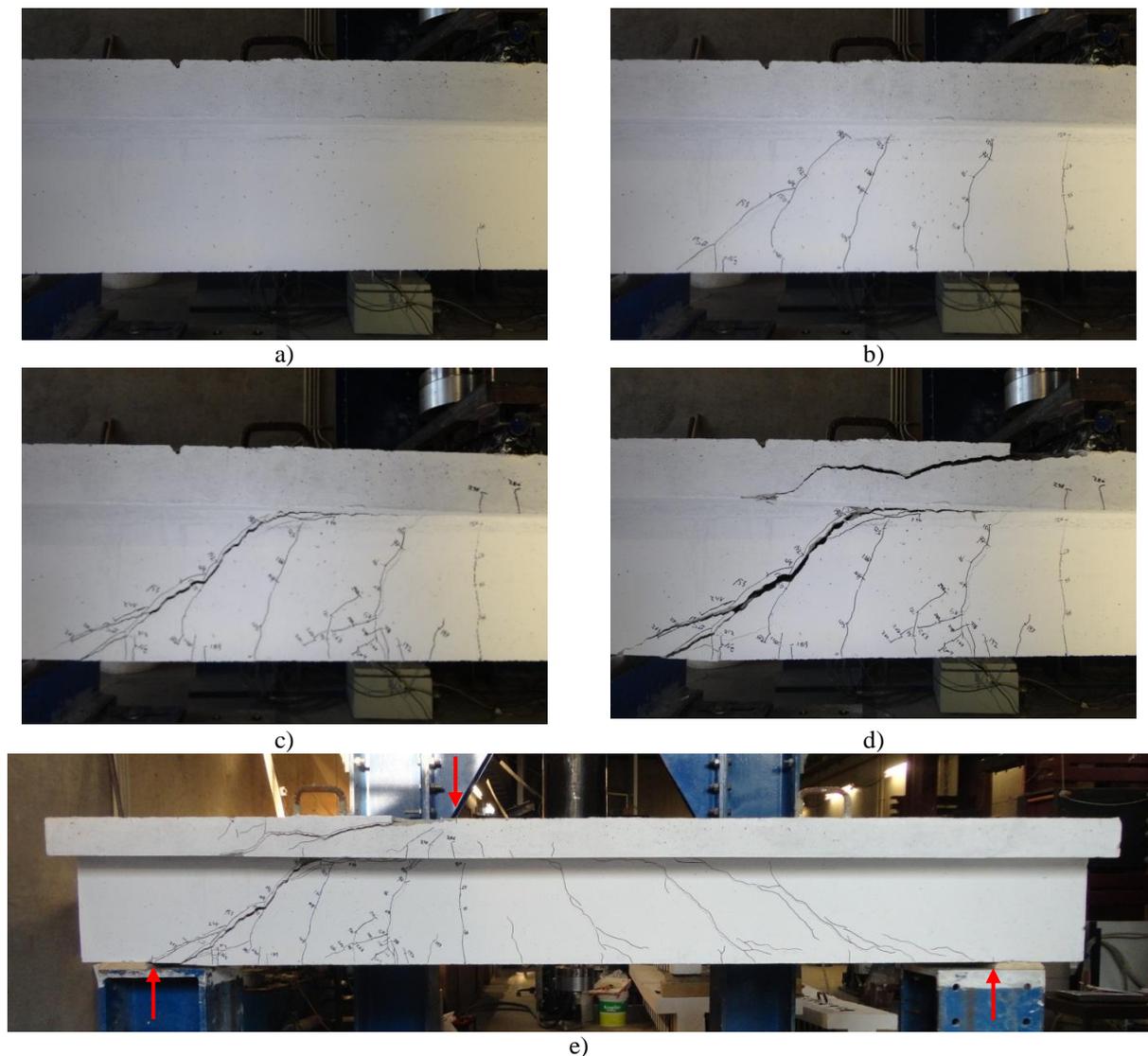


Figura 80 - Comportamento da viga S1REF: a) aparecimento da primeira fenda de flexão (48 kN), b) aparecimento da primeira fenda de corte (155 kN), c) momento em que a viga atinge a capacidade de carga máxima (310,3 kN), d) rotura por corte da viga, e) padrão de fendilhação final registado na viga.

No decorrer do ensaio da viga S1REF, a primeira fenda que surgiu (aos 48 kN de carga) foi de flexão e ocorreu na zona de aplicação da carga (Figura 80 a)). Com o aumentar do carregamento foram surgindo novas fendas de flexão até que aos 155 kN surgiu a primeira fenda de corte (Figura 80 b)). Tal como se verificou anteriormente com o surgimento desta fenda verificou-se a ocorrência de uma diminuição da rigidez da viga (Ver Figura 79). Com o evoluir do carregamento esta fenda de corte desenvolveu-se de acordo com o representado na Figura 80 c), que corresponde ao momento em que a viga atinge a sua capacidade de carga máxima (310,3 kN), imediatamente antes de se dar a rotura do estribo posicionado a 300 mm do apoio. A rotura do outro estribo posicionado no menor vão de corte deu-se após a viga ter atingido a sua carga máxima. O aspeto final do menor vão de corte da viga S1REF após o ensaio à rotura está representado na Figura 80 d). Na Figura 80 e) está representado o padrão

de fendilhação final da viga S1REF após o ensaio à rotura, onde é evidente que o modo de rotura da viga foi por corte no menor vão de corte da viga. No maior vão de corte pode-se verificar que ao longo do carregamento da viga ocorreram três fendas diagonais de corte.

3.5.2.2. Viga reforçada simultaneamente à flexão e ao corte - S1SFS

Na Figura 81 apresenta-se a evolução do padrão de fendilhação registado no menor vão de corte da viga S1SFS durante o seu ensaio até à rotura. Nesta figura também se apresenta o padrão de fendilhação final registado na viga S1SFS.

No decorrer do ensaio da viga S1SFS, a primeira fenda que surgiu foi de flexão e ocorreu na zona de aplicação da carga (Figura 81 a)). Com o aumentar do carregamento foram surgindo novas fendas de flexão e uma fenda diagonal de corte, de acordo com o representado na Figura 81 b) (padrão de fendilhação para uma carga de 310 *kN*, que corresponde ao valor da carga máxima da viga de referência S1REF). O carregamento da viga aumentou até aos 330 *kN*, altura em que ocorreu o destacamento da parte superior da terceira faixa de manta a contar do apoio (Figura 81 c)). Tal como referido anteriormente, o destacamento desta faixa de manta motivou uma pequena diminuição da capacidade de carga da viga (Figura 79), que voltaria a aumentar até aos 365,1 *kN* (carga máxima). Esta carga ocorreu imediatamente antes de se dar o destacamento da segunda faixa de manta a contar do apoio (Figura 81 d)). Na Figura 81 e) está representado o padrão de fendilhação final da viga S1SFS após o ensaio à rotura, onde é evidente que o modo de rotura da viga ocorreu por corte, no menor vão de corte da viga, por destacamento do reforço ao corte de CFRP. No maior vão de corte pode-se verificar que ao longo do carregamento da viga ocorreram três fendas diagonais de corte não se tendo verificado qualquer destacamento de mantas de CFRP.

A comparação das Figura 80 c) e Figura 81 b), que se referem respetivamente às vigas S1REF e S1SFS para uma carga de 310 *kN* (carga máxima da viga de referência S1REF), permite observar o efeito da presença do reforço de CFRP no controlo da fenda diagonal de corte.

