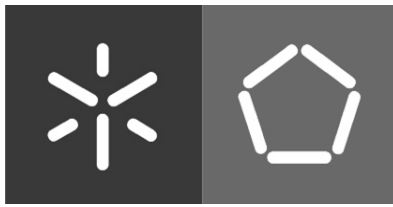




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Camila Correia Vieira

**Influência da pré-fendilhação do betão no
reforço à flexão de vigas de betão armado com
laminados de CFRP inseridos**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Camila Correia Vieira

**Influência da pré-fendilhação do betão
no reforço à flexão de vigas de betão
armado com laminados de CFRP
inseridos**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

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

Setembro de 2013

Agradecimentos

Quero exprimir o meu agradecimento a todas as pessoas e entidades que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Salvador Dias, meu orientador, pela disponibilidade, paciência, dedicação, motivação, empenho e apoio demonstrado ao longo da realização da presente dissertação.

Ao Professor Joaquim Barros, pelo acompanhamento ao longo da realização deste trabalho.

Aos técnicos do laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, António Matos e Marco Peixoto, pela colaboração na parte experimental deste trabalho.

Ao aluno de doutoramento, Mohammadreza Hosseini, pela ajuda prestada na realização dos ensaios experimentais.

À empresa UNIBETÃO (central de Braga) pelo fornecimento do betão; à empresa Casais, S. A., pelo auxílio na conceção das vigas de betão armado; e à empresa S&P Reinforcement pelo fornecimento dos laminados de CFRP e do adesivo epoxídico.

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto PTDC/ECM/114945/2009.

O maior agradecimento é dirigido aos meus pais pelo amor incondicional, ajuda, paciência, incentivo, apoio e compreensão ao longo de todo este percurso.

À minha irmã, avós e restante família, que sempre me apoiaram com o máximo amor e carinho, ao longo de todo o meu percurso académico.

Ao João Pedro Soares, que sempre me ajudou em tudo o que precisei ao longo de toda a minha carreira académica, bem como me apoiou nos momentos mais difíceis com amor e amizade.

Aos amigos que fiz na Universidade, pelo apoio demonstrado ao longo da realização deste trabalho.

Aos amigos de longa data, que apesar de termos escolhido áreas diferentes, sempre nos interessamos uns pelos outros e torcemos para que cada um seja o melhor nas respectivas áreas.

Resumo

A presente dissertação apresenta a investigação realizada no âmbito do comportamento de vigas de betão armado, reforçadas à flexão, usando a técnica da inserção de laminados de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono), em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM). Concretamente, o desenvolvimento desta tese permitiu avaliar o efeito da pré-fendilhação do betão, na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP, quando aplicada no reforço à flexão de vigas de betão armado.

O presente trabalho é iniciado com a revisão bibliográfica, sobre o conhecimento que atualmente existe, em relação à utilização de materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado, com particular destaque para o reforço à flexão. Posteriormente, é apresentada a investigação experimental efetuada, por forma a avaliar o efeito da pré-fendilhação do betão, no comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos. O nível de dano (pré-fendilhação) e a percentagem de reforço de CFRP são os parâmetros que distinguem as soluções de reforço testadas. O comportamento de vigas pré-fendilhadas e reforçadas à flexão, com laminados de CFRP inseridos, é comparado com o de vigas semelhantes, com a diferença de, nestas, não existir pré-fendilhação antes da execução do reforço. Por último, são apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização desta investigação e indicam-se algumas perspetivas de desenvolvimento futuro.

Palavras-chave: Vigas de betão armado; Pré-fendilhação; Reforço à flexão; Laminados de CFRP inseridos; Comportamento experimental.

Abstract

The current dissertation presents the research about the behavior of reinforced concrete (RC) beams flexurally strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) laminates applied according to the Near Surface Mounted (NSM) technique, which is based on introducing CFRP laminates into slits opened on the concrete of the beams. The development of this thesis allowed the evaluation of the concrete pre-cracking effect in the effectiveness of the NSM CFRP laminates technique when applied to the flexural strengthening of RC beams.

This work starts with a literature review about the knowledge that currently exists in terms of the use of advanced composite materials like CFRP for the strengthening of RC structures, with particular emphasis in the flexural strengthening. After performing a literature review the experimental program carried out in the present thesis is described. This experimental research was carried out in order to evaluate the concrete pre-cracking effect on the behavior of RC beams flexural strengthening with NSM CFRP laminates. The damage level (pre-cracking) and the CFRP percentage are the parameters that distinguish the tested CFRP strengthening configurations. The behavior of pre-cracked and flexural strengthening RC beams with NSM CFRP laminates is compared with similar RC beams but without pre-cracks before the CFRP application. Finally, the main conclusions obtained in this research are presented and some prospects for future development are indicated.

Keywords: Reinforced concrete beams; Pre-cracking; Flexural strengthening; NSM CFRP laminates; Experimental behavior.

Índice geral

| | |
|---|-------------|
| AGRADECIMENTOS | i |
| RESUMO/ PALAVRAS-CHAVE | iii |
| ABSTRACT/KEYWORDS | v |
| ÍNDICE GERAL | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xi |
| ÍNDICE DE TABELAS | xvii |
| | |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 1.1 |
| 1.1 – Considerações gerais..... | 1.1 |
| 1.2 – Objetivos do trabalho..... | 1.2 |
| 1.3 – Organização da dissertação..... | 1.3 |
| | |
| CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 2.1 |
| 2.1 – Soluções clássicas de reforço de estruturas de betão..... | 2.1 |
| 2.1.1 – Adição do betão por encamisamento das secções..... | 2.2 |
| 2.1.2 – Reforço por adição de chapas coladas..... | 2.3 |
| 2.1.3 – Aplicação de pré-esforço exterior..... | 2.4 |
| 2.2 – Materiais compósitos..... | 2.5 |
| 2.2.1 – Fibras..... | 2.5 |
| 2.2.2 – Matriz polimérica..... | 2.8 |
| 2.3 – Sistemas de FRP..... | 2.9 |
| 2.3.1 – Sistemas pré-fabricados..... | 2.10 |
| 2.3.2 – Sistemas curados “in situ”..... | 2.10 |

| | |
|--|------------|
| 2.4 – Técnicas de reforço usando materiais compósitos de CFRP..... | 2.11 |
| 2.4.1 – Técnica da colagem externa (EBR)..... | 2.11 |
| 2.4.2 – Técnica da inserção (NSM)..... | 2.14 |
| 2.4.3 – Comparação entre as técnicas EBR e NSM..... | 2.17 |
| 2.5 – Reforço à flexão de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos..... | 2.22 |
| 2.5.1 – Comportamento mecânico..... | 2.23 |
| 2.5.2 – Modos de rotura..... | 2.25 |
| 2.6 – Reforço à flexão com compósitos de CFRP de elementos de betão armado pré-fendilhado..... | 2.30 |
| | |
| CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL | 3.1 |
| 3.1 – Conceção dos modelos..... | 3.1 |
| 3.2 – Caracterização dos materiais..... | 3.5 |
| 3.2.1 – Betão..... | 3.6 |
| 3.2.2 – Aço..... | 3.6 |
| 3.2.3 – Laminado de CFRP..... | 3.7 |
| 3.2.4 – Adesivo..... | 3.8 |
| 3.3 – Aplicação do reforço de CFRP..... | 3.9 |
| 3.4 – Sistema de ensaio e instrumentação das vigas..... | 3.11 |
| 3.5 – Apresentação dos resultados..... | 3.14 |
| 2.5.1 – Apresentação dos resultados dos ensaios de pré-fendilhação (ensaio tipo I)..... | 3.14 |
| 2.5.2 – Apresentação e análise dos resultados dos ensaios à rotura das vigas (ensaio tipo II)..... | 3.15 |
| 3.5.3 – Efeito da pré-fendilhação..... | 3.28 |
| | |
| CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS | 4.1 |
| 4.1 – Conclusões gerais..... | 4.1 |

4.2 – Desenvolvimentos futuros 4.3

CAPÍTULO 5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 5.1

Índice de figuras

| | |
|---|------|
| Figura 2.1 - a) Reforço de pilares com encamisamento da secção (Fardis, 2009); b) Pormenor da intervenção de reforço de uma viga com a técnica do encamisamento da secção (Shehata <i>et al.</i> , 2009)..... | 2.3 |
| Figura 2.2 - a) Aplicação do reforço com chapas de aço coladas numa viga (Rodrigues, 2010); b) Aspetto de uma viga reforçada com chapas de aço coladas (Rodrigues, 1993)..... | 2.4 |
| Figura 2.3 - Reforço de um viaduto aplicando pré-esforço exterior (Rodrigues, 2005) | 2.4 |
| Figura 2.4 - Constituição dos materiais compósitos de FRP (Azevedo, 2011). | 2.5 |
| Figura 2.5 - Diagrama tensão vs extensão de fibras e outros materiais (Rodrigues, 2009)..... | 2.7 |
| Figura 2.6 - Possíveis orientações das fibras (adaptado de Marques (2008)) | 2.9 |
| Figura 2.7 - Sistemas de CFRP pré-fabricados: a) laminados; b) varões (Dias, 2008). | 2.10 |
| Figura 2.8 - Sistemas de CFRP curados in situ: a) mantas (Dias, 2008); b) tecidos (Juvandes <i>et al.</i> , 1996)..... | 2.10 |
| Figura 2.9 - Reforço à flexão com compósitos de CFRP usando a técnica da colagem externa: a) laminados (Carvalho, 2010); b) mantas (Firmo, 2010) | 2.11 |
| Figura 2.10 - Aplicação de sistemas de reforço de CFRP usando a técnica da colagem externa (Dias, 2001) | 2.12 |
| Figura 2.11 - Aplicação da técnica da colagem externa e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias <i>et al.</i> , 2006)..... | 2.13 |
| Figura 2.12 - Viga de betão armado reforçadas à flexão com CFRP usando a técnica EBR: modo de rotura por descolagem do CFRP (Fayyadh e Razak, 2012) | 2.13 |
| Figura 2.13 - Aplicação da técnica NSM usando compósitos de CFRP (Casadei <i>et al.</i> , 2003) | 2.14 |
| Figura 2.14 - Elementos de CFRP usados no reforço com a técnica NSM (De Lorenzis e Teng, 2007)..... | 2.14 |

| | |
|--|------|
| Figura 2.15 - Sequência de aplicação do reforço com laminados de CFRP aplicados com a técnica da inserção (reforço à flexão) (Dias, 2008) | 2.16 |
| Figura 2.16 - Aplicação da técnica NSM e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias, 2008)..... | 2.16 |
| Figura 2.17 - Comparação do grau de fixação conferido pela técnica EBR e pela técnica NSM para o mesmo laminado (adaptado de Carolin (2003))..... | 2.17 |
| Figura 2.18 - Geometria, armaduras e reforço das vigas (Fortes e Barros, 2002). | 2.18 |
| Figura 2.19 - Relações força vs flecha das vigas das séries S1, S2 e S3 (Fortes e Barros, 2002). | 2.19 |
| Figura 2.20 - Geometria das vigas ensaiadas: a) alçado; secção transversal da: b) viga de referência; c) viga reforçada usando a técnica EBR; d) viga reforçada usando a técnica NSM (Sena-Cruz <i>et al.</i> , 2012). (dimensões em milímetros). | 2.21 |
| Figura 2.21 - Força vs deslocamento a meio vão das vigas REF, EBR e NSM (Sena-Cruz <i>et al.</i> , 2012). | 2.21 |
| Figura 2.22 - Séries de vigas testadas: a) tipo de carregamento e distribuição das armaduras; b) secções transversais; c) pormenor do reforço de CFRP (Barros <i>et al.</i> , 2007) | 2.23 |
| Figura 2.23 - Diagramas força vs deslocamento a meio vão das vigas das séries S1(A), S2(B), S3(C) e S4(D) (Barros <i>et al.</i> , 2007). | 2.24 |
| Figura 2.24 - Relação forças vs deslocamento de vigas reforçadas à flexão com CFRP: Ponto 1: início da fendilhação do betão; Ponto 2: cedência das armaduras; Ponto 3: resistência máxima do betão à compressão; Ponto 4: destacamento do CFRP; Ponto 5: rotura do CFRP (adaptado de Ross <i>et al.</i> (1999)). | 2.25 |
| Figura 2.25 - Modos de rotura em vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos: a) destacamento do reforço (Fortes e Barros, 2002); b) rotura do CFRP (Fortes e Barros, 2002); c) esmagamento do betão (Kotynia, 2007). | 2.26 |
| Figura 2.26 - Geometria e condições de carregamento das vigas ensaiadas por Barros e Costa (2009) (dimensões em milímetros). | 2.28 |
| Figura 2.27 - Configurações de reforço à flexão e ao corte adotadas por Barros e Costa (2009) (dimensões em milímetros)..... | 2.28 |

| | |
|---|------|
| Figura 2.28 - Modo de rotura da viga VLM2: destacamento do laminado de CFRP no tramo L2 (Barros e Costa, 2009)..... | 2.30 |
| Figura 2.29 - Reforço de faixas de laje pré-fendilhadas com o sistema de CFRP: a) curado “in situ” (manta); b) pré-fabricado (laminado) (Dias <i>et al.</i> , 2004) | 2.31 |
| Figura 2.30 - Geometria das faixas de laje ensaiadas por Dias <i>et al.</i> (2004) | 2.32 |
| Figura 2.31 - Curvas médias carga total vs deslocamento central das séries de modelos ensaiadas até à rotura (Dias <i>et al.</i> , 2004)..... | 2.33 |
| Figura 3.1 - Geometria dos modelos a ensaiar (medidas em mm). | 3.2 |
| Figura 3.2 - Execução das vigas de betão armado..... | 3.2 |
| Figura 3.3 - Soluções de reforço de CFRP adotadas (medidas em mm). | 3.4 |
| Figura 3.4 - Força vs Flecha a meio vão da viga de referência REF-M (Azevedo, 2011), com a identificação dos valores da força máxima a impor nos ensaios de pré-fendilhação. | 3.5 |
| Figura 3.5 - Caracterização do betão: a) Provetes cilíndricos antes da realização do ensaio; b) Ensaio de compressão uniaxial; c) Modo de rotura dos provetes. | 3.6 |
| Figura 3.6 - Caracterização experimental do aço das armaduras das vigas: a) ensaio de tração uniaxial; b) modo de rotura (Azevedo, 2011). | 3.7 |
| Figura 3.7 - Referência dos laminados de CFRP adotados. | 3.7 |
| Figura 3.8 - Ensaio de tração uniaxial de um provete de laminado de CFRP e o modo de rotura (Azevedo, 2011)..... | 3.8 |
| Figura 3.9 - Limpeza dos entalhes das vigas de betão armado, antes da aplicação dos laminados de CFRP. | 3.9 |
| Figura 3.10 - Corte e limpeza dos laminados. | 3.9 |
| Figura 3.11 - Produção do adesivo epoxídico. | 3.10 |
| Figura 3.12 - Reforço à flexão de uma viga com três laminados de CFRP..... | 3.10 |
| Figura 3.13 - Aspeto final de três vigas reforçadas à flexão com 1, 2 e 3 laminados de CFRP, aplicando a técnica NSM..... | 3.11 |
| Figura 3.14 - Esquema geral dos ensaios realizados. | 3.12 |