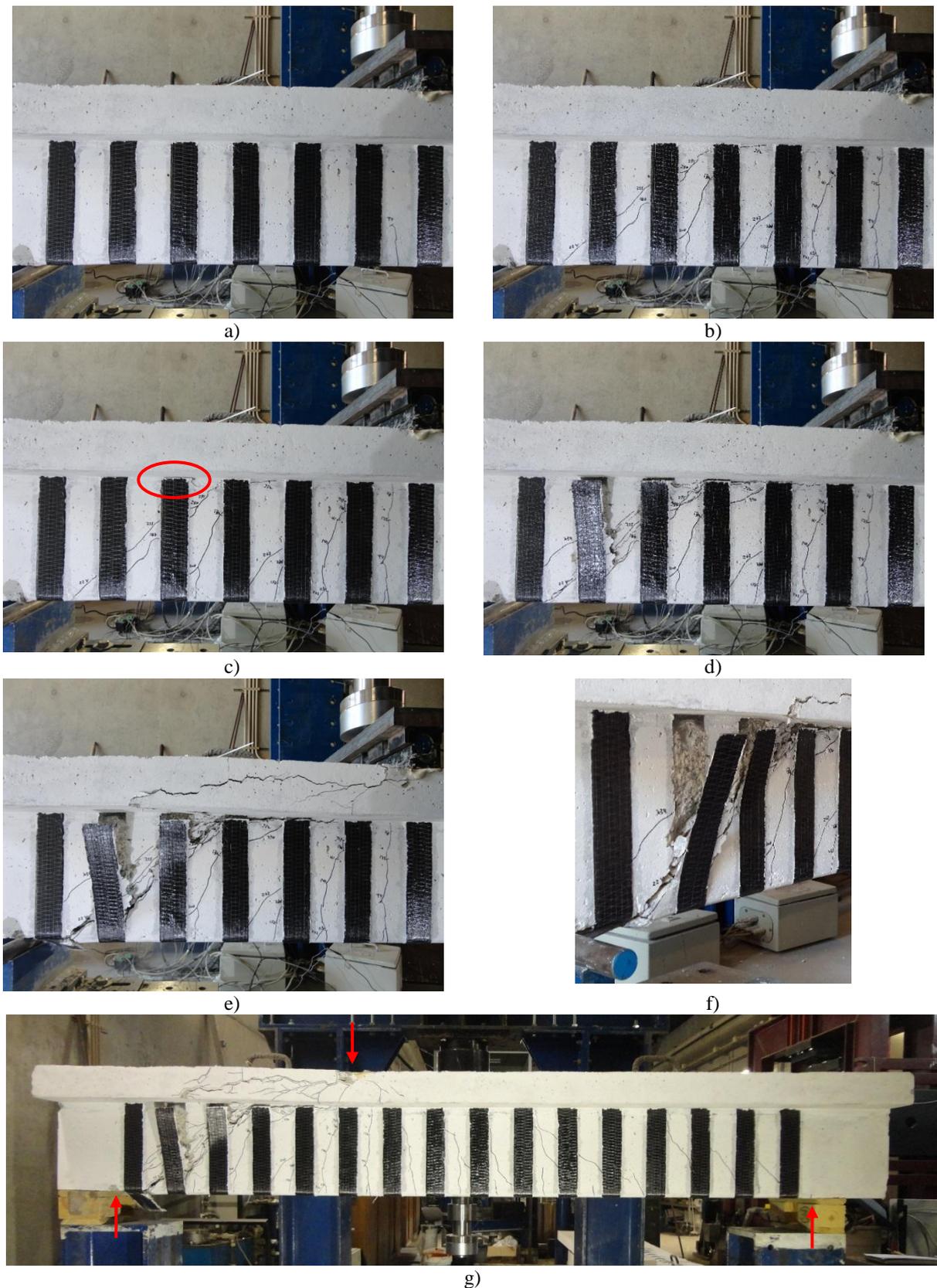


Figura 81- Comportamento da viga S1SFS: a) aparecimento da primeira fenda de flexão, b) padrão de fendilhação registado para uma carga de 310 *kN*, c) destacamento da 3ª faixa de manta (aos 330 *kN*), d) destacamento da 2ª faixa de manta (aos 365,1 *kN*), e) rotura por corte da viga, f) detalhe do destacamento das mantas de CFRP, g) padrão de fendilhação final registado na viga.

3.5.2.3. Viga reforçada simultaneamente à flexão e ao corte com faixas de manta ancoradas no banzo - S1SFS-A

Na Figura 82 apresenta-se a evolução do padrão de fendilhação registado no menor vão de corte da viga S1SFS-A durante o seu ensaio até à rotura. Nesta figura também se apresenta o padrão de fendilhação final registado na viga S1SFS-A.



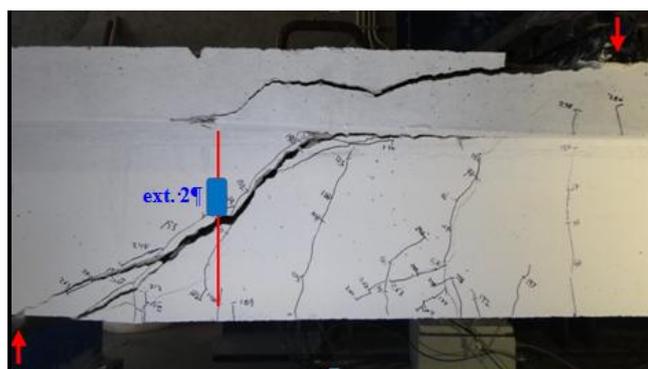
Figura 82 - Comportamento da viga S1SFS-A: a) aparecimento da primeira fenda de flexão, b) padrão de fendilhação registado para uma carga de 312 kN, c) padrão de fendilhação registado para uma carga de 368 kN, d) momento em que a viga atinge a capacidade de carga máxima, e) rotura por flexão (fenda de flexão vertical na secção de aplicação da carga), f) rotura dos laminados, g) padrão de fendilhação final registado na viga.

No decorrer do ensaio da viga S1SFS-A, a primeira fenda que surgiu foi de flexão e ocorreu na zona de aplicação da carga (Figura 82 a)). Com o aumentar do carregamento foram surgindo novas fendas de flexão e de corte, de acordo com o representado na Figura 82 b) (padrão de fendilhação para uma carga de 312 *kN* semelhante à carga máxima da viga de referência S1REF). Na Figura 82 c) apresenta-se o padrão de fendilhação para uma carga de 368 *kN* semelhante à carga máxima da viga S1SFS. Com o aumento do carregamento verificou-se que o sistema de fixação aplicado nas extremidades das faixas de manta de CFRP permitiu que não houvesse o destacamento prematuro do CFRP que ocorreu na viga S1SFS. Na Figura 82 d) apresenta-se o instante em que a viga atinge a sua capacidade de carga máxima imediatamente antes de ocorrer a rotura do reforço à flexão (480 *kN*). Na Figura 82 e) e 82 f) apresentam-se detalhes do modo de rotura da viga S1SFS-A, enquanto na Figura 82 g) está representado o padrão de fendilhação final que se registou nesta viga após o ensaio à rotura, onde é evidente que o modo de rotura da viga ocorreu por flexão. Em termos do sistema de fixação adotado para as extremidades das faixas de manta (reforço ao corte) verificou-se que a ligação manta/manta (ligação das mantas do reforço em forma de U com as mantas do sistema de fixação, o U invertido) não apresentou sinais cedência. Neste contexto, refira-se que houveram alguns descolamentos pontuais de algumas faixas de manta atravessadas pelas fendas mais significativas.

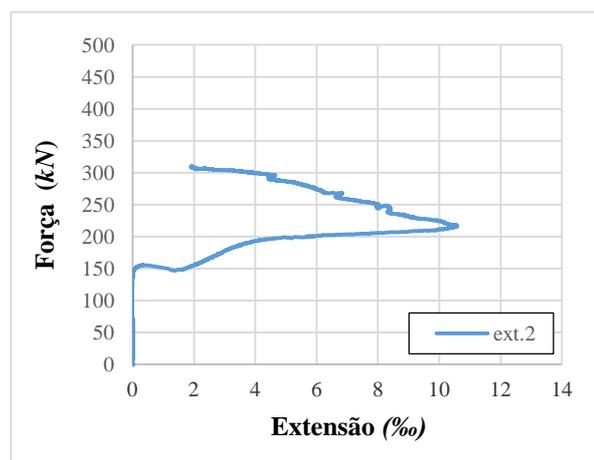
3.5.3. Extensões nas armaduras e no CFRP

Nas Figuras 83, 84 e 85 apresenta-se, respetivamente para as vigas S1REF, S1SFS e S1SFS-A, a relação entre as extensões registadas nos extensómetros colocados nas armaduras e nos CFRP (no caso das vigas reforçadas) e a força aplicada nas vigas até estas atingirem a sua capacidade de carga máxima. É de referir que existiram alguns extensómetros que não funcionaram ou que tiveram um funcionamento deficiente.

No que diz respeito à viga S1REF verifica-se que não foi possível avaliar a variação da extensão no estribo instrumentado até ao momento em que viga alcançou a sua capacidade de carga máxima. Com efeito, a máxima extensão lida foi de 10,8‰ para uma carga de 217 *kN*, verificando-se a partir desta carga uma inversão do sentido da variação das extensões. Tal como representado na Figura 83, e já referido anteriormente, o modo de rotura da viga foi por corte, tendo alcançado a sua capacidade de carga máxima imediatamente antes de se dar a rotura do estribo instrumentado, sendo que a secção de rotura deste estribo foi nas imediações da zona onde foi colado o extensómetro.



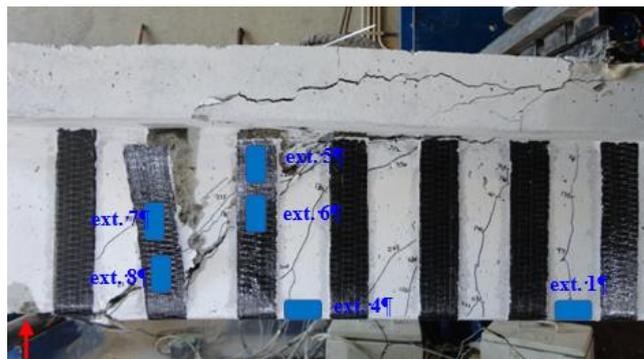
a)



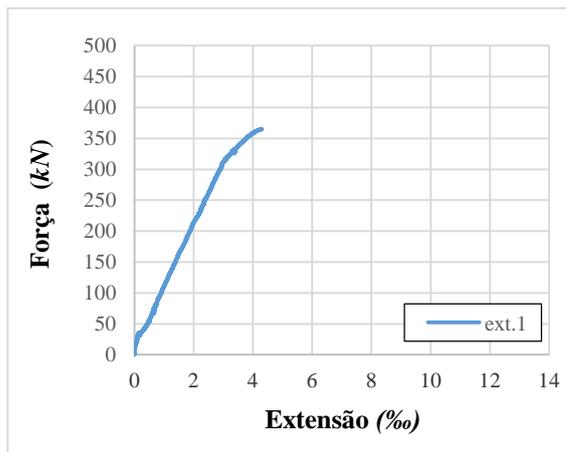
b)

Figura 83 - Viga S1REF: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S1REF e localização do extensómetro do estribo, b) variação das extensões no estribo instrumentado.