| | |
|---|------|
| Figura 3.15 - Localização das secções com transdutores de deslocamentos (dimensões em mm)..... | 3.12 |
| Figura 3.16 - Localização dos extensómetros colados nos laminados instrumentados (dimensões em mm)..... | 3.13 |
| Figura 3.17 - Instrumentação dos laminados com extensómetros elétricos..... | 3.13 |
| Figura 3.18 - Padrão de fendilhação instalado nas vigas após a realização dos ensaios de pré-fendilhação (ensaio tipo I)..... | 3.15 |
| Figura 3.19 - Sequência do ensaio à rotura da viga S1-PC1..... | 3.16 |
| Figura 3.20 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S1-PC1. | 3.16 |
| Figura 3.21 - Pormenor do modo de rotura da viga S1-PC1 (rotura do laminado de CFRP). | 3.16 |
| Figura 3.22 - Sequência do ensaio à rotura da viga S2-PC1..... | 3.17 |
| Figura 3.23 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S2-PC1. | 3.17 |
| Figura 3.24 - Pormenor do modo de rotura da viga S2-PC1 (rotura do laminado de CFRP). | 3.18 |
| Figura 3.25 - Sequência do ensaio à rotura da viga S2-PC2..... | 3.18 |
| Figura 3.26 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S2-PC2. | 3.18 |
| Figura 3.27 - Pormenor do modo de rotura da viga S2-PC2 (destacamento do laminado de CFRP)..... | 3.19 |
| Figura 3.28 - Sequência do ensaio à rotura da viga S3-PC1..... | 3.20 |
| Figura 3.29 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S3-PC1. | 3.20 |
| Figura 3.30 - Pormenor do modo de rotura da viga S3-PC1 (destacamento do laminado de CFRP)..... | 3.20 |
| Figura 3.31 - Sequência do ensaio à rotura da viga S3-PC3..... | 3.21 |
| Figura 3.32 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S3-PC3. | 3.21 |
| Figura 3.33 - Pormenor do modo de rotura da viga S3-PC3 (destacamento do laminado de CFRP)..... | 3.21 |
| Figura 3.34 - Curvas de comportamento das vigas REF-M, S1-PC1, S2-PC1 e S3-PC1. ... | 3.22 |

| | |
|--|------|
| Figura 3.35 - Curvas de comportamento da viga de referência (REF-M) e das vigas reforçadas com dois laminados e que se distinguem pelo nível de pré-fendilhação..... | 3.23 |
| Figura 3.36 - Curvas de comportamento da viga de referência (REF-M) e das vigas reforçadas com três laminados e que se distinguem pelo nível de pré-fendilhação..... | 3.24 |
| Figura 3.37 - Variação das extensões nas armaduras e nos laminados de CFRP..... | 3.27 |
| Figura 3.38 - Curvas de comportamento das vigas com um, dois e três laminados (com e sem pré-fendilhação)..... | 3.29 |

Índice de tabelas

| | |
|--|------|
| Tabela 2.1 - Tipos de fibras e suas propriedades (adaptado de ACI 440.2R-02 (2007)). | 2.7 |
| Tabela 2.2 - Propriedades típicas do betão, do aço e de fibras de carbono (adaptado de Dias (2008) e NP EN 1992-1-1 (2010)). | 2.8 |
| Tabela 2.3 - Propriedades de resinas utilizadas em materiais compósitos (Dias, 2008 e Firmo, 2010). | 2.9 |
| Tabela 2.4 - Soluções de reforço de CFRP adotadas. | 2.19 |
| Tabela 2.5 - Características das vigas ensaiadas por Sena-Cruz <i>et al.</i> (2012) | 2.21 |
| Tabela 2.6 - Caracterização das séries de vigas testadas por Barros <i>et al.</i> (2007) | 2.24 |
| Tabela 2.7 - Desempenho do reforço de CFRP nas quatro séries de vigas testadas (Barros <i>et al.</i> , 2007). | 2.25 |
| Tabela 2.8 - Dimensões, armaduras e percentagem de reforço de CFRP das vigas ensaiadas por Barros e Costa (2009). | 2.27 |
| Tabela 2.9 - Soluções de reforço testadas por Barros e Costa (2009). | 2.28 |
| Tabela 2.10 - Incremento da capacidade de carga nas diferentes séries de vigas | 2.29 |
| Tabela 2.11 - Informações gerais sobre os modelos ensaiados por Dias <i>et al.</i> (2004). | 2.32 |
| Tabela 2.12 - Comparação do comportamento último e desempenho do CFRP (valores médios) (Dias <i>et al.</i> , 2004) | 2.34 |
| Tabela 3.1 - Características das vigas ensaiadas. | 3.5 |
| Tabela 3.2 - Principais propriedades do aço das armaduras das vigas (Azevedo, 2011). | 3.7 |
| Tabela 3.3 - Principais propriedades do laminado de CFRP (Azevedo, 2011). | 3.8 |
| Tabela 3.4 - Principais propriedades do adesivo epoxídico (S&P, 2013). | 3.8 |
| Tabela 3.5 - Principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas (ensaio à rotura). | 3.25 |

| | |
|--|------|
| Tabela 3.6 - Extensões máximas registadas nos laminados de CFRP das vigas S1-PC1, S2-PC1, S2-PC2, S3-PC1 e S3-PC3..... | 3.26 |
| Tabela 3.7 - Principais resultados obtidos nas vigas reforçadas, com e sem pré-fendilhação. | 3.30 |

Capítulo 1

Introdução

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Atualmente existe uma necessidade muito significativa de reabilitar e reforçar estruturas de betão armado, envolvendo frequentemente betão em estado fendilhado. A referida necessidade é devida a fatores como: a degradação das estruturas ao longo do tempo, um deficiente dimensionamento, a aplicação de cargas superiores às que foram consideradas na fase de dimensionamento (por exemplo devido a uma mudança do tipo de utilização da estrutura) e erros de construção. Neste contexto de necessidade crescente de reforçar estruturas de betão armado, os aspetos menos positivos associados às técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas (adição de chapas metálicas, encamisamento das secções, aplicação de pré-esforço exterior) e tendo em conta o desenvolvimento tecnológico, surgiram novos materiais de elevado desempenho e técnicas de reforço, associadas a estes, que proporcionaram novas soluções de reforço.

Os materiais de elevado desempenho, anteriormente referidos, são os polímeros reforçados com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*). Estes, na sua composição, podem ter fibras de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*), vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*) ou aramida (AFRP – *Aramid Fiber Reinforced Polymer*). Os CFRP destacam-se por apresentarem elevados valores de rigidez e resistência à tração, baixa densidade, boa estabilidade dimensional (coeficiente de expansão térmica baixo), boa resistência térmica e química, boa resistência aos agentes ambientais e não absorverem água. Além disso, oferecem uma diversidade de características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos exibam grande versatilidade para várias aplicações em engenharia e apresentam uma excelente relação custo/benefício.

O reforço de elementos de betão armado com compósitos de CFRP pode ser realizado através da técnica da colagem externa (EBR - *Externally Bonded Reinforcement*) que consiste na colagem dos compósitos de CFRP nas faces exteriores do elemento estrutural, de acordo com

o tipo de reforço que se pretende efetuar. Em alternativa à técnica EBR existe a técnica da inserção (NSM - *Near Surface Mounted*), que passa pela aplicação do reforço de CFRP através da sua inserção em entalhes efetuados no betão de recobrimento. As técnicas de reforço com CFRP, além de recorrerem a materiais leves e de elevado desempenho (não só do ponto de vista mecânico mas também de durabilidade), são de fácil e rápida aplicação. Estudos já realizados demonstraram que a técnica NSM é mais eficiente que a técnica EBR e que o reforço com laminados de CFRP inseridos é mais eficaz do que o reforço com varões de CFRP inseridos.

Reforçar estruturas de betão armado existentes envolve, frequentemente, a presença de betões em estado fendilhado. Assim, no âmbito da análise da viabilidade da aplicação da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço de estruturas de betão armado, torna-se importante avaliar o efeito da pré-fendilhação do betão na eficácia da referida técnica de reforço. Neste contexto, a presente dissertação terá como objeto de estudo avaliar o efeito da pré-fendilhação do betão no comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

De um modo geral, com a presente dissertação pretende-se avaliar, experimentalmente, o efeito da pré-fendilhação do betão no reforço à flexão de vigas de betão armado, com laminados de CFRP inseridos. Os objetivos para a investigação a realizar no âmbito da presente dissertação foram os seguintes:

- Avaliar a eficácia da técnica da inserção de laminados de CFRP quando aplicada no reforço à flexão de vigas de betão armado, que apresentam um determinado padrão de fendilhação previamente à aplicação do reforço de CFRP;
- Avaliar o efeito da percentagem de reforço de CFRP, no comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com a técnica NSM, que apresentam um determinado padrão de fendilhação previamente à aplicação do reforço de CFRP;
- Avaliar o efeito do nível de dano (nível de pré-fendilhação) que as vigas de betão armado apresentam, no desempenho do reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos, em termos do comportamento estrutural das vigas, dos modos de rotura e do nível máximo de mobilização do CFRP.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos.

O Capítulo 1, Introdução, é composto pelas considerações gerais, de forma a enquadrar o leitor no tema a abordar, pelos objetivos a atingir e pela descrição da estrutura adotada para a dissertação.

No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, é descrito o trabalho de pesquisa bibliográfica efetuado sobre o tema da presente dissertação. Inicialmente, são apresentados os vários tipos de materiais compósitos existentes para o reforço de estruturas de betão armado, com particular destaque para os compósitos de CFRP. Posteriormente, são descritas as técnicas de reforço de elementos estruturais de betão armado com materiais compósitos de CFRP, dando particular relevo à técnica NSM com laminados de CFRP. O capítulo termina com a abordagem à questão da pré-fendilhação do betão na eficácia do reforço à flexão com materiais compósitos de CFRP.

O Capítulo 3, Programa Experimental, descreve, detalhadamente, a investigação experimental realizada na presente dissertação. Serão apresentados os modelos ensaiados, as características dos materiais utilizados, a aplicação do reforço de CFRP nas vigas, o tipo de ensaios realizados e a instrumentação adotada para as vigas. Posteriormente, são apresentados os resultados obtidos e é efetuada uma análise dos mesmos. Os resultados obtidos serão comparados com os que foram alcançados no trabalho de Azevedo (2011), onde foram testadas vigas semelhantes às ensaiadas no âmbito do presente programa experimental, com a diferença de não existir pré-fendilhação das vigas antes da execução do reforço.

No Capítulo 4 são apresentadas as conclusões gerais da investigação realizada no âmbito da presente dissertação. Ainda, neste capítulo, são apontadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

No Capítulo 5 estão indicadas as referências bibliográficas que suportaram o trabalho de investigação desenvolvido.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

No presente capítulo apresenta-se o resultado da pesquisa bibliográfica, efetuada sobre a temática da presente dissertação. Neste contexto, serão referidos conceitos importantes e trabalhos de investigação já realizados. Assim, após uma breve descrição sobre as técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas, serão apresentados os vários tipos de materiais compósitos de FRP existentes, referindo-se os seus constituintes e as suas principais propriedades. Numa fase seguinte, são descritas as técnicas de reforço de estruturas de betão armado com materiais compósitos de CFRP, com particular destaque para a técnica da inserção do CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM). O capítulo termina com a apresentação de alguns trabalhos experimentais já realizados sobre a adoção de compósitos de CFRP no reforço à flexão de elementos de betão armado, em que o betão já se encontrava fendilhado na altura da aplicação do reforço.

2.1. SOLUÇÕES CLÁSSICAS DE REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

No início do século XX, o aparecimento do betão armado levou a que fosse este, o material mais utilizado na construção, devido ao facto da, quase perfeita, combinação entre o aço e o betão. Com efeito, o menor desempenho do betão em determinadas circunstâncias é compensado pela presença do aço e vice-versa (por exemplo, num elemento de betão armado, o facto do betão ter uma baixa resistência à tração é compensado pelo bom desempenho do aço em resistir a este tipo de esforço).

Apesar das potencialidades do betão armado, atualmente existe uma necessidade, muito significativa, de reabilitar e reforçar estruturas de betão armado. Um deficiente dimensionamento da estrutura de betão armado, a aplicação de cargas superiores às que foram consideradas na fase de dimensionamento (por exemplo devido a uma mudança do tipo de

utilização da estrutura), erros de construção e a deterioração dos materiais são algumas das causas que contribuem para necessidade de uma intervenção de reforço.

As técnicas de reforço de estruturas de betão armado utilizadas há mais tempo são: o encamisamento total ou parcial das secções, a colagem de chapas de aço e a aplicação de pré-esforço exterior (Dias, 2008). Nas secções seguintes são apresentadas, resumidamente, as principais características destas técnicas de reforço.

2.1.1. Adição do betão por encamisamento das secções

Esta técnica consiste no aumento da secção transversal do elemento em questão (pilar, viga, etc.) por intermédio de uma nova camada de betão, que envolve total ou parcialmente a secção inicial e, na qual, ficam inseridas as novas armaduras (Carvalho, 2010). Na Figura 2.1 é possível observar a aplicação desta técnica de reforço, no caso de pilares e vigas de betão armado.

Esta técnica de reforço apresenta as seguintes vantagens (Appleton e Gomes, 1997):

- Economia, garantida pela não necessidade da utilização de mão-de-obra especializada na sua aplicação, bem como, pelo uso de materiais correntemente utilizados na construção;
- Boa resistência a situações acidentais de incêndio;
- Excelente compatibilidade com o elemento estrutural a reforçar;
- Aumenta ligeiramente a ductilidade do modelo reforçado;
- Comparativamente com soluções de reforço que recorrem à colagem externa de chapas de aço, proporciona melhor resistência à corrosão das armaduras.

Como aspetos menos positivos da técnica de reforço em análise refira-se:

- Incremento substancial do peso próprio da estrutura;
- Implicações a nível arquitetónico e, em certos casos, a nível técnico, devido ao aumento da secção transversal dos elementos estruturais;
- Em virtude das suas características altamente intrusivas, durante a intervenção de reforço existem, geralmente, restrições ao nível da utilização da estrutura;
- Morosidade de aplicação.

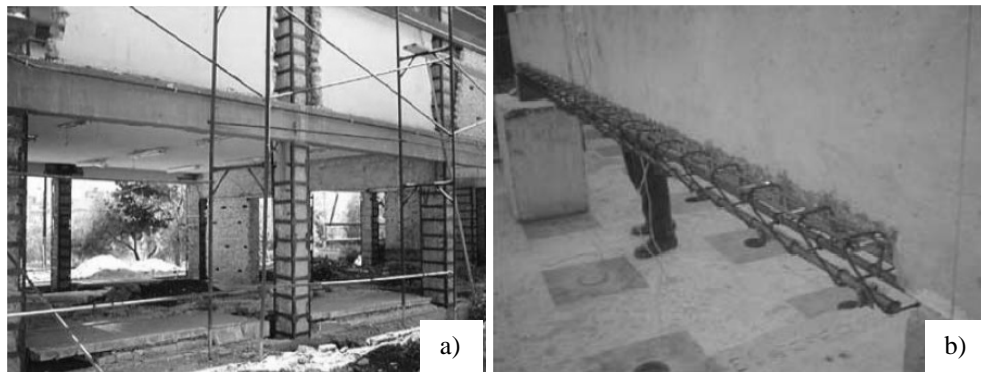


Figura 2.1 - a) Reforço de pilares com encamisamento da secção (Fardis, 2009); b) Pormenor da intervenção de reforço de uma viga com a técnica do encamisamento da secção (Shehata *et al.*, 2009).

2.1.2. Reforço por adição de chapas coladas

Segundo Romeira (2012), o reforço por adição de chapas de aço coladas (Figura 2.2) surgiu como uma alternativa à técnica de encamisamento das secções, anteriormente referida, e está associada aos trabalhos desenvolvidos por L’Hermite (1967), Bresson (1971) e L’Hermite (1977).

Esta técnica de reforço consiste na colagem de chapas de aço na zona dos elementos solicitada por tensões de tração, sendo a adesão, entre as chapas e a secção de betão, obtida através de um adesivo à base de resinas epoxídicas (Carvalho, 2010). A ligação das chapas de aço ao elemento estrutural pode ser complementada com buchas metálicas.

As vantagens desta técnica de reforço são as seguintes (Carvalho, 2010):

- Reduzido acréscimo nas dimensões das secções;
- Baixo custo;
- Maior rapidez de aplicação, comparativamente com a técnica de encamisamento das secções;
- Baixo nível de intrusão no sistema estrutural;
- Bom comportamento estrutural, ou seja, a estrutura resiste de forma eficaz às solicitações a que é sujeita.

Como aspetos menos positivos da técnica de reforço em análise refira-se:

- Fraca resistência a situações acidentais de incêndio;
- Elevada suscetibilidade à corrosão;
- Aumento significativo do peso próprio do elemento estrutural;
- Dificuldades ao nível do transporte, armazenamento e manuseamento das chapas;

- Reduzida tolerância térmica e higroscópica, na aplicação;
- Toxicidade dos materiais aderentes envolvidos.

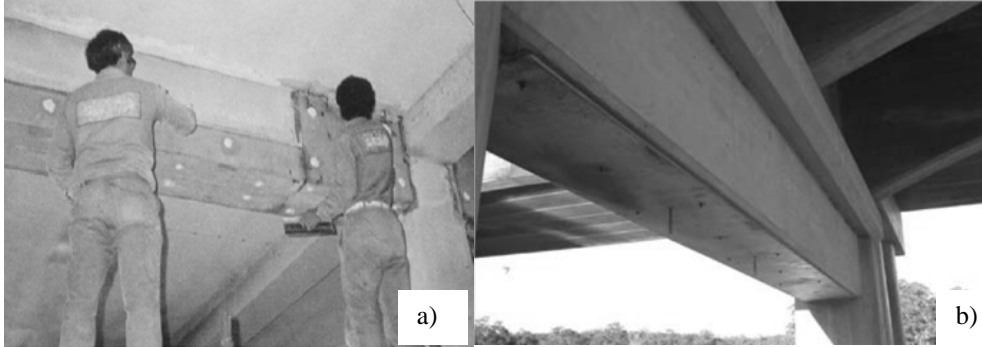


Figura 2.2 - a) Aplicação do reforço com chapas de aço coladas numa viga (Rodrigues, 2010); b) Aspetto de uma viga reforçada com chapas de aço coladas (Rodrigues, 1993).

2.1.3. Aplicação de pré-esforço exterior

A aplicação de pré-esforço exterior é outra das técnicas de reforço tradicionalmente utilizada. Na Figura 2.3 é possível observar um pormenor do reforço de um viaduto com pré-esforço exterior (Rodrigues, 2005).

As vantagens da utilização desta técnica de reforço são:

- Controlo da capacidade de carga e da deformação da estrutura;
- Aumento da capacidade resistente, permitindo suportar cargas superiores àquelas que a estrutura suportaria caso não fosse reforçada.

Como inconvenientes, associados à técnica de aplicação de pré-esforço exterior, refira-se:

- Necessidade de proteger as armaduras de pré-esforço da ação da corrosão, do fogo e de atos de vandalismo;
- Necessidade de estabelecer sistemas de ancoragem;
- Pode originar, o aparecimento de esforços adicionais nos elementos não reforçados.



Figura 2.3 - Reforço de um viaduto aplicando pré-esforço exterior (Rodrigues, 2005).

2.2. MATERIAIS COMPÓSITOS

O avanço da tecnologia proporcionou o surgimento de novos materiais para o reforço e reabilitação de estruturas. Através de várias experiências, conjugando vários materiais, foram desenvolvidos novos materiais compósitos, que resultam de uma combinação de dois ou mais materiais (sendo perfeitamente distinguíveis), cujas características se complementam, de forma a que, em conjunto, estes adquirem propriedades que, isoladamente, não teriam. De entre estes materiais, destacam-se os FRP (*Fiber Reinforced Polymer* - Polímeros Reforçados com Fibras) (Carvalho, 2010).

Os materiais compósitos de FRP são constituídos por duas fases: fase contínua (matriz ou aglomerante) e fase dispersa (resistente) constituída por fibras (Romeira, 2012). Assim, de um modo geral é possível dizer que os FRP são constituídos por fibras embebidas numa matriz polimérica (Figura 2.4).

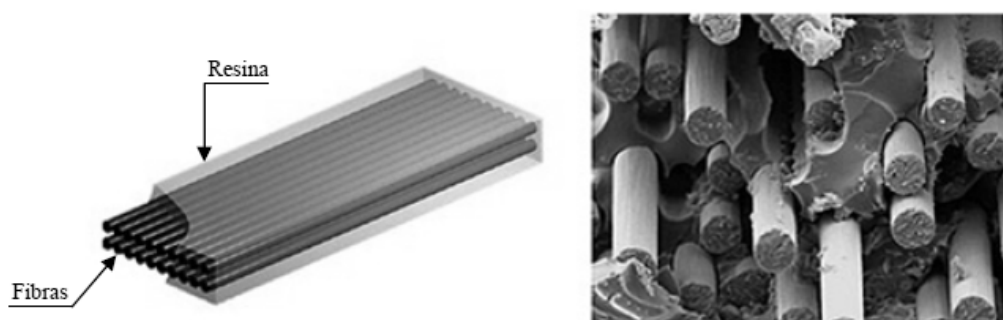


Figura 2.4 - Constituição dos materiais compósitos de FRP (Azevedo, 2011).

2.2.1. Fibras

As fibras são o elemento estrutural principal do compósito de FRP, ocupando grande parte do seu volume. Segundo Martins e Soares (2006), a “American Society for Testing Materials – ASTM, Commitee D30” define fibras como materiais alongados, sob a forma de filamentos, com uma razão comprimento/diâmetro de, pelo menos, 10/1 e deverão, ainda, ter uma secção transversal mínima de $5 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ e espessura máxima de 0.25 mm.

As fibras têm como função suportar as solicitações mecânicas dos compósitos. Apresentam módulo de elasticidade e resistência à tração elevados, baixa densidade e apresentam comportamento frágil (comportamento elástico sem patamar de cedência) (Dias, 2008).

Relativamente ao tipo de fibras, as mais utilizadas são as de vidro (G), aramida (A) e de carbono (C). Os FRP com fibras de vidro, aramida e carbono designam-se, respetivamente, por GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer* – Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro), AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer* – Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida) e CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer* – Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono).

As fibras de vidro são produzidas por fusão direta. As suas principais vantagens são a resistência a altas temperaturas, transparência, isotropia de expansão térmica, boa aderência às matrizes poliméricas, boa resistência química e boa razão características mecânicas/preço. Como principais limitações, refiram-se a grande suscetibilidade a danos da superfície e o facto das características mecânicas específicas serem inferiores às dos outros tipos de fibras, principalmente em termos de módulo de elasticidade (Fonseca, 2005).

As principais vantagens das fibras de aramida são a elevada resistência específica em tração, excelente resistência ao choque, vibrações e desgaste, módulo de elasticidade moderado, baixa densidade e bom comportamento ao fogo. As suas desvantagens são a má resistência química aos ácidos fortes concentrados e a baixa resistência à compressão e às tensões tangenciais, devido às propriedades anisotrópicas das fibras, à sensibilidade aos raios ultravioleta, à fluência, às temperaturas elevadas e à elevada absorção de humidade (Fonseca, 2005; Dias, 2008 e Rodrigues, 2009).

As fibras de carbono são produzidas através de um processo chamado pirólise controlada e apresentam várias vantagens, como o seu alto módulo de elasticidade, excelentes características mecânicas à tração, baixa densidade, boa estabilidade dimensional (coeficiente de expansão térmica baixo), boa resistência térmica, química e aos agentes ambientais, não absorvem água, oferecem uma diversidade de características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos exibam grande versatilidade, em várias aplicações de engenharia e apresentam uma excelente relação custo/benefício. Os seus inconvenientes são a sensibilidade ao choque, a fraca resistência à abrasão, a corrosão do tipo galvânico quando em contacto com metais e ataque pelo oxigénio do ar a temperaturas superiores a 400°C (Martins e Soares, 2006; Dias, 2008 e Rodrigues, 2009).

De referir, que a cada um dos tipos de fibras acima mencionados, existe um conjunto de sub-tipos associados, como é o caso das fibras de carbono HM, fibras de alta resistência, e das fibras de carbono HS, fibras com alto módulo de elasticidade.

A Figura 2.5, representa o diagrama de comportamento tensão vs extensão de diferentes tipos de fibra, que anteriormente já foram referidos, do aço pré-esforçado e do aço A500. Da análise desta figura, é possível verificar que as fibras apresentam um comportamento elástico linear até à rotura (comportamento frágil), contrariamente ao comportamento dúctil do aço das armaduras de pré-esforço e do aço A500. Dos vários tipos de fibra, as de carbono são as que apresentam melhor desempenho mecânico. Na Tabela 2.1 apresentam-se as propriedades mecânicas mais significativas (módulo de elasticidade, resistência à tração e extensão na rotura) de vários tipos de fibras de carbono, vidro e aramida.

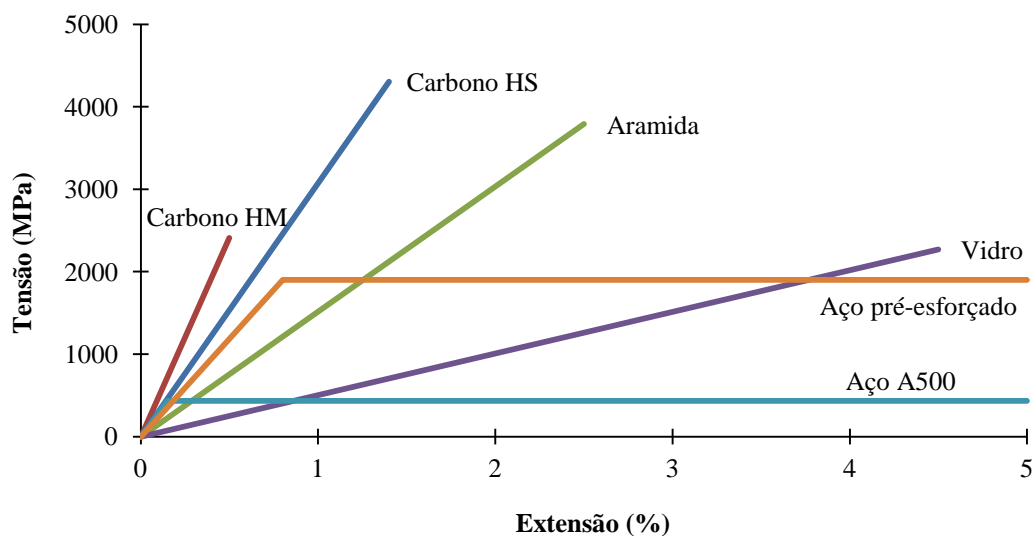


Figura 2.5 - Diagrama tensão vs extensão de fibras e outros materiais (Rodrigues, 2009).

Tabela 2.1 - Tipos de fibras e suas propriedades (adaptado de ACI 440.2R-02 (2007)).

| Tipo de fibra | Módulo de elasticidade (GPa) | Resistência à tração (MPa) | Extensão na rotura (%) |
|------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------|
| <i>Carbono</i> | | | |
| Normal | 220-240 | 2050-3790 | 1.2 |
| Alta resistência | 220-240 | 3790-4820 | 1.4 |
| Ultra alta resistência | 220-240 | 4820-6200 | 1.5 |
| Alto módulo | 340-520 | 1720-3100 | 0.5 |
| Ultra alto módulo | 520-690 | 1380-2400 | 0.2 |
| <i>Vidro</i> | | | |
| E – Vidro | 69-72 | 1860-2680 | 4.5 |
| S – Vidro | 86-90 | 3440-4140 | 5.4 |
| <i>Aramida</i> | | | |
| Normal | 69-83 | 3440-4140 | 2.5 |
| Elevado desempenho | 110-124 | 3440-4140 | 1.6 |

As fibras de vidro apresentam o valor de extensão de rotura mais elevado, contudo, estes valores são inferiores aos atingidos pelo aço. Em relação aos módulos de elasticidade, as fibras de carbono necessitam de uma deformação menor, para que a sua tensão resistente seja mobilizada.

Dadas as inúmeras vantagens das fibras de carbono, em relação às fibras de aramida e de vidro, consegue-se perceber, a razão pela qual é a mais utilizada no campo do reforço de estruturas recorrendo a materiais compósitos. Daí, estas serem o objeto de trabalho no âmbito desta dissertação. Por isso, daqui para a frente, apenas se irão focar fundamentos sobre estas fibras (CFRP).

Na Tabela 2.2 apresentam-se valores do módulo de elasticidade, resistência à tração e densidade do betão, do aço e das fibras de carbono. Comparando as propriedades mecânicas das fibras de carbono com as do aço e com as do betão, verifica-se serem as fibras de carbono, aquelas que apresentam melhor desempenho, quer em termos de rigidez como em termos de capacidade máxima resistente à tração. Além disso, pode-se verificar que a densidade das fibras é 25% da do aço e 75% da do betão (Dias, 2008).

Tabela 2.2 - Propriedades típicas do betão, do aço e de fibras de carbono (adaptado de Dias (2008) e NP EN 1992-1-1 (2010)).

| Material | Módulo de elasticidade (GPa) | Resistência à tração (MPa) | Densidade (kg/m ³) |
|--------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Betão | 27-44 | 1-5 | 2400 |
| Aço | 200-210 | 400-690 | 7800 |
| Fibras de carbono* | 200-800 | 2500-6000 | 1750-1950 |

* Propriedades das fibras de carbono, não do compósito.

2.2.2. Matriz polimérica

A matriz polimérica tem como funções: manter as fibras unidas em conjunto; protegê-las das agressões ambientais, de danos mecânicos e fenómenos de instabilidade; e transferir os esforços das fibras entre elas. A matriz deve ser química, térmica e mecanicamente compatível com as fibras e, em materiais unidirecionais, são as propriedades da matriz, que controlam as propriedades transversais do compósito (Dias, 2008; Rodrigues, 2009 e Azevedo, 2011).