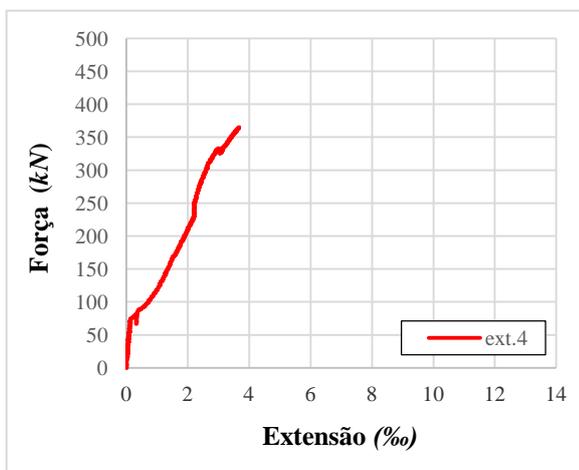
Em relação à viga S1SFS, verifica-se que o seu modo de rotura de corte, por destacamento das mantas de CFRP atravessadas pela fenda de rotura de corte, teve como consequência uma fraca mobilização do reforço à flexão. De acordo com a informação recolhida no ext.4, a máxima extensão registada neste extensómetro até ao momento em que a viga alcançou a sua capacidade de carga máxima (365,1 kN) foi de 3,7‰. Em relação aos extensómetros colocados nas faixas de manta (Figura 84), a primeira evidência refere-se ao facto de nos extensómetros ext.5 e ext.6 ter ocorrido uma inversão da variação da extensão com o aumento da carga a partir dos 330 kN. Com efeito, foi para este nível de carregamento que se deu o destacamento da faixa de manta onde os referidos extensómetros estavam colados. A extensão máxima registada nos extensómetros ext.5 e ext.6 (imediatamente antes de ocorrer o destacamento) foi de 3,0‰ e 2,1‰, respetivamente. O valor da máxima extensão registada nas mantas onde foram colocados extensómetros (4,4‰) ocorreu no ext.8 quando a viga atingiu a sua capacidade de carga máxima, imediatamente antes de ocorrer o destacamento da faixa de manta onde estavam colados os ext.7 e ext.8.



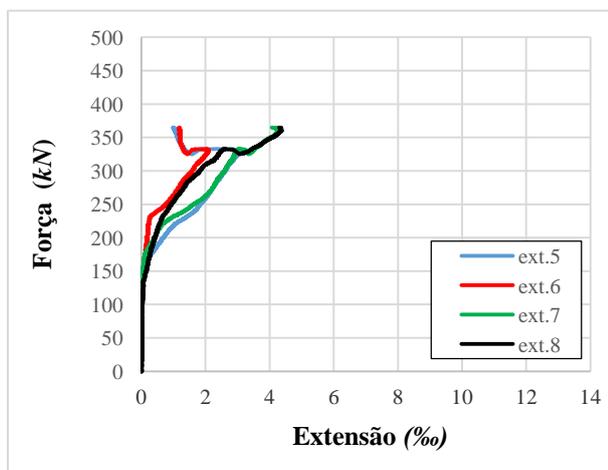
a)



b)



c)

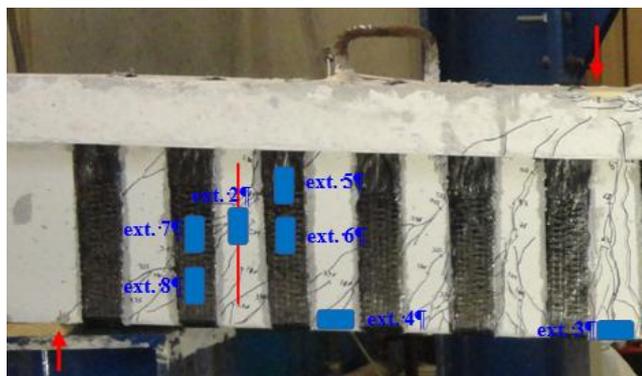


d)

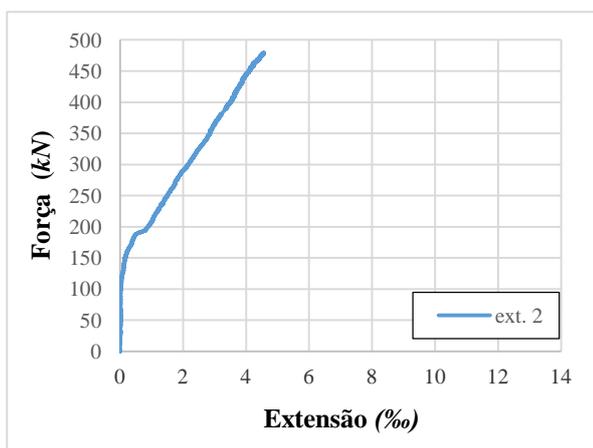
Figura 84 - Viga S1SFS: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S1SFS e localização dos extensómetros, b) variação das extensões na armadura longitudinal, c) variação das extensões no laminado, d) variação das extensões nas mantas.

No que diz respeito à viga S1SFS-A verifica-se que não foi possível avaliar a variação da extensão no extensómetro ext.3 até ao momento em que a viga alcançou a sua capacidade de carga máxima (479 kN). A máxima extensão lida neste extensómetro foi de 12,1% para uma carga de 451 kN, verificando-se a partir desta carga uma inversão do sentido da variação das extensões (Figura 85). De acordo com o que foi referido anteriormente, o modo de rotura desta viga foi por flexão por rotura dos laminados, havendo assim total mobilização do

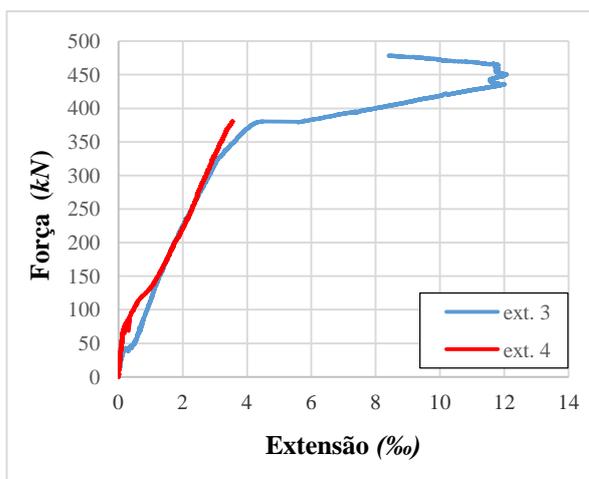
reforço à flexão (de acordo com os ensaios de tração uniaxial efetuados para a caracterização dos laminados, o valor médio da extensão de rotura era de 18%). Em termos de mobilização do reforço ao corte verifica-se que os valores máximos das extensões registadas nas mantas foram obtidos nos extensómetros ext.5 e ext.7 na altura em que a viga atingiu a sua capacidade de carga máxima (4,7‰ no ext.5 e 4,6‰ no ext.7).



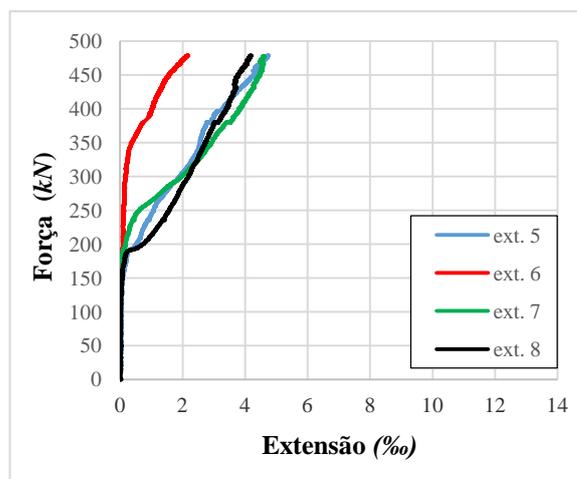
a)



b)



c)



d)

Figura 85 - Viga S1SFS-A: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S1SFS-A e localização dos extensómetros, b) variação das extensões na armadura longitudinal, c) variação das extensões nos laminados, d) variação das extensões nas mantas.

3.5.4. Efeito do sistema de fixação das mantas adotado

Nesta secção é analisado o grau de eficácia do sistema adotado para a fixação das extremidades do reforço ao corte com faixas discretas em forma de U, por intermédio da comparação do comportamento das vigas S1SFS (sem fixação do reforço ao corte) e S1SFS-A (com fixação do reforço ao corte).

A carga máxima e a correspondente flecha na secção de aplicação da carga da viga S1SFS foi 365,1 *kN* e 10,44 *mm*, respetivamente. A carga máxima e a correspondente flecha na secção de aplicação da carga da viga S1SFS-A foi 479,0 *kN* e 31,0 *mm*, respetivamente. Assim, verifica-se que o sistema de fixação das extremidades do reforço ao corte permitiu que a viga S1SFS-A tivesse, em relação à viga S1SFS, o incremento da capacidade de carga máxima de 31,1% e da capacidade deformacional na rotura de 196,9%.