A matriz pode ser classificada como termoendurecível (onde se incluem as resinas epoxídicas, os poliésteres e o vinil) ou termoplástica. Designa-se de termoendurecível, quando é curada

pela ação de calor ou de tratamento químico, tornando-se infusível (que não se funde) e insolúvel. As suas principais vantagens são a alta resistência a agentes químicos, reduzida fluência e uma considerável estabilidade face a ações térmicas. Designa-se de termoplástica quando se pode tornar, repetidamente, num produto plástico quando aquecido e num produto rígido quando arrefecido (Martins e Soares, 2006; Carvalho, 2010 e Coelho, 2010).

Comparando os dois grupos anteriormente referidos, pode dizer-se que as resinas termoendurecidas, devido à sua reduzida viscosidade, permitem uma produção mais rápida, com menos custos, oferecendo melhor qualidade ao nível de adesão e de impregnação no reforço e apresentam uma maior resistência ao calor, uma vez que a temperatura de transição vítrea (temperatura abaixo da qual uma resina tem uma consistência dura e frágil e acima da qual a mesma resina é macia) é mais elevada, devido ao maior grau de cristalinidade (Firmo, 2010 e Romeira, 2012). Em reforços de CFRP, as resinas mais utilizadas são as termoendurecíveis, designadamente, as epoxídicas e as de poliéster (Dias, 2008). Na Tabela 2.3 apresentam-se valores das propriedades mais significativas destes dois tipos de resina.

Tabela 2.3 - Propriedades de resinas utilizadas em materiais compósitos (Dias, 2008 e Firmo, 2010).

| Resina | Módulo de Elasticidade (GPa) | Resistência à tração (MPa) | Extensão de Rotura (%) | Densidade (kg/m ³) | Temperatura de transição vítrea (°C) |
|-----------|------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Poliéster | 2.1-4.1 | 20-100 | 1.0-6.5 | 1000-1450 | 55-120 |
| Epoxi | 2.5-4.1 | 55-130 | 1.5-9.0 | 1100-1300 | 50-270 |

2.3. SISTEMAS DE FRP

Os sistemas de FRP podem ser agrupados em dois grupos: os sistemas pré-fabricados (laminados e varões) e os sistemas curados “in situ”. Estes últimos podem ainda ser divididos, em sistemas unidireccionais (mantas), bidireccionais e em sistemas multidireccionais (tecidos) (Figura 2.6) (Rodrigues, 2009).

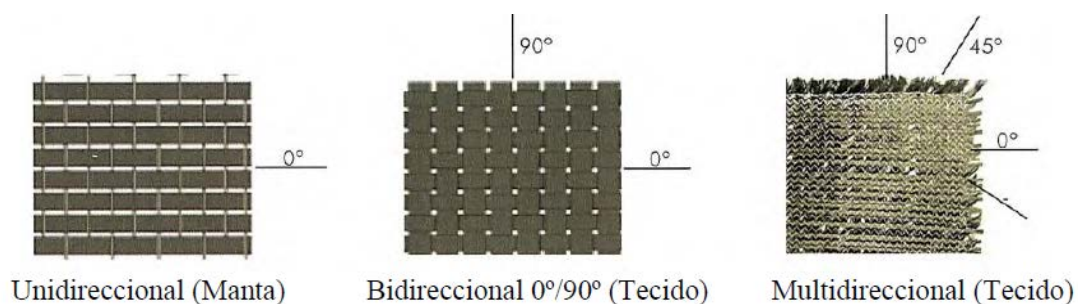


Figura 2.6 - Possíveis orientações das fibras (adaptado de Marques (2008)).

2.3.1. Sistemas pré-fabricados

Estes sistemas consistem na aglutinação, de um conjunto de feixes de fibras contínuas, com uma resina termoendurecível. As propriedades mecânicas e físicas do sistema, como a resistência máxima e a rigidez na direção longitudinal, são conferidas pela orientação unidirecional e pelo esticamento das fibras. Estes sistemas são fornecidos sob a forma de perfis pré-fabricados (Figura 2.7) e as suas características são garantidas pelo fabricante (Araújo, 2002 e Dias, 2008).

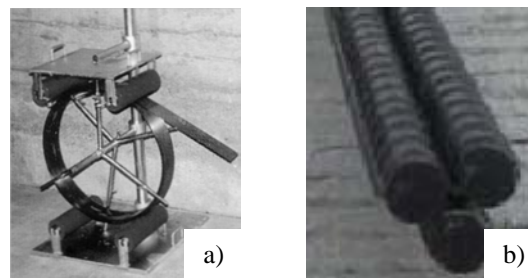


Figura 2.7 - Sistemas de CFRP pré-fabricados: a) laminados; b) varões (Dias, 2008).

2.3.2. Sistemas curados “in situ”

Os sistemas curados “in situ” são feixes de fibras contínuas, em forma de fios, classificados de acordo com a direção das fibras – em mantas (fibras dispostas numa direção - Figura 2.8a) e em tecidos (fibras dispostas em várias direções - Figura 2.8b), em estado seco ou impregnado. As fibras correspondentes a uma camada de manta são colocadas entre duas camadas de resina epoxídica, sendo uma delas previamente aplicada, de forma uniforme, na superfície do betão a reforçar e a outra sobre as fibras, depois de colocadas. As camadas de resina têm como funções impregnar o grupo de fibras, proporcionar a polimerização do conjunto num composto de CFRP e desenvolver propriedades de aderência na ligação CFRP-betão. No final, a espessura do composto curado “in situ” é inferior à espessura de um composto pré-fabricado (Fonseca, 2005; Dias, 2008 e Rodrigues, 2009).

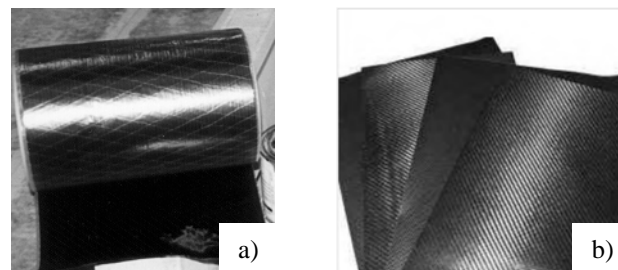


Figura 2.8 - Sistemas de CFRP curados in situ: a) mantas (Dias, 2008); b) tecidos (Juvandes *et al.*, 1996).

2.4. TÉCNICAS DE REFORÇO USANDO MATERIAIS COMPÓSITOS DE CFRP

O reforço de estruturas de betão com materiais compósitos de CFRP pode ser aplicado usando a técnica da colagem externa, designada na literatura internacional por técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) e a técnica da inserção do CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento, designada na literatura internacional por técnica NSM (*Near Surface Mounted*).

2.4.1. Técnica da colagem externa (EBR)

A técnica de colagem externa tem, como princípio, colar o reforço de CFRP nas faces exteriores do elemento estrutural, de acordo com o tipo de reforço que se pretende efetuar. O reforço pode encontrar-se sob forma de laminado, de manta unidirecional ou de tecido multidirecional (Figura 2.9).

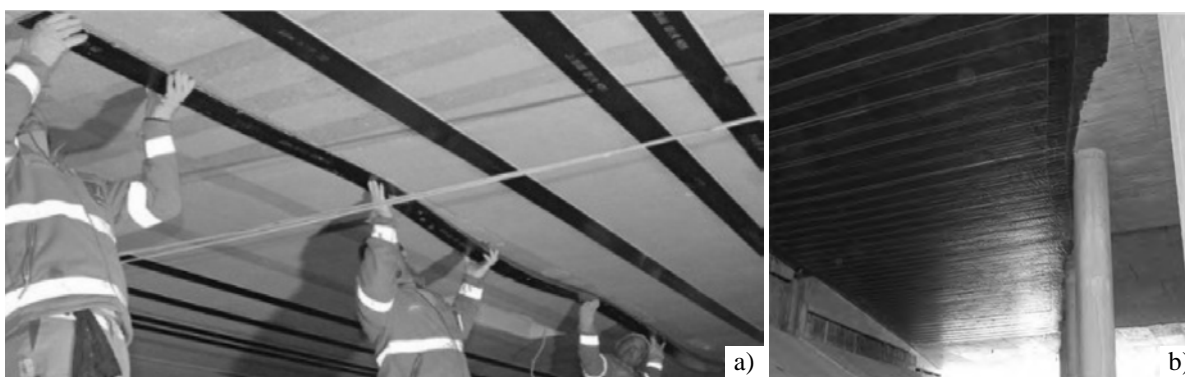


Figura 2.9 - Reforço à flexão com compósitos de CFRP usando a técnica da colagem externa: a) laminados (Carvalho, 2010); b) mantas (Firmo, 2010).

A aplicação dos sistemas compósitos de CFRP, usando a técnica EBR, envolve três tarefas fundamentais: a preparação da superfície do elemento, de modo a garantir que a base tenha boas condições de aderência; a colagem do reforço; e o controlo de qualidade da técnica do reforço antes, durante e após a sua aplicação (Juvandes *et al.*, 2003).

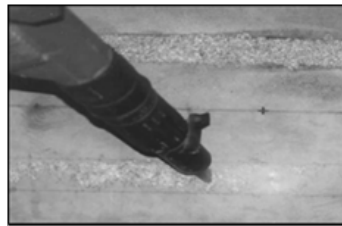
A preparação da superfície do elemento a reforçar envolve a aplicação de um esmeril no caso do sistema curado “in situ” (Figura 2.10a), enquanto que, no caso dos laminados, a superfície do elemento a reforçar deve ser boiardada com jacto de areia ou ser “picotada” com um martelo de agulhas (Figura 2.10b). Posteriormente, e de forma a garantir que a superfície de betão esteja conveniente limpa, deve aplicar-se ar comprimido na mesma. Terminada esta

fase, a superfície de betão deve estar seca, isenta de gorduras e poeiras. Em alguns sistemas de reforço de CFRP existentes, é recomendado que se aplique uma camada de primário de modo a melhorar a aderência dos CFRP à superfície do elemento a reforçar (Figura 2.10c).

Posteriormente ao tratamento de superfície, procede-se à colagem do CFRP tal como ilustrado na Figura 2.10d, para o caso do reforço com manta e na Figura 2.10e, para o caso do reforço com laminado.



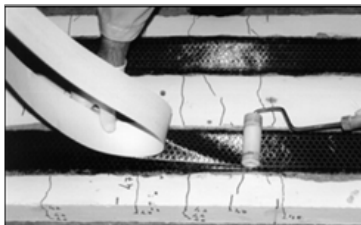
a) Preparação da superfície (manta)



b) Preparação da superfície (laminado)



c) Aplicação do primário



d) Colagem da manta



e) Colagem do laminado

Figura 2.10 - Aplicação de sistemas de reforço de CFRP usando a técnica da colagem externa (Dias, 2001).

Numa intervenção de reforço usando a técnica EBR deve ser garantido um controlo de qualidade, quer nos procedimentos de reforço como dos materiais aplicados. Na Figura 2.11 apresenta-se um organigrama que regista, de uma forma resumida, os passos fundamentais numa intervenção de reforço, com compósitos de CFRP, utilizando a técnica da colagem externa.

Trabalhos experimentais já realizados com elementos de betão armado reforçados, com a técnica da colagem externa, revelaram ser possível associar nesta técnica de reforço, a simplicidade e rapidez de execução, com o facto de proporcionar consideráveis aumentos da capacidade de carga, quer em termos de estados limites serviço (controlo da fendilhação e da deformação e acréscimo de rigidez) como para estados limites últimos (consideráveis acréscimos de carga máxima). No entanto, os reforços de CFRP aplicados com a técnica EBR apresentam alguns aspetos menos positivos. Desde logo, a ocorrência frequente de modos de rotura prematuros, por descolamento/destacamento do CFRP (Figura 2.12), que não permitem o total aproveitamento das elevadas potencialidades destes materiais. Além disso, pelo facto

do reforço de CFRP ser colado externamente, faz com que fique diretamente exposto às condições ambientais adversas e a eventuais atos de vandalismo.

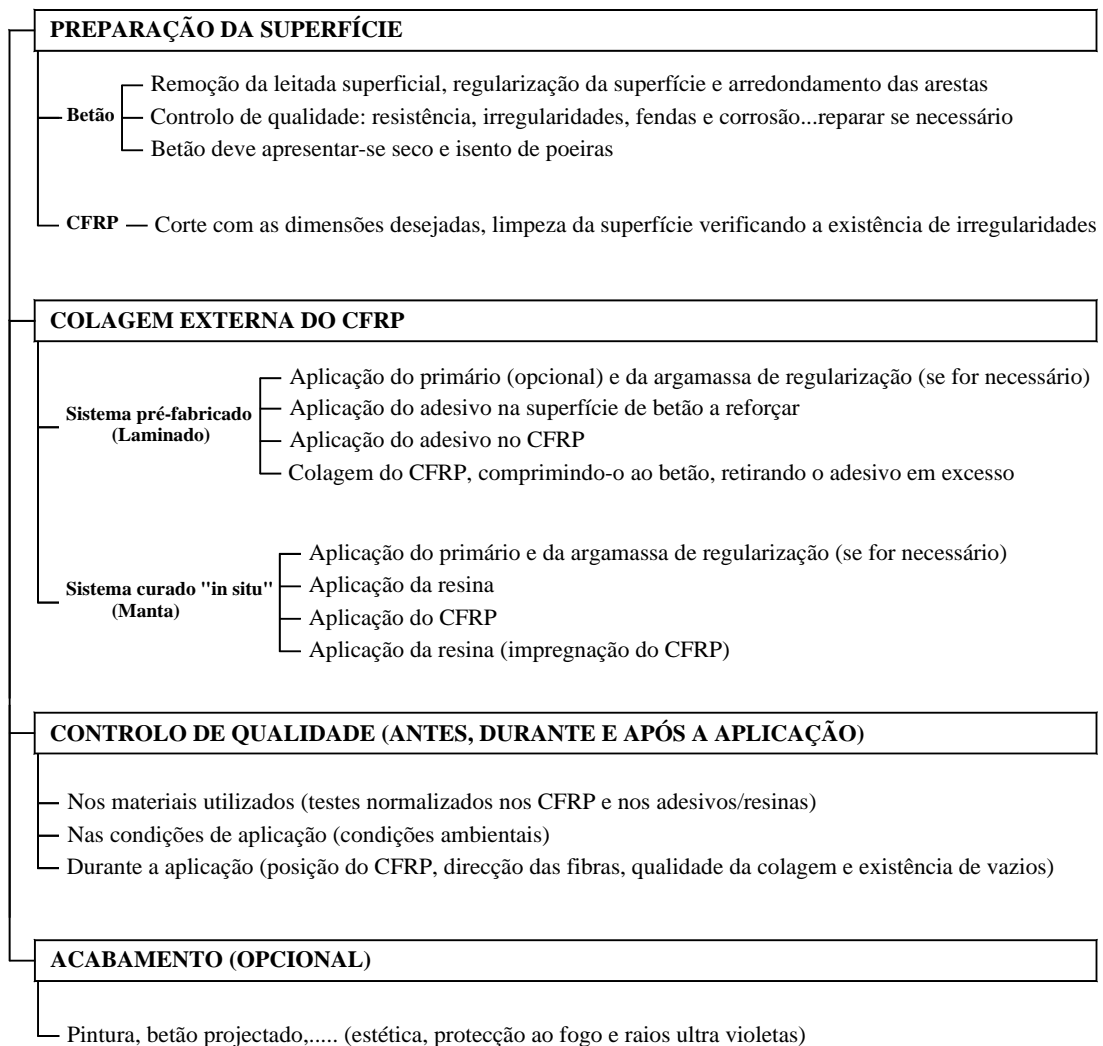


Figura 2.11 - Aplicação da técnica da colagem externa e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias *et al.*, 2006).

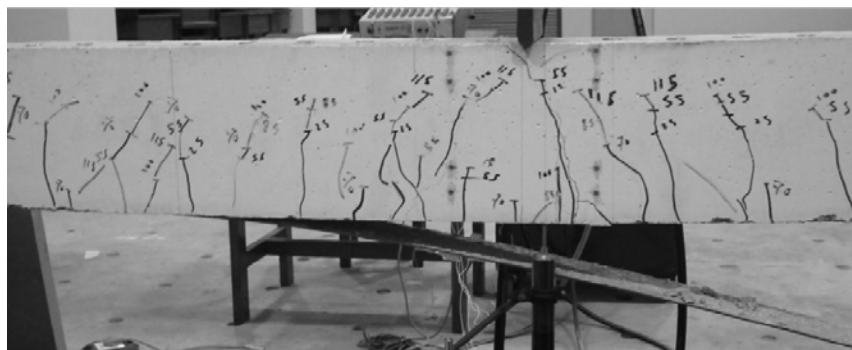


Figura 2.12 - Viga de betão armado reforçada à flexão com CFRP usando a técnica EBR: modo de rotura por descolagem do CFRP (Fayyadh e Razak, 2012).

2.4.2. Técnica da inserção (NSM)

De forma a minimizar os aspetos menos positivos referidos anteriormente no que respeita à aplicação do reforço de CFRP com a técnica da colagem externa (técnica EBR) surgiu mais recentemente a técnica de reforço que consiste na inserção do CFRP (varões ou laminados) em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM). A fixação do CFRP ao betão é feita usando um adesivo epoxídico. Na Figura 2.13 apresenta-se a título de exemplo a aplicação de um reforço à flexão com CFRP usando a técnica NSM.



Figura 2.13 - Aplicação da técnica NSM usando compósitos de CFRP (Casadei *et al.*, 2003).

A técnica de reforço NSM pode ser aplicada utilizando vários tipos de CFRP (Figura 2.14), em termos da forma da secção transversal: varões de secção circular, varões de secção retangular e laminados (uma das dimensões da secção transversal é bastante menor que a outra). Refira-se também que, com o objetivo de incrementar a aderência da ligação betão-adesivo-CFRP, existem varões nervurados e varões que contêm uma superfície rugosa.



Figura 2.14 - Elementos de CFRP usados no reforço com a técnica NSM (De Lorenzis e Teng, 2007).

A técnica NSM começou a ser aplicada usando varões de aço (Asplund, 1949). No entanto, o uso de varões de CFRP em vez dos varões de aço apresenta algumas vantagens. A primeira está relacionada com o facto dos CFRP não terem problemas de corrosão. Além disso, os

varões de CFRP têm um elevado valor da relação entre a resistência à tração e o peso específico.

A utilização de varões CFRP apresenta, no entanto, algumas dificuldades que estão relacionadas com a realização dos entalhes usando os equipamentos de corte disponíveis e com os baixos valores da relação entre a área da superfície colada e a área da secção transversal do varão. A este respeito, El-Hacha e Rizkalla (2004) realizaram um programa experimental aplicando a técnica NSM, de forma a comparar a eficiência da solução de laminados com a solução de varões de CFRP, quando aplicados segundo um critério de ambas as soluções terem a mesma rigidez axial. Os referidos autores concluíram que os laminados foram mais eficazes, aproveitando na sua plenitude o material de reforço (rotura de CFRP foi o modo de rotura observado), enquanto que o modo de rotura associado ao reforço com varões foi prematuro, por descolagem do CFRP. Isto deveu-se ao facto, da área de colagem do varão de CFRP ser baixa, comparativamente com a área de colagem do laminado (Dias, 2008).

Os passos fundamentais da aplicação de um reforço de CFRP com a técnica NSM são os seguintes (Dias, 2008):

- 1 - Execução do entalhe no betão de recobrimento da face do elemento estrutural a reforçar (Figura 2.15a);
- 2 - Limpeza do entalhe com ar comprimido, por forma a proporcionar a melhor aderência possível entre o betão e o adesivo (Figura 2.15b);
- 3 - Corte do laminado com a dimensão pretendida (Figura 2.15c);
- 4 - Limpeza do laminado com acetona, por forma a proporcionar a melhor aderência possível entre o adesivo e o laminado (Figura 2.15d);
- 5 - Produção do adesivo epóxi, de acordo com as especificações do fabricante (Figura 2.15e);
- 6 - Preenchimento do entalhe com adesivo (Figura 2.15f);
- 7 - Aplicação do adesivo nas faces do laminado (Figura 2.15g);
- 8 - Introdução do laminado de CFRP no entalhe (Figura 2.15h).

A Figura 2.16 apresenta um organigrama que regista, resumidamente, os passos fundamentais numa intervenção de reforço, com compósitos de CFRP, utilizando a técnica da inserção (NSM). À semelhança do que já foi referido aquando da descrição da técnica EBR, numa

intervenção de reforço usando a técnica NSM deve ser garantido um controlo de qualidade, quer nos procedimentos de reforço como dos materiais aplicados.

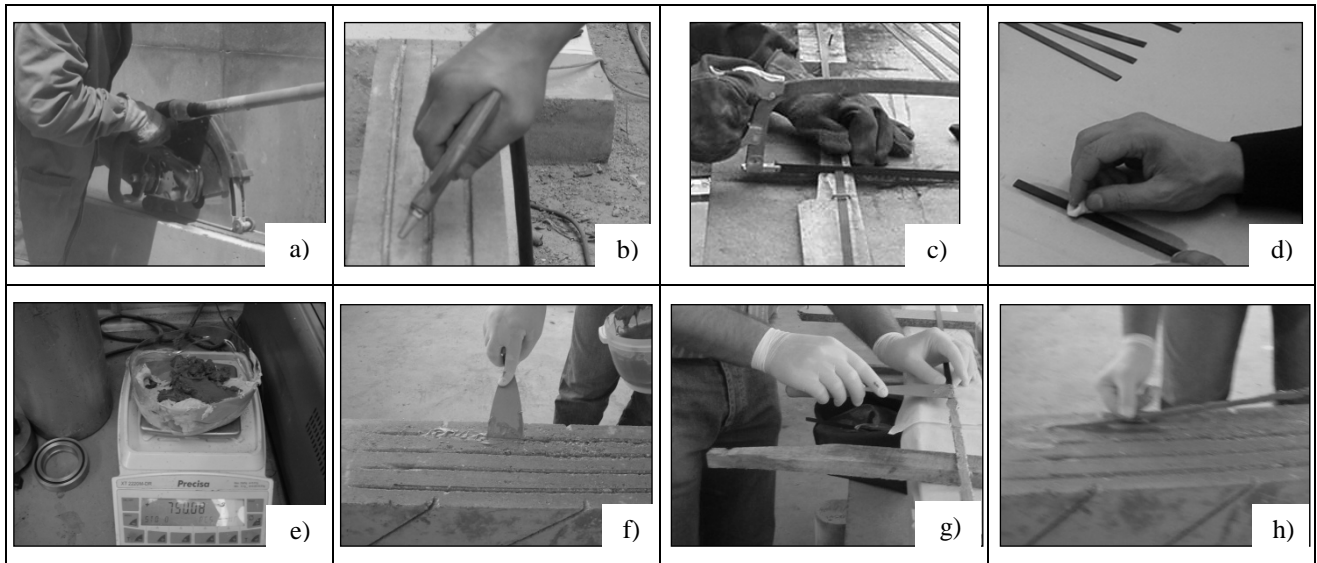


Figura 2.15 - Sequência de aplicação do reforço com laminados de CFRP aplicados com a técnica da inserção (reforço à flexão) (Dias, 2008).

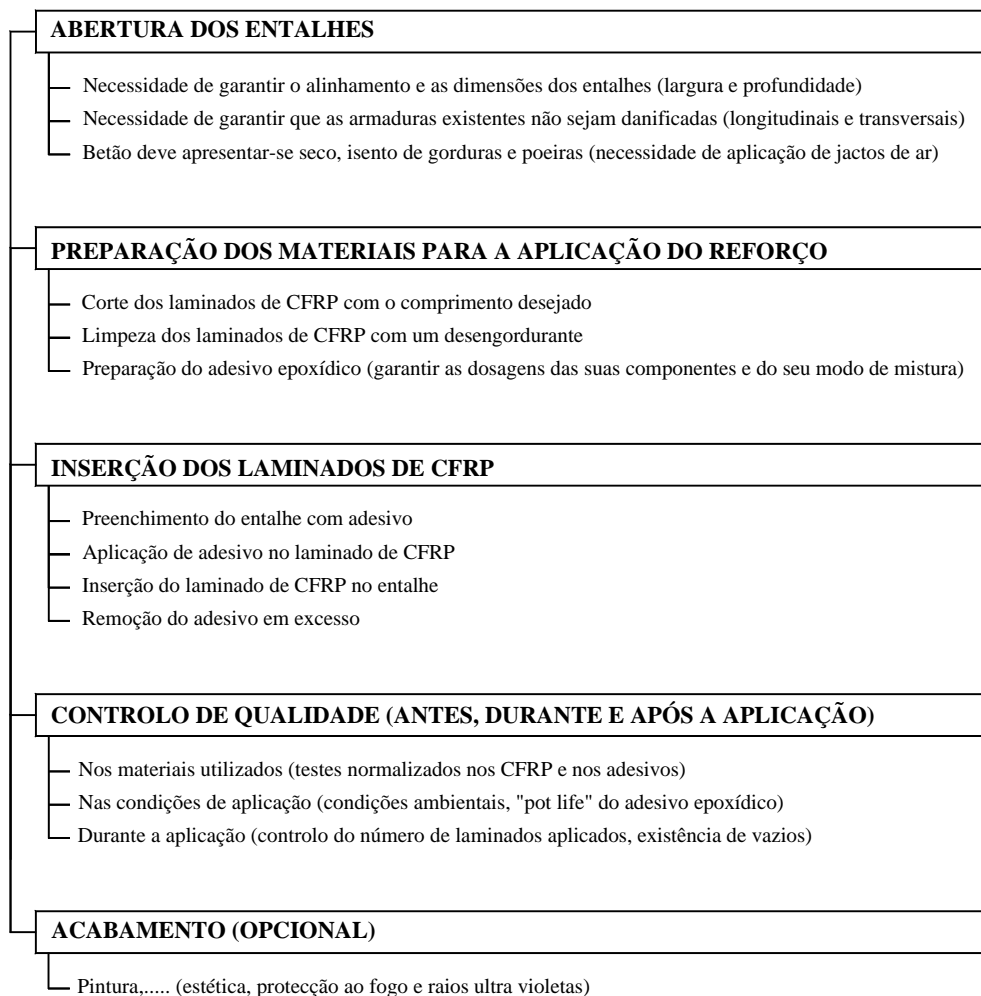


Figura 2.16 - Aplicação da técnica NSM e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias, 2008).

2.4.3. Comparação entre as técnicas EBR e NSM

Tendo em consideração o que foi anteriormente referido, em relação às técnicas de reforço EBR e NSM com compósitos de CFRP é possível efetuar uma comparação entre ambas. A técnica da inserção não requer qualquer preparação da superfície (apenas é necessário executar os entalhes) e existe uma maior probabilidade do betão apresentar melhor qualidade, uma vez que o reforço é inserido no betão de recobrimento e não recorre, apenas, ao betão superficial, como acontece no caso da técnica da colagem externa. Tendo o betão melhor qualidade, haverá uma maior aderência entre o betão e o CFRP. Na técnica NSM, o reforço está inserido em entalhes efetuados no betão de recobrimento, pelo que o reforço fica mais protegido contra ações mecânicas, desgaste, impacto, vandalismo, temperaturas elevadas e condições ambientais adversas. Constata-se, ainda, que aplicando a técnica NSM, a área de colagem do reforço é o dobro da oferecida pela técnica EBR (Figura 2.17) proporcionando assim um grau de fixação do CFRP ao betão mais elevado. Consequentemente, existe uma mobilização de tensões mais elevadas no CFRP aquando da rotura do elemento reforçado, o que permite um melhor aproveitamento das elevadas potencialidades do CFRP (Dias, 2008).

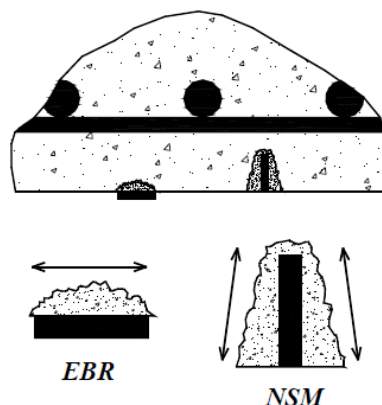


Figura 2.17 - Comparação do grau de fixação conferido pela técnica EBR e pela técnica NSM para o mesmo laminado (adaptado de Carolin (2003)).

Além das vantagens da técnica NSM em relação à técnica EBR já referidas, é possível, ainda, identificar as seguintes: facilidade de conceder ao reforço um mecanismo de prevenção de roturas prematuras, através da ancoragem do CFRP aos elementos estruturais adjacentes; é vocacionada para o reforço à flexão para momentos negativos, devido ao CFRP estar inserido no betão; é mais vocacionada para soluções que envolvam a aplicação de pré-esforço no CFRP (Nordin e Taljsten, 2006).

Fortes e Barros (2002) realizaram um programa experimental, onde foi comparado o grau de eficácia da técnica NSM, com laminados de CFRP, com o proporcionado com a técnica EBR

usando laminados de CFRP ou mantas de CFRP. Neste programa foram ensaiadas, à flexão, três séries de vigas em betão armado (S1, S2 e S3), que se distinguíam pela quantidade de armadura longitudinal e pela solução de reforço à flexão com CFRP adotada (Figura 2.18). As vigas de betão armado, com 1.0 m de comprimento, tinham uma secção transversal retangular de $0.12 \times 0.17 \text{ m}^2$ e continham estribos com 6 mm de diâmetro ($\phi 6$) espaçados de acordo com a disposição apresentada na Figura 2.18 por forma evitar a rotura por corte. Cada uma das séries era constituída por quatro vigas: uma viga de referência sem qualquer reforço aplicado; uma viga reforçada com laminados de CFRP inseridos usando a técnica NSM; uma viga reforçada com laminados de CFRP colados externamente (técnica EBR); uma viga reforçada com manta de CFRP unidirecional (técnica EBR). Na Figura 2.18 e na Tabela 2.4 apresenta-se os dados essenciais para a caracterização dos modelos ensaiados por Fortes e Barros (2002). As faixas de laminado utilizadas tinham uma secção transversal de cerca de 9.59 mm de largura e 1.45 mm de espessura e as propriedades mecânicas eram as seguintes: valor médio do módulo de elasticidade = 158.8 GPa; valor médio da resistência máxima à tração = 2739.5 MPa; valor médio da extensão última = 17.0 %. A manta de CFRP, com 80 mm de largura e 0.111 mm de espessura, tinha em termos médios um módulo de elasticidade de 240 GPa, uma resistência à tração de 3700 MPa e uma extensão última de 15.4 %. O betão, à data da realização do ensaio das vigas, apresentava um valor médio de resistência à compressão de 52.2 MPa ($f_{cm} = 52.2 \text{ MPa}$). As vigas foram ensaiadas até à rotura, aplicando um carregamento monotónico com uma velocidade de deformação de 0.02 mm/s.