A análise das Figura 81 d) e Figura 82 c) permite verificar o comportamento no menor vão de corte das vigas S1SFS e S1SFS-A, respetivamente, para a carga correspondente à capacidade de carga máxima da viga S1SFS. A comparação destas figuras permite verificar que o sistema de fixação das extremidades do reforço ao corte da viga S1SFS-A evitou o destacamento das faixas de manta que ocorreram na viga S1SFS.

Além de proporcionar os benefícios em termos de capacidade de carga máxima e capacidade deformacional na rotura, o sistema de fixação das extremidades do reforço ao corte permitiu que houvesse alteração do modo de rotura, de corte na viga S1SFS (Figura 81g)) para flexão na viga S1SFS-A (Figura 82 g)). A cedência das armaduras longitudinais apenas ocorreu na viga S1SFS-A.

O modo de rotura por flexão da viga S1SFS-A ocorreu com o total aproveitamento do material de reforço à flexão (rotura dos laminados de CFRP) e com uma elevada capacidade deformacional da viga após a cedência das armaduras longitudinais. Com efeito, na secção de aplicação da carga da viga S1SFS-A verificou-se que a flecha, referente à carga máxima, foi cerca de três vezes superior à flecha correspondente à carga de cedência das armaduras longitudinais.

3.6. Apresentação e análise dos resultados das vigas da série 2

Nesta secção serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios das vigas da série 2 em termos de capacidade de carga das vigas, do padrão de fendilhação, dos modos de

rotura, do nível de mobilização dos reforços de CFRP e do grau de eficácia da solução proposta para fixação das extremidades do reforço ao corte.

3.6.1. Capacidade de carga das vigas até à rotura

Na Figura 86 apresentam-se as curvas de comportamento força vs deslocamento na secção de aplicação da carga nas vigas da série 2, onde é possível constatar que as soluções de reforço de CFRP adotadas proporcionaram aumentos de rigidez e de capacidade de carga na rotura. A análise da Figura 86 permite verificar que entre os 180 kN e os 200 kN se verificou uma diminuição da rigidez da viga de referência devido à formação de fendas de corte. Devido à presença do reforço de CFRP esta diminuição de rigidez não ocorreu nas vigas reforçadas. Da análise da Figura 86 é possível verificar que apenas na viga S2SFS-A se verificou a cedência das armaduras longitudinais (para uma carga cerca dos 430 kN) e que esta viga teve uma elevada capacidade deformacional além da deformação associada à referida cedência das armaduras.

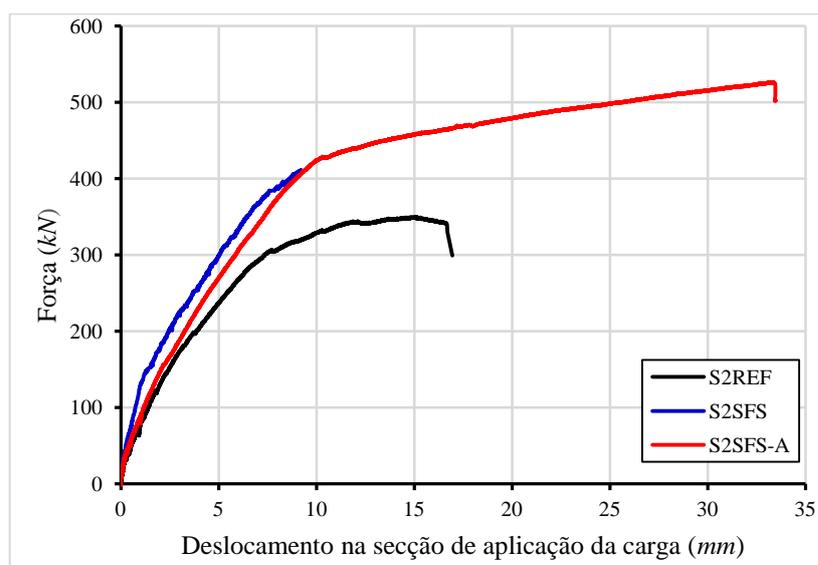


Figura 86 - Comportamento até à rotura das vigas da série 2.

Na Tabela 17 apresenta-se o valor da carga máxima (F_{max}) e o correspondente valor da flecha na secção de aplicação da carga (u_{Fmax}) das três vigas da série 2. Tendo como base os valores de F_{max} e u_{Fmax} da viga de referência S2REF foram determinados os acréscimos de carga máxima e de flecha associada à carga máxima que as soluções de reforço das vigas S2SFS e S2SFS-A proporcionaram.

Os dados da Tabela 17 indicam que as soluções de reforço de CFRP testadas nas vigas da série 2 conduziram a acréscimos de carga máxima que variaram entre os 17,7% e os 50,6%. Em termos de capacidade deformacional na rotura verificou-se, que relativamente à viga de

referência S2REF, a viga S2SFS teve uma diminuição de 38,1% enquanto a viga S2SFS-A registou um aumento de 123,2%.

Tabela 17 - Principais resultados obtidos nas vigas da série 2.

Viga	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	Acréscimo de carga máxima (%)	$u_{Fm\acute{a}x}$ (mm)	Acréscimo da flecha $u_{Fm\acute{a}x}$ (%)
S2REF	349,5	-	14,89	-
S2SFS	411,4	17,7	9,22	-38,1
S2SFS-A	526,2	50,6	33,23	123,2

3.6.2. Padrão de fendilhação e modos de rotura

3.6.2.1. Viga de referência - S2REF

Na Figura 87 apresenta-se a evolução do padrão de fendilhação registado no menor vão de corte da viga S2REF durante o seu ensaio até à rotura. Nesta figura também se apresenta o padrão de fendilhação final registado na viga S2REF.

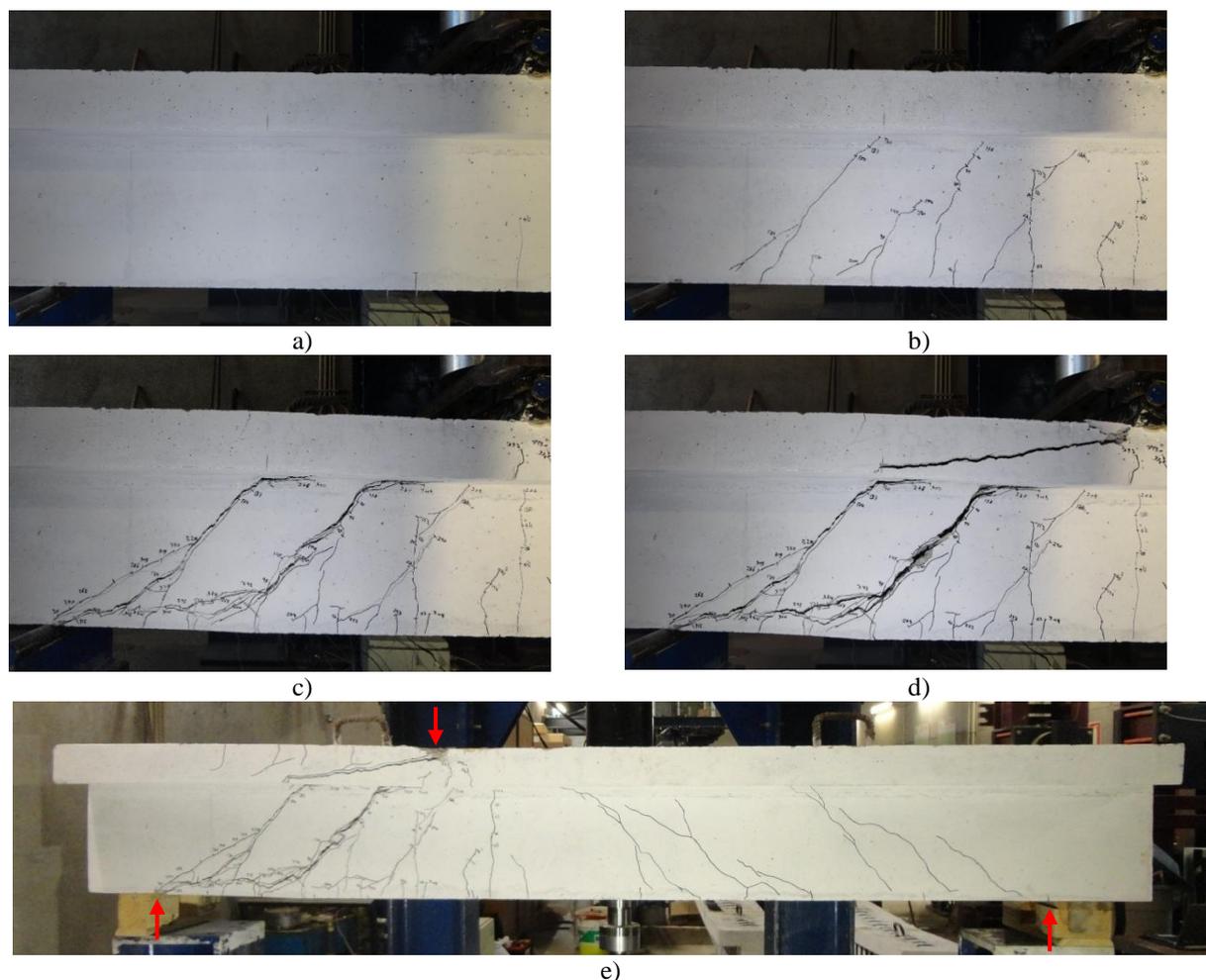


Figura 87 - Comportamento da viga S2REF: a) aparecimento da primeira fenda de flexão (50 kN), b) padrão de fendilhação para uma carga de 200 kN, c) momento em que a viga atinge a capacidade de carga máxima, d) rotura por corte da viga, e) padrão de fendilhação final na viga.