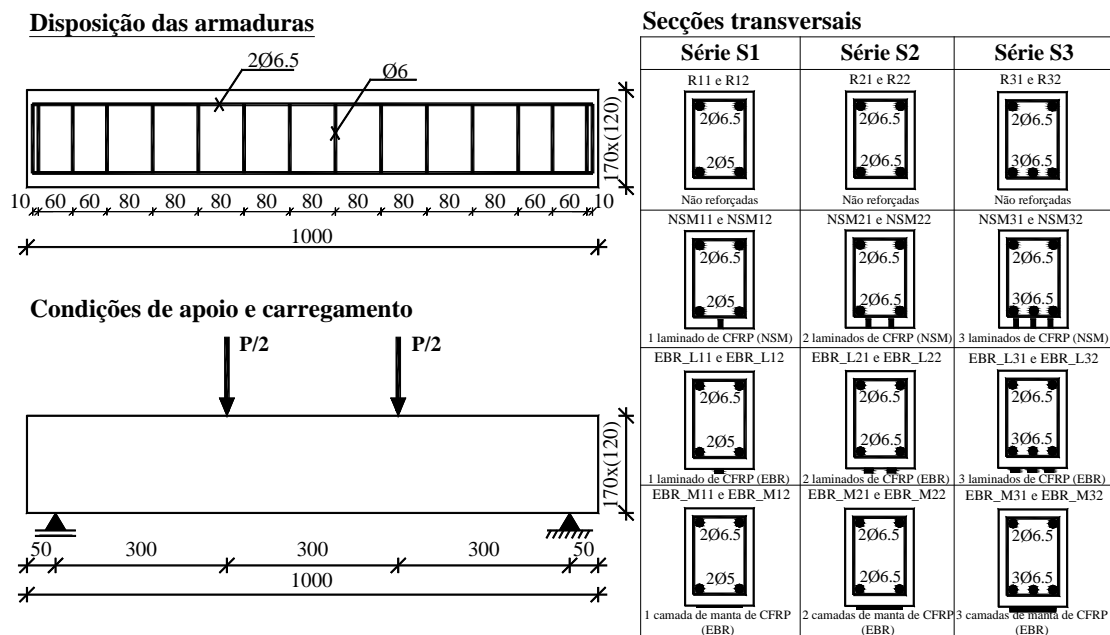


Figura 2.18 - Geometria, armaduras e reforço das vigas (Fortes e Barros, 2002).

Tabela 2.4 - Soluções de reforço de CFRP adotadas.

| Série | Solução de reforço | ρ_{sl} (%)* | ρ_f (%) – laminado** | ρ_f (%) – manta** |
|-------|-----------------------------------|------------------|---------------------------|------------------------|
| S1 | 1 laminado ou 1 camada de manta | 0.240 | 0.068 | 0.044 |
| S2 | 2 laminados ou 2 camadas de manta | 0.405 | 0.136 | 0.087 |
| S3 | 3 laminados ou 3 camadas de manta | 0.608 | 0.204 | 0.131 |

* Percentagem de armadura longitudinal de tração - $\rho_{sl} = A_{sl}/(b_w \times d)$; ** Percentagem de reforço - $\rho_f = A_f/A_c$.

Os autores deste programa experimental constataram que em todas as séries de vigas ensaiadas, o reforço de CFRP teve maior desempenho quando aplicado usando a técnica da inserção (NSM). Com efeito, independentemente da série de vigas testadas (S1, S2 e S3), as vigas reforçadas com laminados inseridos foram as que apresentaram valores de carga de rotura mais elevados. Os resultados obtidos por Fortes e Barros (2002) permitiram verificar que a eficácia dos reforços de CFRP diminui, quer com o aumento da percentagem de armadura longitudinal quer com o aumento da percentagem de CFRP. A técnica de reforço por colagem externa (EBR), utilizando a manta de CFRP, foi a que proporcionou maiores acréscimos de carga de serviço. Para tal, contribui o facto das mantas de CFRP terem maior módulo de elasticidade do que os laminados de CFRP.

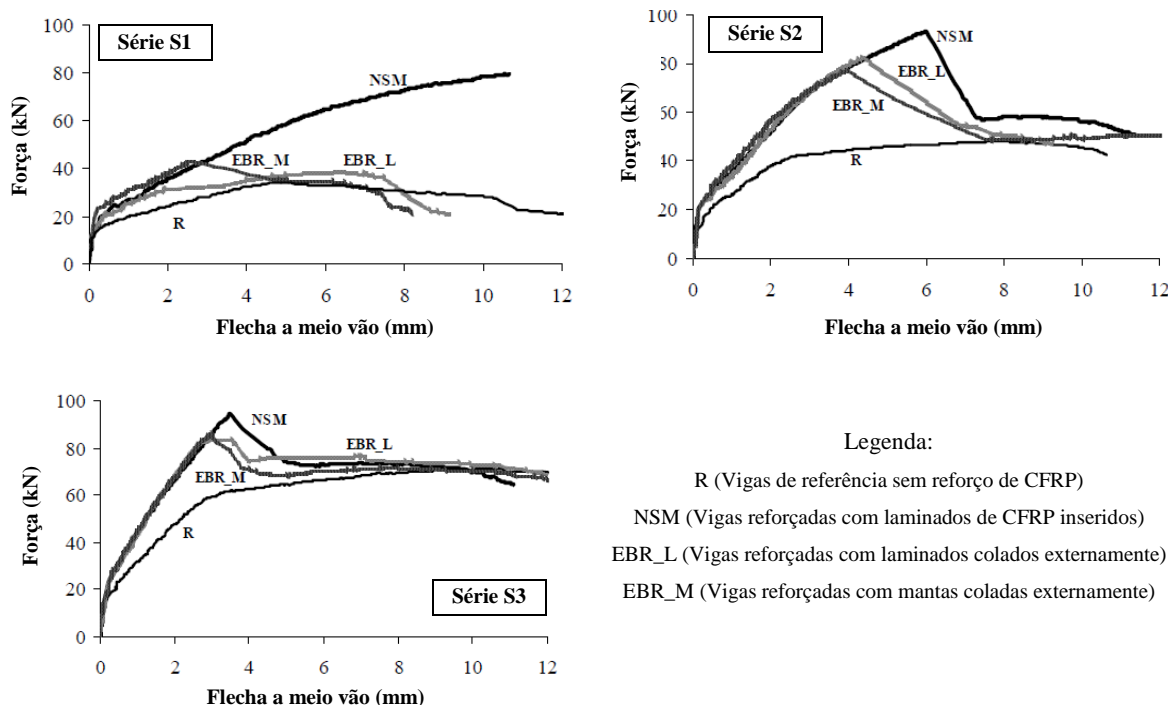


Figura 2.19 - Relações força vs flecha das vigas das séries S1, S2 e S3 (Fortes e Barros, 2002).

Por forma a comparar a eficácia de várias técnicas de reforço com laminados de CFRP no aumento da capacidade resistente à flexão de vigas de betão armado, Sena-Cruz *et al.* (2012)

desenvolveram um programa experimental, onde foram comparadas as seguintes técnicas de reforço: EBR, NSM e MF-EBR (*Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement*). Foram ensaiados dois grupos de vigas de betão armado: um sujeito a carga monotónica até à rotura e outro sujeito, numa primeira fase a carregamento cíclico (fadiga) e posteriormente a carregamento monotónico até à rotura. Cada grupo continha quatro vigas: uma de referência e as restantes três foram reforçadas com técnicas de reforço anteriormente referidas. Tanto a técnica MF-EBR como a análise dos resultados dos ensaios de fadiga não serão mencionados no âmbito da presente revisão bibliográfica.

Na Figura 2.20 está representada, a geometria das vigas ensaiadas por Sena-Cruz *et al.* (2012) que tinham 2.0 m de distância entre os apoios e uma secção transversal com $200 \times 300 \text{ mm}^2$. As vigas estavam armadas longitudinalmente com 3 varões de 10 mm ($3\phi 10$) na face tracionada e com 2 varões de 10 mm ($2\phi 10$) na face comprimida. A Tabela 2.5 apresenta as características das vigas testadas por Sena-Cruz *et al.* (2012), em que t_f , L_f e w_f são a espessura, o comprimento e a largura do laminado, respetivamente. Na mesma tabela, $\rho_{s,eq}$ é a percentagem de armadura longitudinal equivalente definida por intermédio da expressão 2.1:

$$\rho_{s,eq} = \frac{A_s}{b_w d_s} + \frac{E_f}{E_s} \times \frac{A_f}{b_w d_f} \quad (2.1)$$

onde E_s e E_f são, respetivamente, o módulo de elasticidade do aço e do FRP e d_s e d_f são as distâncias desde a fibra mais comprimida do betão, até ao centro dos varões de aço e do reforço de CFRP, respetivamente.

As armaduras utilizadas na conceção das vigas eram do tipo A400NR SD com uma tensão de cedência de 460 MPa e uma extensão após a rotura de 14%. O betão, à data do ensaio das vigas, tinha um valor médio de resistência à compressão de 53.08 MPa ($f_{cm} = 53.08 \text{ MPa}$) e um valor médio de 31.17 GPa para o módulo de elasticidade. Os laminados de CFRP aplicados nas vigas reforçadas com as técnicas EBR e NSM tinham as seguintes propriedades (valores médios): resistência à tração de 2435 MPa, módulo de elasticidade de 158 GPa e extensão última de 1.50%.

As curvas de comportamento força *vs* deslocamento a meio vão das vigas REF, EBR e NSM quando sujeitas a um carregamento monotónico até à rotura (ensaio à flexão em quatro pontos de carga – ver Figura 2.20) estão representadas na Figura 2.21.

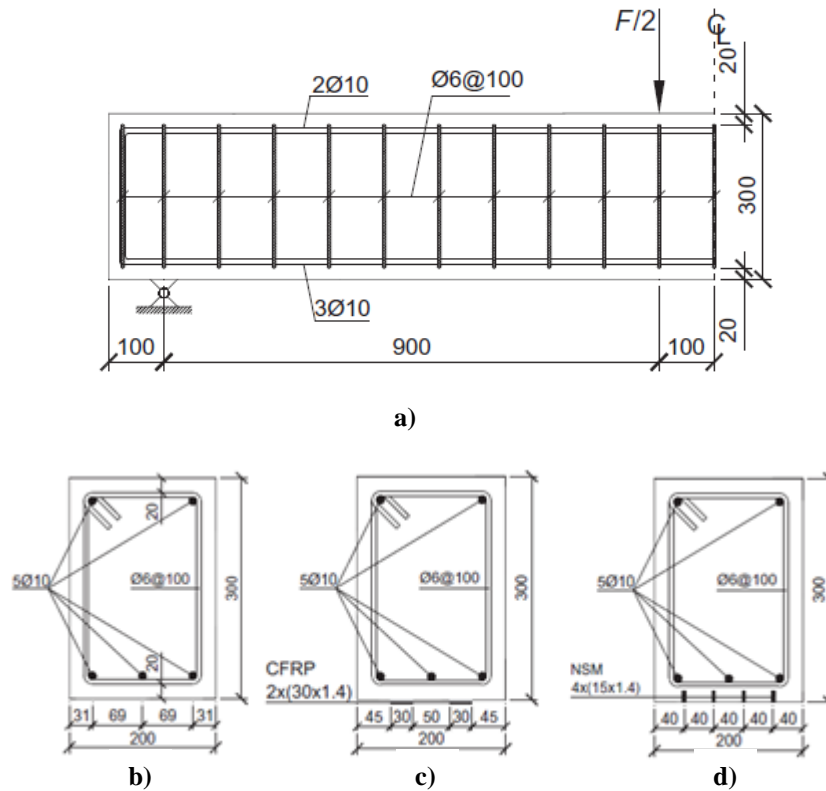


Figura 2.20 - Geometria das vigas ensaiadas: a) alçado; secção transversal da: b) viga de referência; c) viga reforçada usando a técnica EBR; d) viga reforçada usando a técnica NSM (Sena-Cruz *et al.*, 2012). (dimensões em milímetros).

Tabela 2.5 - Características das vigas ensaiadas por Sena-Cruz *et al.* (2012).

| Viga | Tipo de laminado | Nº de laminados | t_f (mm) | L_f (mm) | w_f (mm) | ρ_{sl}^* (%) | $\rho_{s, eq}$ (%) |
|------|------------------|-----------------|------------|------------|------------|-------------------|--------------------|
| REF | — | — | — | — | — | — | 0.439 |
| EBR | Unidirecional | 2 | 1.41 | 1400 | 30 | 0.439 | 0.550 |
| NSM | Unidirecional | 4 | 1.41 | 1400 | 15 | — | 0.561 |

* Percentagem de armadura longitudinal de tração - $\rho_{sl} = A_{sl}/(b_w \times d)$.

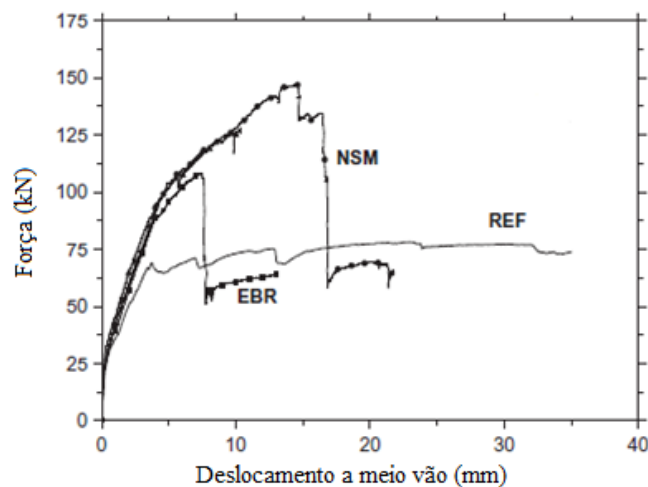


Figura 2.21 - Força vs deslocamento a meio vão das vigas REF, EBR e NSM (Sena-Cruz *et al.*, 2012).

Na Figura 2.21 é possível observar, tomando como base o comportamento da viga de referência (REF), que o reforço de CFRP proporcionou às vigas um aumento da capacidade de carga máxima de: 37% no caso do reforço aplicado com a técnica EBR e 86% no caso do reforço aplicado com a técnica NSM. Para avaliar o nível de ductilidade, os autores adotaram como indicador a razão d_{max}/d_y em que d_{max} é o deslocamento a meio vão da viga quando esta atingiu a sua capacidade de carga máxima e d_y é o deslocamento a meio vão da viga associada à carga de cedência das armaduras. Os autores verificaram que a razão d_{max}/d_y foi de 2.98 para a viga reforçada com a técnica da inserção e 1.80 para a viga reforçada com o reforço aplicado com a técnica EBR.