No decorrer do ensaio da viga S2REF, a primeira fenda que surgiu (aos 50 *kN* de carga) foi de flexão e ocorreu na zona de aplicação da carga (Figura 87 a)). Com o aumentar do carregamento foram surgindo novas fendas de flexão e de corte, verificando-se que, para uma carga de 200 *kN*, o padrão de fendilhação no menor vão de corte era o representado na Figura 87 b). Com o evoluir do carregamento duas das fendas de corte que se formaram (as mais próximas do apoio) desenvolveram-se de forma mais significativa de acordo com o representado na Figura 87 c), que corresponde ao momento em que a viga atinge a sua capacidade de carga máxima (349,5 *kN*), imediatamente antes de se dar a rotura do estribo posicionado a 600 *mm* do apoio (atravessado pela fenda de corte significativa mais próximo da seção de aplicação da carga). O aspeto final do menor vão de corte da viga S1REF após o ensaio à rotura está representado na Figura 87 d). Na Figura 87 e) está representado o padrão de fendilhação final da viga S2REF após o ensaio à rotura, onde é evidente que o modo de rotura da viga ocorreu por corte no menor vão de corte da viga. No maior vão de corte pode-se verificar que ao longo do carregamento da viga ocorreram cinco fendas diagonais de corte.

3.6.2.2. Viga reforçada simultaneamente à flexão e ao corte - S2SFS

Na Figura 88 apresenta-se a evolução do padrão de fendilhação registado no menor vão de corte da viga S2SFS durante o seu ensaio até à rotura. Nesta figura também se apresenta o padrão de fendilhação final registado na viga S2SFS.

No decorrer do ensaio da viga S2SFS, a primeira fenda que surgiu foi de flexão e ocorreu na zona de aplicação da carga (Figura 88 a)). Com o aumentar do carregamento foram surgindo novas fendas de flexão e também de corte, de acordo com o representado na Figura 88 b) (padrão de fendilhação para uma carga de 350 *kN* que corresponde à carga máxima da viga de referência S2REF). O carregamento da viga aumentou até aos 382 *kN*, altura em que ocorreu o destacamento da parte superior da terceira faixa de manta a contar do apoio (Figura 88 c)). A capacidade de carga da viga continuou a aumentar até que foi atingida a sua capacidade de carga máxima (411,4 *kN*), imediatamente antes de se dar o destacamento da segunda faixa de manta a contar do apoio (Figura 88 d)). Na Figura 88 e) está representado o padrão de fendilhação final da viga S2SFS após o ensaio à rotura, onde é evidente que o modo de rotura da viga ocorreu por corte, no menor vão de corte da viga, por destacamento do reforço ao corte de CFRP. No maior vão de corte pode-se verificar que ao longo do carregamento da viga ocorreram fendas de corte não se tendo verificado qualquer destacamento de mantas de CFRP.

A comparação das Figura 87 c) e Figura 88 b), que se referem respetivamente às vigas S2REF e S2SFS para uma carga de 350 kN (carga máxima da viga de referência S2REF), permite observar o efeito da presença do reforço de CFRP no controlo das fendas diagonais de corte.



Figura 88 - Comportamento da viga S2SFS: a) aparecimento da primeira fenda de flexão, b) padrão de fendilhação para uma carga de 350 kN, c) destacamento da 3ª faixa de manta (382 kN), d) destacamento da 2ª faixa de manta e rotura por corte da viga, e) padrão de fendilhação da viga.

3.6.2.3. Viga reforçada simultaneamente à flexão e ao corte com faixas de manta ancoradas no banzo - S2SFS-A

Na Figura 89 apresenta-se a evolução do padrão de fendilhação registado no menor vão de corte da viga S2SFS-A durante o seu ensaio até à rotura. Nesta figura também se apresenta o padrão de fendilhação final registado na viga S2SFS-A.

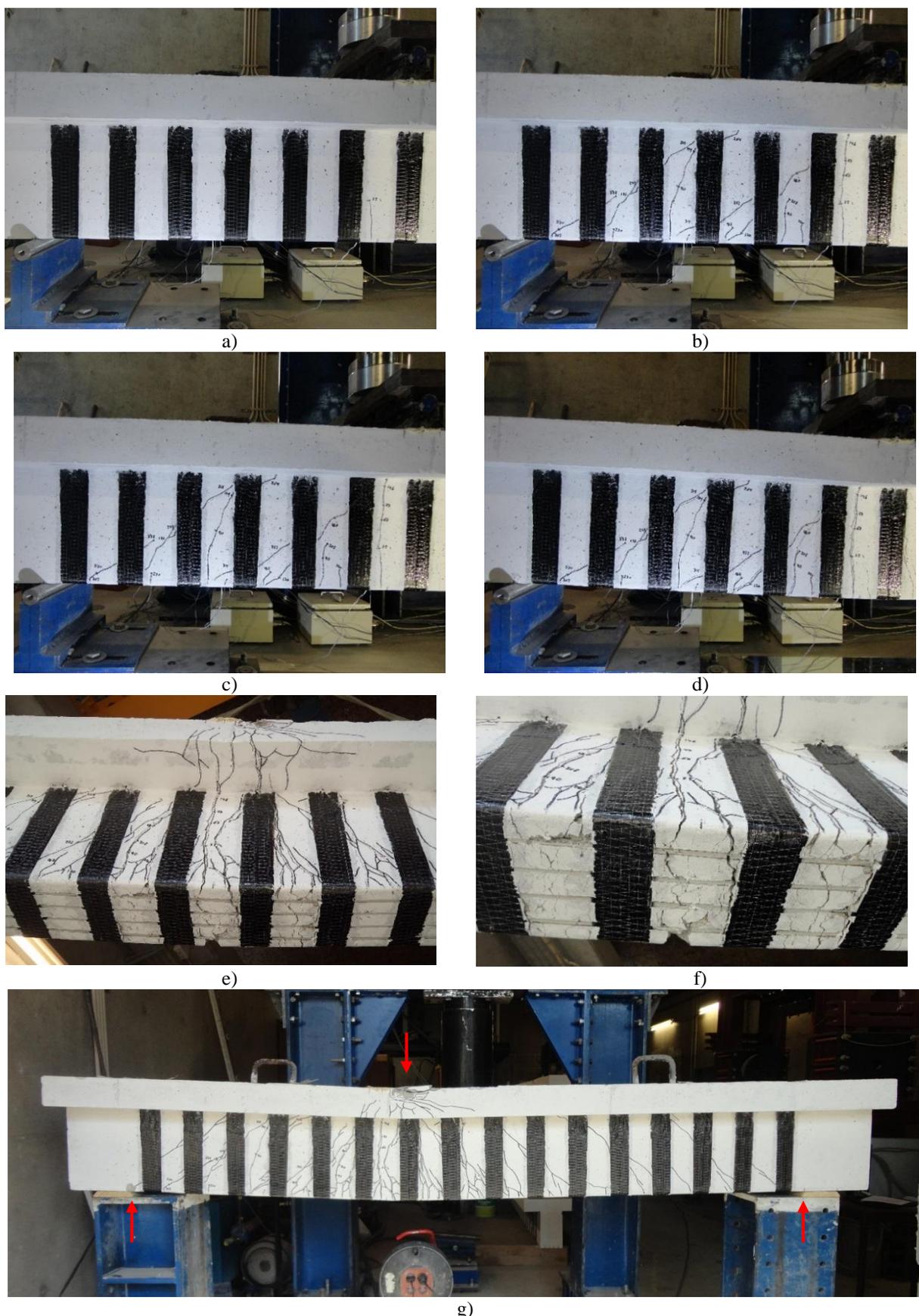


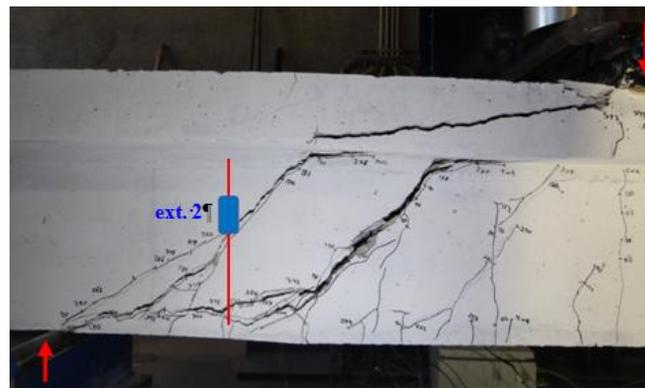
Figura 89 - Comportamento da viga S2SFS-A: a) aparecimento da primeira fenda de flexão, b) padrão de fendilhação registado para uma carga de 350 kN, c) padrão de fendilhação registado para uma carga de 411 kN, d) momento em que a viga atinge a capacidade de carga máxima, e) rotura por flexão (fenda de flexão vertical na secção de aplicação da carga), f) rotura dos laminados, g) padrão de fendilhação final registado na viga.