Os trabalhos experimentais apresentados permitem concluir que a técnica NSM é mais eficaz que a técnica de colagem externa (EBR). Aplicando o reforço com a técnica NSM a precocidade da descolagem do CFRP, que tipicamente ocorre nos reforços com a técnica EBR, é retardada (e até evitada em alguns casos). Em elementos de viga e laje, há um aumento da capacidade de carga e da capacidade deformacional, no momento da sua rotura, indicando a eficácia da técnica da inserção, em termos de promover roturas mais dúcteis; e ainda, um aumento do valor da carga, correspondente à cedência das armaduras longitudinais e um aumento da rigidez, a partir do início de fendilhação, na técnica NSM (Dias, 2008).

Vários trabalhos experimentais (Blaschko e Zilch (1999); El-Hacha e Rizkalla (2004) e Barros *et al.* (2005)), também demonstraram a maior eficácia da técnica da inserção (NSM) quando comparada com a da técnica da colagem externa.

2.5. REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM LAMINADOS DE CFRP INSERIDOS

Nesta secção, serão apresentados trabalhos experimentais, já realizados, dos quais foi obtida informação, sobre o comportamento típico de vigas de betão armado, reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos; modos de rotura; fatores que podem ocorrer influenciando a eficácia da técnica de reforço em questão; e o efeito do corte dos estribos, em vigas reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos.

2.5.1. Comportamento mecânico

O trabalho experimental de Barros *et al.* (2007) englobou quatro séries de vigas de betão armado, que foram testadas até à rotura por intermédio de ensaios à flexão em quatro pontos de carga. Cada uma das séries continha duas vigas: uma de referência, sem qualquer reforço, e outra reforçada à flexão com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM. A secção transversal dos laminados era de $1.45 \times 9.60 \text{ mm}^2$ e a quantidade de laminados foi definida tendo como objetivo duplicar a capacidade de carga máxima da viga de referência.

A Figura 2.22 apresenta as características das séries de vigas testadas (séries S1, S2, S3 e S4). A viga reforçada da série S1 continha um laminado de CFRP, enquanto que as vigas reforçadas das séries S2 e S3, diferenciadas pela percentagem de armadura longitudinal na face tracionada, foram dotadas com dois laminados de CFRP. A viga reforçada da série S4 continha três laminados de CFRP.

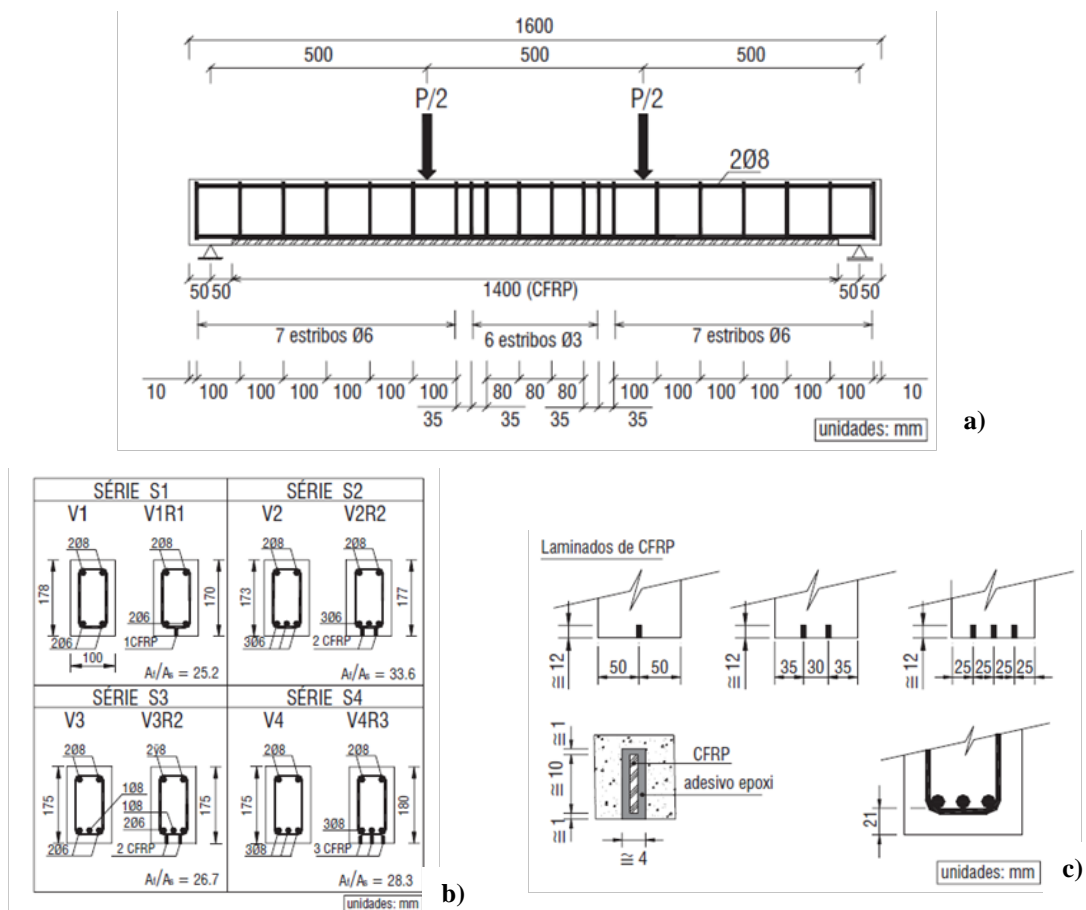


Figura 2.22 - Séries de vigas testadas: a) tipo de carregamento e distribuição das armaduras; b) secções transversais; c) pormenor do reforço de CFRP (Barros *et al.*, 2007).

A Tabela 2.6 apresenta, para as quatro séries de vigas ensaiadas, o valor das percentagens de armadura longitudinal (ρ_{sl}) e de reforço de CFRP (ρ_f), assim como, o valor médio da resistência à compressão do betão (f_{cm}) das vigas à data do ensaio das mesmas.

Tabela 2.6 - Caracterização das séries de vigas testadas por Barros *et al.* (2007).

| Série | Solução de reforço de CFRP | ρ_{sl}^* (%) | ρ_f^{**} (%) | f_{cm} (MPa) |
|-------|----------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| S1 | 1 laminado | 0.387 | 0.082 | 46.1 |
| S2 | 2 laminados | 0.554 | 0.157 | |
| S3 | 2 laminados | 0.712 | 0.159 | |
| S4 | 3 laminados | 0.972 | 0.232 | |

* Percentagem de armadura longitudinal de tração - $\rho_{sl} = A_{sl}/(b_w \times d)$; ** Percentagem de reforço - $\rho_f = A_f/A_c$.

Na Figura 2.23 apresentam-se as curvas força vs deslocamento a meio vão das vigas ensaiadas. Nas vigas reforçadas à flexão com CFRP é possível identificar quatro estados de comportamento: a fase de betão não fendilhado (até ao início de fendilhação do betão), a fase de betão fendilhado com aço não plastificado (entre o início da fendilhação do betão e a cedência das armaduras longitudinais), a fase de betão fendilhado, após a cedência das armaduras do aço e a fase em que ocorre o deslizamento do laminado de CFRP.

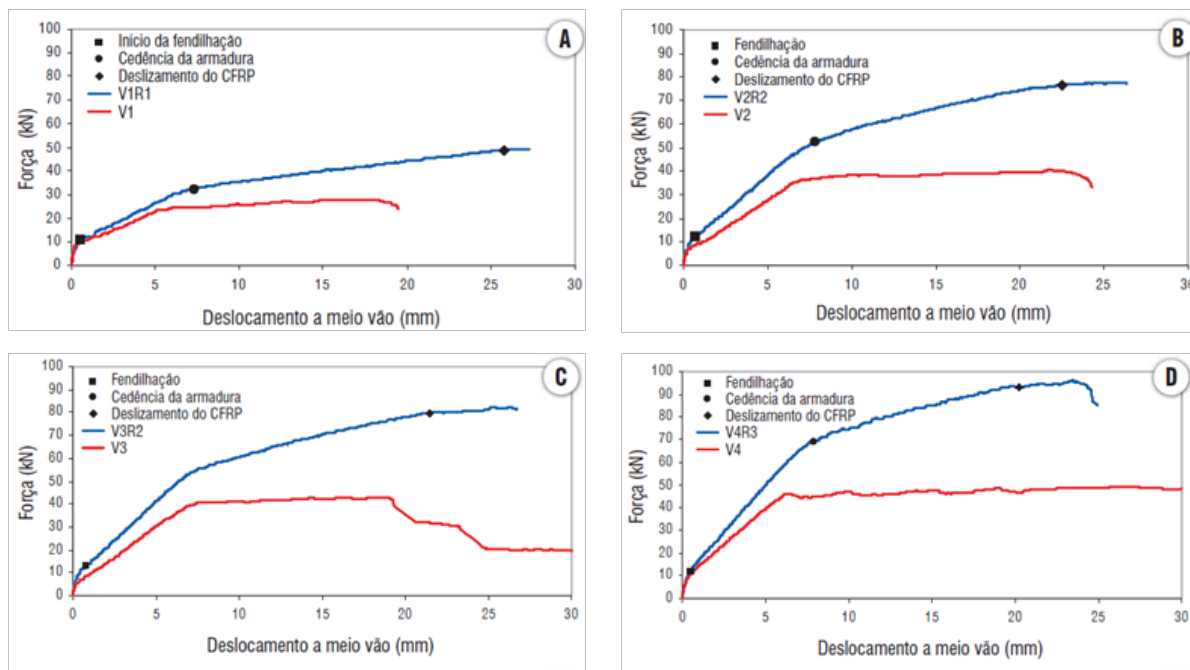


Figura 2.23 - Diagramas força vs deslocamento a meio vão das vigas das séries S1(A), S2(B), S3(C) e S4(D) (Barros *et al.*, 2007).

A Tabela 2.7 apresenta os resultados mais significativos obtidos no programa experimental de Barros *et al.* (2007). O objetivo de duplicar a carga última (F_{max}) das correspondentes vigas

de referência foi praticamente alcançado, verificando-se aumentos no valor de F_{max} que variaram entre 78% e os 98%. Relativamente à carga correspondente ao início da cedência das armaduras de aço (F_{sy}) foram registados aumentos entre os 32 % e os 47%. O aumento na carga de início da fendilhação, F_{cr} , foi bastante significativo. Para a carga de serviço F_{serv} (carga definida pelos autores como sendo a correspondente a uma flecha a meio vão de $l/400 = 3.75$ mm, em que l é o vão da viga), registaram-se aumentos, que variaram entre os 22% e os 45%. Os valores máximos de extensão no compósito ($\epsilon_{f,max}$) variaram entre 1.06% e 1.55%, correspondendo, respetivamente, a 62 % e 91 % da extensão última do CFRP ($\epsilon_{f,última} = 1.7\%$).

Tabela 2.7 - Desempenho do reforço de CFRP nas quatro séries de vigas testadas (Barros *et al.*, 2007).

| Série | $\frac{F_{cr}(VR)}{F_{cr}(V)}$ | $\frac{F_{serv}(VR)}{F_{serv}(V)}$ | $\frac{F_{sy}(VR)}{F_{sy}(V)}$ | $\frac{F_{max}(VR)}{F_{max}(V)}$ | $\epsilon_{f,max}$ (%) |
|-------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| S1 | 1.26 | 1.22 | 1.32 | 1.78 | 1.55 |
| S2 | 1.52 | 1.45 | 1.39 | 1.91 | 1.28 |
| S3 | 1.51 | 1.38 | 1.36 | 1.98 | 1.28 |
| S4 | 1.74 | 1.25 | 1.47 | 1.96 | 1.06 |

VR - Viga Reforçada; V - Viga de referência.

2.5.2. Modos de rotura

O conhecimento dos modos de rotura de vigas de betão armado reforçadas à flexão com compósitos de CFRP é um ponto fulcral para a necessária definição de critérios de dimensionamento e de verificação da segurança.

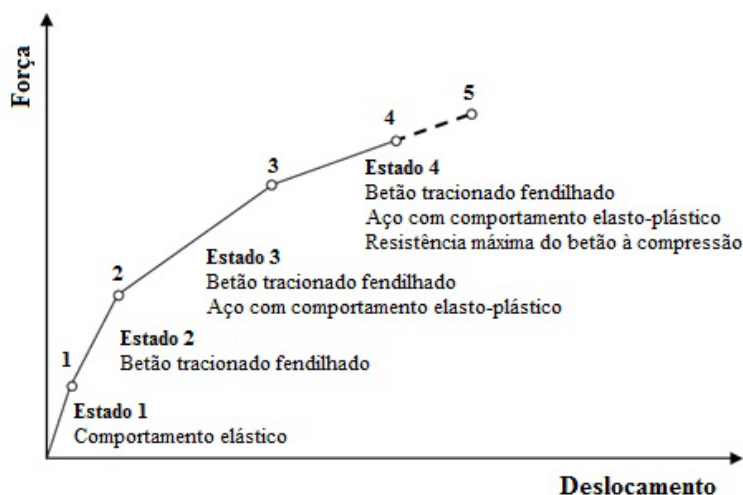


Figura 2.24 - Relação forças vs deslocamento de vigas reforçadas à flexão com CFRP: Ponto 1: início da fendilhação do betão; Ponto 2: cedência das armaduras; Ponto 3: resistência máxima do betão à compressão; Ponto 4: destacamento do CFRP; Ponto 5: rotura do CFRP (adaptado de Ross *et al.* (1999)).

A Figura 2.24 apresenta o digrama de comportamento força vs deslocamento de uma viga de betão armado reforçada à flexão com CFRP. De acordo com esta figura, a capacidade de carga do elemento pode variar bastante consoante o modo de rotura. Este pode ocorrer no “estado 2” (sem plastificação das armaduras), no “estado 3” ou no “estado 4”. O comportamento desejável, para um sistema de reforço à flexão com CFRP, é aquele que tira o máximo partido da resistência de todos os materiais, traduzindo-se pela cedência das armaduras ordinárias acompanhado pelo esmagamento de betão comprimido, enquanto o CFRP se mantém intacto. Contudo, nem sempre é possível verificar este modo de rotura, pelo que é necessário analisar todos os casos possíveis (Azevedo, 2008).

As vigas reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos podem apresentar vários modos de rotura. Desde logo, os modos de rotura prematuros associados ao destacamento do reforço (Figura 2.25a). Outro tipo de rotura, ilustrado na Figura 2.25b, é o esgotamento da capacidade resistente à tração do CFRP (rotura do CFRP), devido às taxas de armadura e à quantidade de reforço serem significativamente reduzidas, levando à plastificação da armadura. Contrariamente, se a percentagem de armadura e a quantidade de reforço forem elevados, a rotura poderá ocorrer por esmagamento do betão (Figura 2.25c), sendo que o aço poderá, ou não, plastificar, em função da percentagem de armadura.