No decorrer do ensaio da viga S2SFS-A, a primeira fenda que surgiu foi de flexão e ocorreu na zona de aplicação da carga (Figura 89 a)). Com o aumentar do carregamento foram surgindo novas fendas de flexão e de corte, de acordo com o representado na Figura 89 b) (padrão de fendilhação para uma carga de 350 *kN* semelhante à carga máxima da viga de referência S2REF). Na Figura 89 c) apresenta-se o padrão de fendilhação para uma carga de 411 *kN* semelhante à carga máxima da viga S2SFS. Com o aumento do carregamento verificou-se que o sistema de fixação aplicado nas extremidades das faixas de manta de CFRP permitiu que não houvesse o destacamento prematuro do CFRP que ocorreu na viga S2SFS. Na Figura 89 d) apresenta-se o instante em que a viga atinge a sua capacidade de carga máxima imediatamente antes de ocorrer a rotura do reforço à flexão (526,2 *kN*). Na Figura 89 e) e 89 f) apresentam-se detalhes do modo de rotura da viga S2SFS-A, enquanto na Figura g) está representado o padrão de fendilhação final que se registou nesta viga após o ensaio à rotura, onde é evidente que o modo de rotura da viga ocorreu por flexão. À semelhança do que ocorreu na viga S1SFS-A (série 1), em termos do sistema de fixação adotado para as extremidades das faixas de manta (reforço ao corte), na viga S2SFS-A também se verificou que a ligação manta/manta (ligação das mantas do reforço em forma de U com as mantas do sistema de fixação, o U invertido) não apresentou sinais cedência. Na viga S2SFS-A, à semelhança do que ocorreu na viga S1SFS-A, houveram alguns descolamentos pontuais de algumas faixas de manta atravessadas pelas fendas mais significativas.

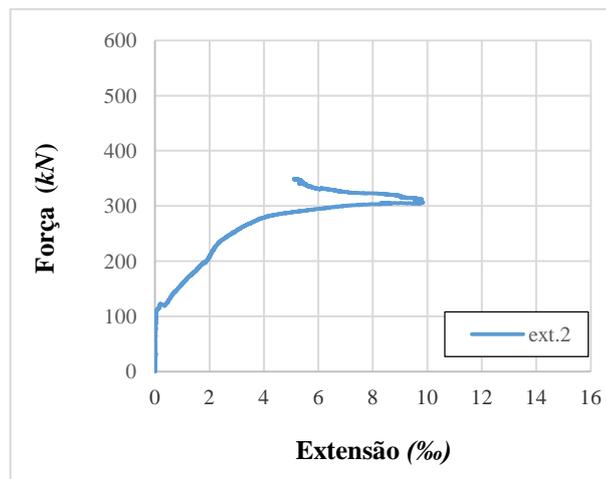
3.6.3. Extensões nas armaduras e no CFRP

Nas Figuras 90, 91 e 92 apresenta-se, respetivamente para as vigas S2REF, S2SFS e S2SFS-A, a relação entre as extensões registadas nos extensómetros colocados nas armaduras e nos CFRP (no caso das vigas reforçadas) e a força aplicada nas vigas até estas atingirem a sua capacidade de carga máxima. Nestas vigas houveram alguns extensómetros que não funcionaram ou que tiveram um funcionamento deficiente.

A viga S2REF alcançou a sua capacidade de carga máxima (349,5 *kN*) imediatamente antes de se dar a rotura de um estribo atravessado pela fenda de rotura de corte (a que tem maior abertura na Figura 90). Assim, o estribo instrumentado não foi atravessado pela referida fenda de corte, verificando-se, no entanto, que foi bastante mobilizado (para uma carga de 307 *kN* o valor da extensão registado no ext.2 era de 9,9%) devido à presença de outra fenda de corte.



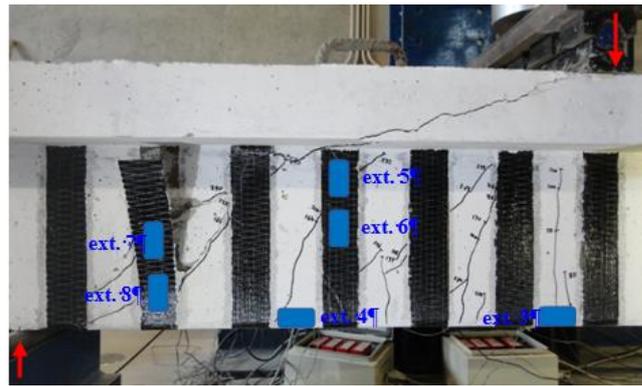
a)



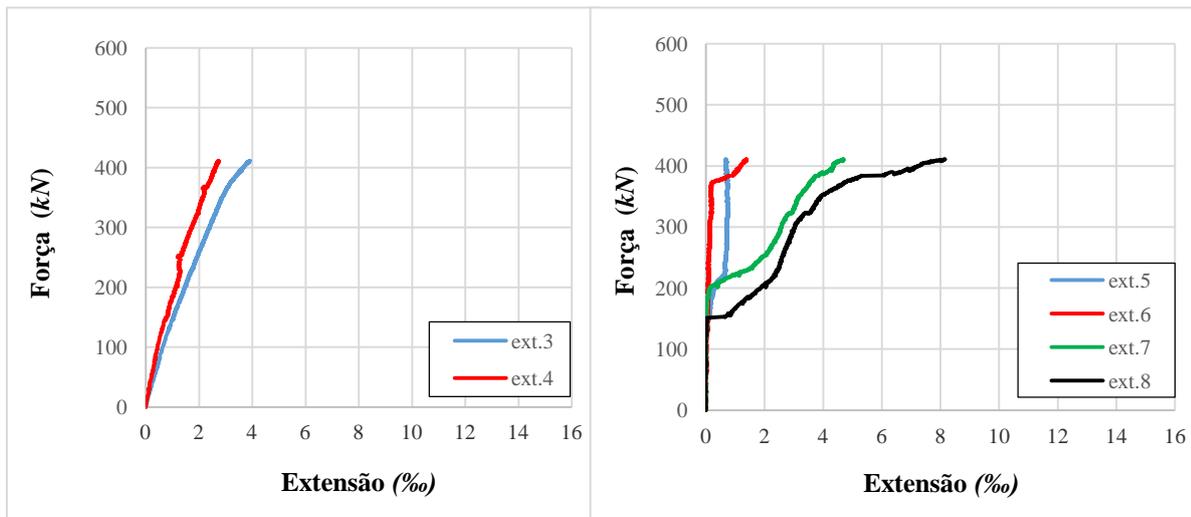
b)

Figura 90 - Viga S2REF: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S2REF e localização do extensómetro, b) variação das extensões no estribo instrumentado.

À semelhança do que já tinha ocorrido na viga S1SFS, na viga S2SFS também se verificou que o seu modo de rotura de corte, por destacamento das mantas de CFRP atravessadas pela fenda de rotura de corte, teve como consequência uma fraca mobilização do reforço à flexão. Com efeito, a máxima extensão nos laminados foi registada no ext.3 (3,9%) quando a viga alcançou a sua capacidade de carga máxima. Em relação aos extensómetros colocados nas faixas de manta (Figura 91), apenas os extensómetros ext.7 e ext.8 foram atravessados pela fenda de rotura de corte. Por esta razão as extensões nestes dois extensómetros foram claramente superiores às registadas nos extensómetros ext. 5 e ext. 6. O valor da máxima extensão registada nas mantas (8,2%) ocorreu no ext.8 quando a viga atingiu a sua capacidade de carga máxima, imediatamente antes de ocorrer o destacamento da faixa de manta onde estavam colados os ext.7 e ext.8.



a)

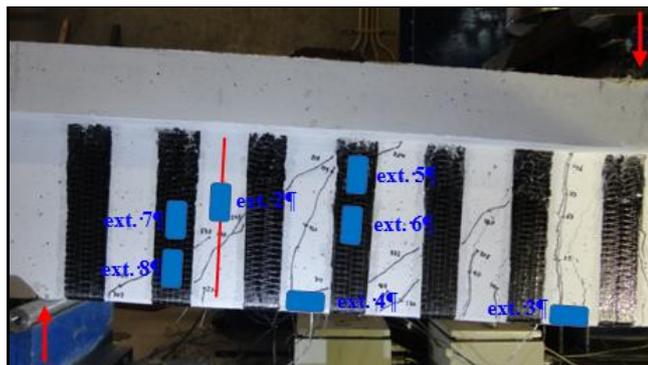


b)

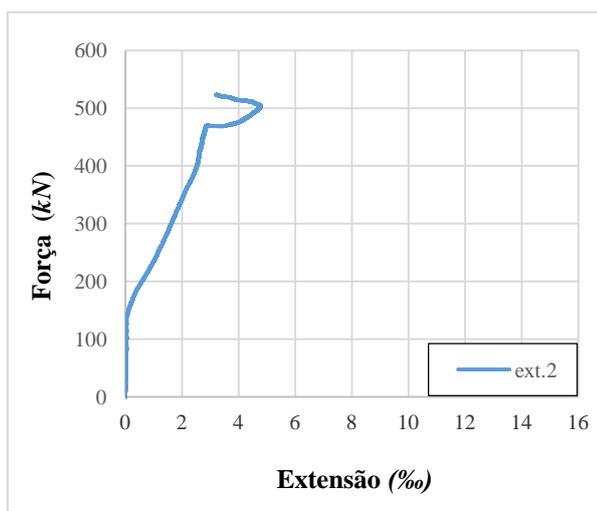
c)

Figura 91 - Viga S2SFS: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S2SFS e localização dos extensómetros, b) variação das extensões nos laminados c) variação das extensões nas mantas.

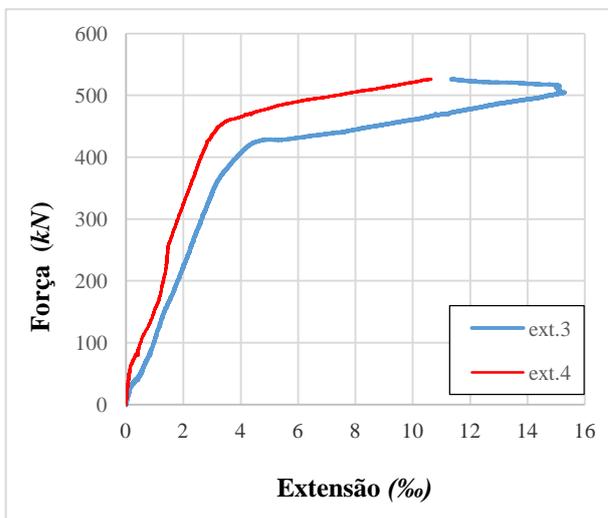
No que diz respeito à viga S2SFS-A verifica-se que não foi possível avaliar a variação da extensão no extensómetro ext.3 até ao momento em que a viga alcançou a sua capacidade de carga máxima (526,2 kN). A máxima extensão lida neste extensómetro foi de 15,5‰ para uma carga de 505 kN, verificando-se a partir desta carga uma inversão do sentido da variação das extensões (Figura 92). Como o modo de rotura desta viga foi por flexão por rotura dos laminados de CFRP, houve total aproveitamento deste material. Em relação ao outro extensómetro colado em laminado (ext. 4), o valor máximo da extensão registado foi de 10,7‰ na altura em que a viga atingiu a sua capacidade de carga máxima. Em termos de mobilização do reforço ao corte verifica-se que o valor máximo da extensão registada nas mantas foi obtido no extensómetro ext.8 (6,6‰) na altura em que a viga atingiu a sua capacidade de carga máxima.



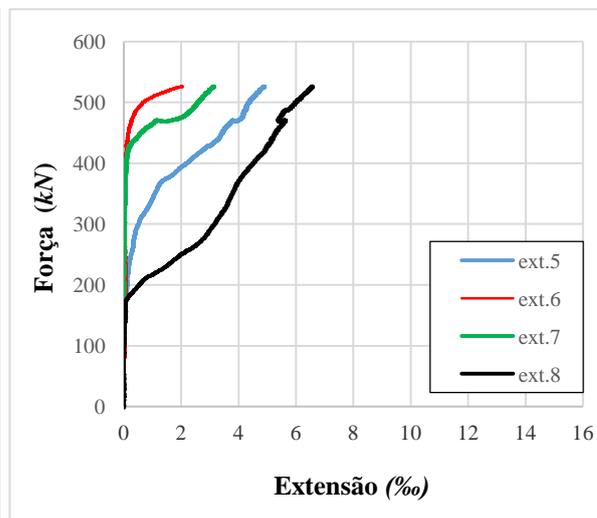
a)



b)



c)



d)

Figura 92 - Viga S2SFS-A: a) padrão de fendilhação no menor vão da viga S2SFS-A e localização dos extensómetros, b) variação das extensões no estribo instrumentado, c) variação das extensões nos laminados, d) variação das extensões nas mantas.

3.6.4. Efeito do sistema de fixação das mantas adotado

Nesta secção é analisado o grau de eficácia do sistema adotado para a fixação das extremidades do reforço ao corte com faixas discretas em forma de U, por intermédio da

comparação do comportamento das vigas S2SFS (sem fixação do reforço ao corte) e S2SFS-A (com fixação do reforço ao corte).

A carga máxima e a correspondente flecha na secção de aplicação da carga da viga S2SFS foi 411,4 *kN* e 9,22 *mm*, respetivamente. A carga máxima e a correspondente flecha na secção de aplicação da carga da viga S2SFS-A foi 526,2 *kN* e 33,23 *mm*, respetivamente. Assim, verifica-se que o sistema de fixação das extremidades do reforço ao corte permitiu que a viga S2SFS-A tivesse, em relação à viga S2SFS, uma capacidade de carga máxima 27,9% superior e uma capacidade deformacional na rotura 260,4% superior.

A análise das Figura 88 d) e Figura 89 c) permite verificar o comportamento no menor vão de corte das vigas S2SFS e S2SFS-A, respetivamente, para a carga correspondente à capacidade de carga máxima da viga S2SFS. A comparação destas figuras permite verificar que o sistema de fixação das extremidades do reforço ao corte da viga S2SFS-A evitou o destacamento das faixas de manta que ocorreram na viga S2SFS.

Além de proporcionar os benefícios em termos de capacidade de carga máxima e capacidade deformacional na rotura, o sistema de fixação das extremidades do reforço ao corte permitiu, à semelhança do que já tinha ocorrido no caso das vigas da série 1, que houvesse alteração do modo de rotura, de corte na viga S2SFS (Figura 88 e)) para flexão na viga S2SFS-A (Figura 89 g)). A cedência das armaduras longitudinais apenas ocorreu na viga S2SFS-A.

O modo de rotura por flexão da viga S2SFS-A ocorreu com o total aproveitamento do material de reforço à flexão (rotura dos laminados de CFRP) e com uma elevada capacidade deformacional da viga após a cedência das armaduras longitudinais. Com efeito, na secção de aplicação da carga da viga S2SFS-A verificou-se que a flecha, referente à carga máxima, foi cerca de 3,3 vezes superior à flecha correspondente à carga de cedência das armaduras longitudinais.

4. CONCLUSÕES GERAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho de investigação realizado no âmbito desta dissertação. Além disso, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

4.1 Conclusões gerais

O trabalho de investigação experimental realizado no âmbito desta dissertação pretendeu avaliar a eficiência do reforço simultâneo à flexão e ao corte, de vigas de betão armado de secção em T, usando uma solução híbrida de compósitos de CFRP. Esta solução consiste no reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM) e no reforço ao corte com faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente em forma de U (técnica EBR), reforço este complementado com um sistema que permite a ancoragem das faixas de manta de CFRP nas suas extremidades. Para a definição deste sistema, foi realizado um estudo para estabelecer, no âmbito de uma ligação manta/manta, a área de colagem necessária para que o modo de rotura num ensaio de tração uniaxial, não seja pela ligação manta/manta mas sim pela rotura de uma das mantas.

As principais conclusões obtidas neste trabalho de investigação foram:

- Uma área de colagem de 2000 mm^2 mostrou-se suficiente para que o modo de rotura de provetes, constituídos por duas faixas de manta de CFRP (igual à que foi usada no reforço ao corte das vigas testadas) coladas apenas numa zona central do provete, submetidos a ensaios de tração uniaxial não seja pela ligação manta/manta mas sim pela rotura de uma das mantas.
- O reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado recorrendo à técnica NSM com laminados de CFRP (reforço à flexão), à técnica EBR com faixas discretas de manta de CFRP (reforço ao corte) e a um sistema que permite a ancoragem das mantas nas suas extremidades revelou-se de fácil e rápida aplicação. No entanto, é essencial um rigoroso controlo de qualidade relativo aos procedimentos necessários à sua aplicação.
- Independentemente de se aplicar, ou não, o sistema de ancoragem do reforço ao corte referido anteriormente, as soluções de reforço simultâneo à flexão e ao corte com CFRP testadas nas vigas ensaiadas proporcionaram às vigas aumentos de capacidade de carga máxima que variaram entre os 18% e os 54%.

- A comparação entre o comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM) e ao corte com faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente em forma de U (técnica EBR), que se distinguiam apenas pela adoção, ou não, do sistema de ancoragem do reforço ao corte, permitiu verificar que com este sistema foi possível mudar o modo de rotura por corte (por destacamento das mantas de CFRP) para o modo de rotura por flexão com cedência das armaduras e com total aproveitamento do reforço à flexão (rotura dos laminados de CFRP).
- Em termos médios, as vigas reforçadas em que foi aplicado o sistema de ancoragem do reforço ao corte (S1SFS-A e S2SFS-A), em relação às vigas semelhantes mas sem aplicação do referido sistema (S1SFS e S2SFS), tiveram uma capacidade de carga máxima 30% superior e uma capacidade deformacional na rotura 229% superior.
- Em termos médios, as vigas reforçadas em que foi aplicado o sistema de ancoragem do reforço ao corte (S1SFS-A e S2SFS-A), em relação às vigas de referência sem reforço de CFRP (S1REF e S2REF), tiveram uma capacidade de carga máxima 53% superior e uma capacidade deformacional na rotura 126% superior.
- As vigas reforçadas em que foi aplicado o sistema de ancoragem do reforço ao corte tiveram uma elevada capacidade deformacional após a cedência das armaduras longitudinais. A relação entre, a flecha na secção de aplicação da carga quando foi alcançada a capacidade de carga máxima da viga, e a flecha na secção de aplicação da carga quando ocorreu a cedência das armaduras longitudinais variou entre o 3,0 e os 3,3.

4.2 Desenvolvimentos futuros

Os resultados obtidos no âmbito da presente dissertação são uma contribuição no nível de conhecimento existente em termos do reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP. Em termos de desenvolvimento futuro, existem alguns aspetos que devem ser objeto de análise:

- Desenvolvimento de investigação mais detalhada para a definição da área de colagem manta/manta relativo ao sistema de ancoragem do reforço ao corte analisado neste trabalho.
- Alargar o estudo a outras soluções de reforço simultâneo à flexão e ao corte que permitam definir qual a contribuição máxima do sistema de ancoragem do reforço ao corte utilizado, por forma a mobilizar ao máximo não só as capacidades dos laminados (reforço à flexão) mas também das mantas de CFRP (reforço ao corte).

-
- Avaliar o comportamento cíclico de vigas de betão armado reforçadas simultaneamente à flexão com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM) e ao corte com faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente em forma de U (técnica EBR) com a aplicação do sistema que permite a ancoragem do reforço ao corte analisado no presente trabalho.
 - Numa fase mais avançada, com mais resultados experimentais e recorrendo a software de elementos finitos, deve-se proceder à modelação das vigas reforçadas com o sistema de reforço proposto tendo como objetivo realizar, posteriormente, estudos paramétricos que permitam avaliar o efeito que outros parâmetros, ainda não estudados e que se julguem determinantes, possam ter no desempenho das vigas reforçadas. Tudo isto para a definição de modelos analíticos de apoio ao projeto deste tipo de reforços.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 440R-96, 2002, “*State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*”, American Concrete Institute: ACI committee 440.

ACI 440.2R-02, 2002, “*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*”, Reported by ACI Committee 440.

ACI 440.1R-06, 2006, “*Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*”, Reported by ACI Committee 440.

Asplund, S.O., 1949, “*Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement*”, Journal of the American Concrete Institute, vol. 20, nº 6, pp. 397-406.

ASTM D30, 1964, “*International Technical Committee D30 on Composite Materials*”, West Conshohocken, PA.

Barnes, R. e Fidell, J., 2006, “*Performance in fire of small-scale CFRP strengthened concrete beams*”, Journal of Composites for Construction, vol. 10, Issue 6, November/December, pp. 503-508.

Barros, J.A.O., 2004, “*Dimensionamento de reforço à flexão e ao corte com FRP segundo as recomendações do ACI 440*”, Report 04-DEC/E-12, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, abril.

Barros, J.A.O., e Fortes, A.S., 2005, “*Flexural strngthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits*”, Cement and Concrete Composites, vol. 27, Issue 4.

Barros, J., e Kotynia R., 2008, “*Possibilities and challenges of NSM for flexural strenhthening of RC structures*”, Fouth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE, 2008), 22-24 July, Zurich, Switzerland.

Barros, J.A.O., Costa, I. G., e Gouveia, A. V., 2010, “*CFRP Flexural and Shear Strengthening Technique for RC Beams: Experimental and Numerical Research*”, Advances in Structural Engineering, vol. 14, nº 3.

Bilotta, A., Ceroni F., Nigro E., Pecce M., 2015, “*Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence*”, Journal of Composite Structures, vol. 124, January, pp. 163-175.

Buyukozturk O., Oguz G. e Erdem K., 2004, “*Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites*”, Construction and Building Materials, vol. 18, February, pp. 9-19.

Carolin, A., 2003, “*Carbon Fibre Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements*”, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Suécia: Doctoral Thesis.

Cisnero, D., Arteaga, A., De Diego, A., Alzade, A. e Perera, R., 2012, “*Experimental study on NSM FRP shear retrofitting of RC beams*”, CICE 2012. Rome, Italy, 13-15 June.

Coelho, M.; Silva, L.; Sena-Cruz, J.M.; Barros, J., 2012, “*Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP's sob ações monotónicas e de fadiga*”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série II, nº12, dezembro 2012.

Commission Staff Working Document, 2013, “*Report From the Commission to the European Parliament and the Council*”, financial support for energy efficiency in buildings, European Commission.

Costa A., 2012, “*Reforço com Pré-esforço Exterior*”, Apontamentos da Unidade Curricular de Reabilitação e Reforço de Estruturas, Mestrado em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico.

Costa, J.M.V., 2013, “*Comportamento de vigas de betão armado reforçadas simultaneamente à flexão e ao corte com laminados de CFRP inseridos*”, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.

De Lorenzis, L. e Teng, J.G., 2007, “*Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures*”, Composites Part B, vol. 38, pp. 119-143.

Dias, S.J.E., 2001, “*Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Porto, março.

Dias, S.J.E., Juvandes, L.F.P. e Figueiras, J.A., 2002, “*Comportamento experimental de vigas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas compósitos de CFRP do tipo MBrace*”, Relatório Técnico FEUP, janeiro.

Dias, S.J.E., e Barros, J.A.O., 2005, “*Reforço ao corte de vigas T de betão armado por inserção de laminados de CFRP*”, Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2005, Olinda, Recife, Brasil, 2-7 setembro, Volume VII.

Dias, S.J.E., Juvandes, L. e Figueiras, J.A., 2006, “*Estruturas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas de CFRP*”, Revista IBRACON de Estruturas, vol. 2, n.º2, junho.

Dias, S.J.E., 2008, “*Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com a técnica de inserção de laminados de CFRP*”, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães.

Dias, S.J.E., e Barros, J.A.O., 2010, “*Aplicação da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado*”, 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, 21-23 de abril, Guimarães.

Dias, S., Barros J., e Azevedo, C., 2012, “*Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos*”, Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2012, FEUP, 24-26 de outubro.

Dimande, A.O., 2003, “*Influência da interface no reforço à flexão de estruturas de betão com sistemas FRP*”, Tese de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, dezembro, Porto.

Dong, J. Wang, Q. e Guan Z. A.A., 2013, “*Structural behaviour of RC beams with external flexural and flexural–shear strengthening by FRP sheets*”, Composites Part B, vol. 44, pp. 604-612.

El-Ghandour, A.A., 2011, “*Experimental and analytical investigation of CFRP flexural and shear strengthening efficiencies of RC beams*”, Construction and Building Materials, vol. 25, pp. 1419-1429.

El-Hacha, R. e Riskalla, S.H., 2004, “*Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures*”, ACI Structural Journal, vol. 101, n°5, September-October.

European Construction Industry Federation, 2013, “*Statistical Report, The Construction Activity in Europe*”, edition June.

Fernandes, P. M., Silva, P. M. e Sena-Cruz, J., 2015, “*Bond and flexural behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under fatigue loading*”, Engineering Structures, vol. 84, February, pp. 350-361.

ISO 527-5, 1997, “*Plastics - Determination of tensile properties*” - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites, International Organization for Standardization, Genève, Switzerland.

Juvandes, L., Dias, S.J.E. e Figueiras, J.A., 2003, “*Eficiência do reforço de faixas de laje com sistemas compósitos de CFRP*”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, n°52 setembro.

Khalifa A., 1999, “*Shear performance of reinforced concrete beams strengthened with advanced composites*”, PhD Thesis, Structural Engineering Department, Alexandria University, Egypt.

Kotynia, R., 2007, “*Analysis of the flexural response of NSM FRP-strengthened concrete beams*”, 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), Patras, Grécia, 16th – 18th July (CD-ROM).

Lubin, G., 1998, “*Handbook of composites, 2nd Edition*”, London.

Machado, A.P., 2007, “*Reforço de estruturas de concreto com fibras de carbono*”, Revista Técnica, agosto, ed. 125.

Mofidi, A., Chaallal, O., 2014, “*Tests and Design Provisions for Reinforced-Concrete Beams Strengthened in Shear Using FRP Sheets and Strips*”, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 8, nº 2, June.

Nordin, H. e Taljsten, B., 2006, “*Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP*”, Journal of Composites for Construction, vol. 10, nº1, January/February.

NP EN 1992-1-1, 2010, “*Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão*”.

Rodrigues, C. C., 2005, “*Reparação e Reforço de Estruturas de Betão Armado com Sistemas Compósitos de FRP*”, Publicação UNIC – DTC 6.

Salib, M.N., 2012, “*Flexural Behavior of RC T- Section Beams Strengthened with Different Configurations of CFRP Laminates*”, International Journal of Current Engineering and Technology, vol. 2, nº 4, December, pp. 2277-4106.

Sena Cruz, J. M., Barros, J. A. O., Dias, S.J.E., 2011, “*1º Seminário sobre o projecto de reforço de estruturas de betão com FRP's*”, Universidade do Minho. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil, 66 pp. ISBN: 978-972-8692-62-9.

Sena Cruz, J., 2015, “*Repairing and strengthening techniques*”, Apontamentos da Unidade Curricular de Reforço do Património Construído, Departamento de Engenharia Civil – Escola de Engenharia – Universidade do Minho.

S&P, 2016, “*Reinforcement International AG*”, S&P Clever Reinforcement Company, CH-6448, Brunnen, Switzerland, <http://www.sp-reinforcement.ch/de-CH/produkte>.