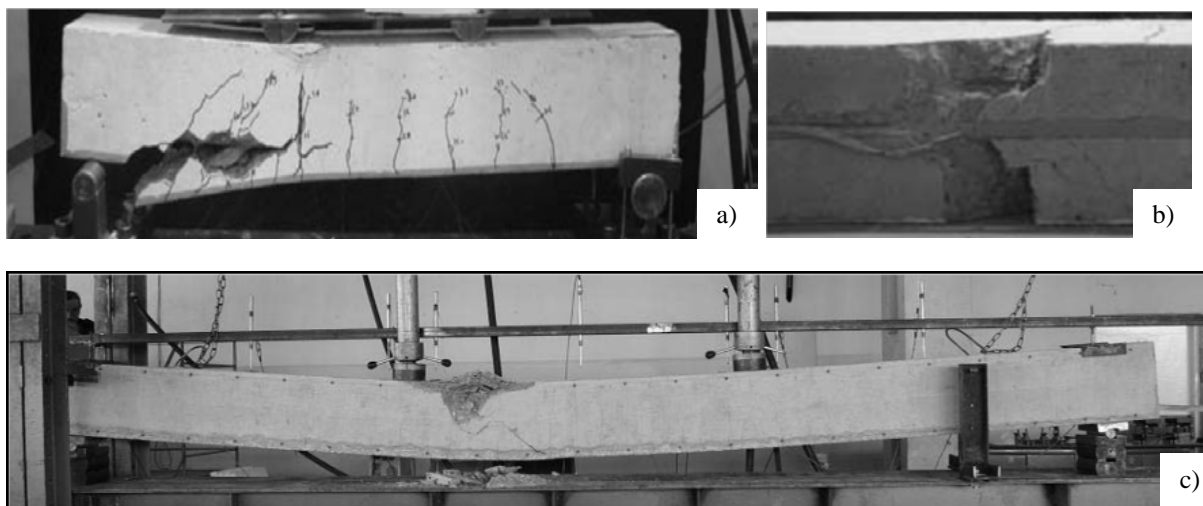


Figura 2.25 - Modos de rotura em vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos: a) destacamento do reforço (Fortes e Barros, 2002); b) rotura do CFRP (Fortes e Barros, 2002); c) esmagamento do betão (Kotynia, 2007).

Além do estudo anteriormente referido, existem outros que foram realizados no contexto da aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado (Kotynia (2007); Barros e Kotynia (2008)). Tendo como base os trabalhos experimentais já realizados é possível concluir que a eficácia da técnica de reforço em análise

é influenciada pelos seguintes parâmetros: percentagem de armadura longitudinal, percentagem de CFRP, classe de resistência do betão, tipo de carregamento, espaçamento entre laminados adjacentes e distância do laminado à face do elemento a reforçar (Azevedo, 2011).

Barros e Costa (2009) estudaram a influência do corte do braço inferior dos estribos na eficácia da técnica de reforço aplicada. Nesse âmbito, efetuaram ensaios em vigas de betão armado, reforçadas à flexão, com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento, com a particularidade de, em algumas das vigas, ter sido cortado o braço inferior dos estribos, por forma a que fosse possível inserir o reforço de CFRP (espessura do betão de recobrimento inferior à altura do laminado). Apesar de ser uma situação que se deve evitar (danificação das armaduras existentes), este cenário pode ocorrer e é importante saber qual a sua consequência.

O programa experimental contemplou três séries de vigas, com alturas distintas (tendo sido assumido, pelos autores deste estudo, que quanto maior for a altura da secção transversal, menor será a influência do corte do braço dos estribos de aço) e cada uma destas séries continha quatro vigas: a viga de referência VRi; a viga VEi, semelhante à viga VRi, mas onde se executou o corte do braço inferior dos estribos; a viga VLi, semelhante à viga VEi, e reforçada à flexão com laminados de CFRP; a viga VLMi, semelhante à viga VLi e reforçada ao corte com faixas discretas de manta de CFRP.

As vigas de betão armado foram ensaiadas à flexão, em três pontos de carga, com comprimento, secção transversal e percentagem de armadura variáveis, tal como está registado na Tabela 2.8 (ver também a Figura 2.26).

As armaduras utilizadas tinham uma tensão de cedência compreendida entre 546 MPa e 597 MPa e uma resistência última à tração entre 648 MPa e 738 MPa. O betão das vigas, aos 28 dias de idade, continha um valor médio da resistência à compressão (f_{cm}) de 31.1 MPa e um módulo de elasticidade de 28.9 GPa.

Tabela 2.8 - Dimensões, armaduras e percentagem de reforço de CFRP das vigas ensaiadas por Barros e Costa (2009).

| Série | L_1 (mm) | L_2 (mm) | b (mm) | h (mm) | A_s^+ (face tracionada) | A_s^- (face comprimida) | ρ_{sl}^* (%) | ρ_f^{**} (%) |
|-------|---------------|---------------|-------------|-------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 550 | 950 | 200 | 250 | 2 ϕ 10 + 1 ϕ 6 | 2 ϕ 10 | 0.423 | 0.112 |
| 2 | 750 | 1150 | 200 | 320 | 2 ϕ 10 + 1 ϕ 10 | 2 ϕ 10 | 0.408 | 0.088 |
| 3 | 900 | 1300 | 200 | 380 | 2 ϕ 12 + 1 ϕ 8 | 2 ϕ 12 | 0.397 | 0.074 |

* Percentagem de armadura longitudinal de tração - $\rho_{sl} = A_{sl}/(b_w \times d)$; ** Percentagem de reforço - $\rho_f = A_f/A_c$.

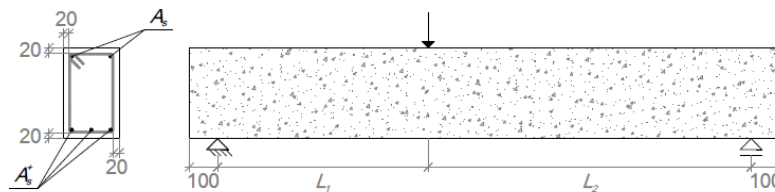


Figura 2.26 - Geometria e condições de carregamento das vigas ensaiadas por Barros e Costa (2009) (dimensões em milímetros).

Em cada uma das séries de vigas testadas, o número de laminados de CFRP adotados para reforço à flexão, usando a técnica NSM, foi escolhido de forma a que a viga reforçada tivesse o dobro da capacidade de carga máxima da respetiva viga de referência sem CFRP. O sistema de reforço ao corte adotado (mantas de CFRP) foi aplicado usando a técnica EBR. As vigas tipo VLi e VLMi de cada série foram reforçadas à flexão com dois laminados S&P CFK 150/200. Estes laminados caracterizavam-se por terem uma secção de 1.4 mm×20 mm e, de acordo com o fabricante, um módulo de elasticidade de 165 GPa e uma resistência à tração última de 1850 MPa. Além disso, a armadura das vigas que foram reforçadas à flexão (vigas tipo VLi) foi dimensionada de forma a verificar-se, nas mesmas, uma rotura por corte. Tal como foi referido anteriormente, as vigas tipo VLMi foram reforçadas ao corte, no menor dos seus vãos, usando faixas discretas de manta de CFRP, com a designação de S&P C-Sheet 240 (200 g/m²). As faixas de manta foram aplicadas em forma de U e tinham uma largura de 50 milímetros (w_f). De acordo com o fabricante, as mantas de CFRP caracterizavam-se por ter um módulo de elasticidade de 240 GPa e uma resistência à tração última de 3800 MPa. As soluções de reforço testadas estão apresentadas na Tabela 2.9 e as configurações de reforço à flexão e ao corte são representados na Figura 2.27.

Tabela 2.9 - Soluções de reforço testadas por Barros e Costa (2009).

| Viga | Reforço à flexão | Reforço ao corte | Corte do braço inferior do estribo |
|------|-----------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| VRi | — | — | Não |
| VEi | — | — | Sim |
| VLi | 2 laminados S&P CFK 150/200 | — | Sim |
| VLMi | 2 laminados S&P CFK 150/200 | Manta S&P C-Sheet 240 | Sim |

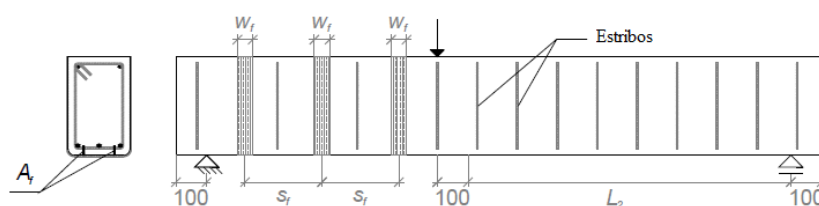


Figura 2.27 - Configurações de reforço à flexão e ao corte adotadas por Barros e Costa (2009) (dimensões em milímetros).

As vigas foram ensaiadas até à rotura, por intermédio de um carregamento monotónico, com controlo de deslocamentos a uma velocidade de deformação de 2 $\mu\text{m/s}$. Para cada uma das séries, na Tabela 2.10 apresenta-se o valor da força máxima (F_{max}) obtida em cada viga e a razão entre a força máxima de cada viga reforçada e a força máxima da respetiva viga de referência.

Tabela 2.10 - Incremento da capacidade de carga nas diferentes séries de vigas.

| Série 1 | | | Série 2 | | | Série 3 | | |
|---------|-------------------|---------------------------|---------|-------------------|---------------------------|---------|-------------------|---------------------------|
| Viga | F_{max} (kN) | $\frac{F_{max}}{F_{VR1}}$ | Viga | F_{max} (kN) | $\frac{F_{max}}{F_{VR2}}$ | Viga | F_{max} (kN) | $\frac{F_{max}}{F_{VR3}}$ |
| VR1 | 67.00 | 1.00 | VR2 | 88.00 | 1.00 | VR3 | 116.03 | 1.00 |
| VE1 | 69.00 | 1.02 | VE2 | 89.00 | 1.00 | VE3 | 103.26 | 0.89 |
| VL1 | 96.00 | 1.43 | VL2 | 137.00 | 1.55 | VL3 | 148.28 | 1.28 |
| VLM1 | 121.00 | 1.80 | VLM2 | 156.00 | 1.77 | VLM3 | 157.96 | 1.36 |

Analisados os resultados da Tabela 2.10, verifica-se que, as vigas VE1 e VE2, às quais foi aplicado um corte no braço inferior dos estribos, tiveram um desempenho similar, no que se refere à capacidade de carga máxima, relativamente às vigas de referência VR1 e VR2, respetivamente. Estes resultados, demonstraram que o corte do braço inferior dos estribos, não influenciou a capacidade de carga das vigas ensaiadas. O mesmo não ocorreu na série 3, em que a viga VE3 apresentou uma diminuição da capacidade de carga, em 11%, comparativamente com a viga VR3. Esta diferença pode não estar, totalmente, relacionada com o corte do braço inferior dos estribos. Este facto, pode ser justificado com uma pequena imprecisão no posicionamento das armaduras longitudinais de tração, ou com alguma heterogeneidade das propriedades dos varões de aço, ou da qualidade de betão. Nas vigas reforçadas, as quais sofreram igualmente corte nos braços inferiores dos estribos, observou-se uma relação direta, entre o aumento do reforço das vigas e o aumento da capacidade de carga. Nas vigas VL_i, reforçadas à flexão, em relação às respetivas vigas de referência, obtiveram-se aumentos de capacidade de carga de 43%, 55% e 28%, respetivamente, nas séries 1, 2 e 3. As vigas reforçadas à flexão e ao corte (vigas VLM_i), apresentaram os maiores acréscimos de capacidade de carga, que se registaram nas séries 1 e 2, com valores superiores em 80% e 77%, relativamente às respetivas vigas de referência, enquanto que na série 3, com vigas de maior secção transversal, se registou um incremento de 36% em relação à viga VR3.

Independentemente das séries de vigas testadas (S1, S2 e S3), as vigas VR_i e VE_i registaram rotura por flexão e nas vigas VL_i a rotura ocorreu por corte. As vigas VLM1 e VLM3 também apresentaram rotura por corte, enquanto que na viga VLM2 verificou-se a rotura prematura do

CFRP no tramo *L2* - vão da viga que não foi reforçado ao corte (Figura 2.28). O objetivo de duplicar a capacidade de carga da viga de referência, não foi atingido. Estes modos de rotura, não permitiram a duplicação da capacidade de carga das vigas de referência, o que indica ser necessário aperfeiçoar, a conceção da execução dos laminados de FRP, para melhorar a sua capacidade de resistência ao corte.

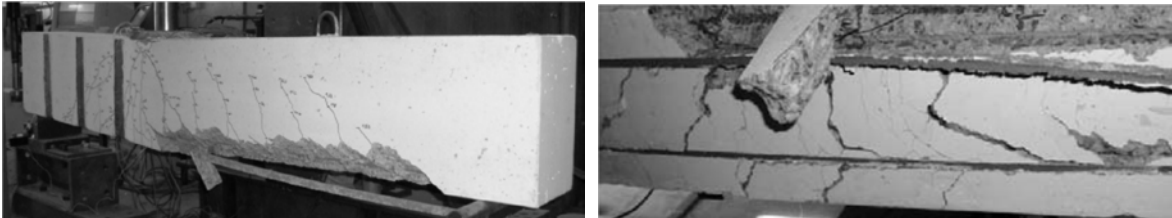


Figura 2.28 - Modo de rotura da viga VLM2: destacamento do laminado de CFRP no tramo *L2* (Barros e Costa, 2009).

Os autores concluíram que, para vigas sujeitas a uma carga monotónica crescente, com uma percentagem de armadura de corte (estribos), superior à mínima e que apresentam rotura por flexão, o facto de se ter cortado o braço inferior dos estribos, induziu uma perda de capacidade de carga máxima inferior a 10% (comparativamente com as vigas VRi). Nas vigas de betão armado, com uma taxa de armadura longitudinal superior a 0.4%, foi possível garantir um aumento da capacidade de carga máxima superior a 50%, mesmo em vigas com o braço inferior dos estribos cortado. É, no entanto, necessário evitar a rotura por corte e o descolamento do reforço de CFRP. Estes dois tipos de modo de rotura podem ser evitados, aplicando faixas de manta de CFRP em configuração de U, de acordo com a técnica EBR.

2.6. REFORÇO À FLEXÃO COM COMPÓSITOS DE CFRP DE ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO PRÉ-FENDILHADO

Muitas das estruturas de betão que necessitam de ser reforçadas apresentam betão em estado fendilhado. Desta forma, torna-se importante estudar o efeito, da existência de fendas no betão antes da execução do reforço, no desempenho do CFRP e no comportamento da estrutura reforçada com CFRP. Neste contexto, já foi feita alguma investigação experimental, em que a técnica de reforço com CFRP utilizada foi a da colagem externa (Dias *et al.* (2004)).

Dias *et al.* (2004) estudaram, o efeito da pré-fendilhação do betão, no comportamento de faixas de laje de betão armado reforçadas à flexão com sistemas compósitos de CFRP. No total foram ensaiadas, à flexão em quatro pontos de carga, dez faixas de laje de betão armado:

duas que não continham reforço de CFRP (faixas de laje de referência - série MIN) e oito reforçadas à flexão com sistemas compósitos de CFRP. Destas últimas, quatro foram reforçadas com o sistema curado “in situ” (manta flexível do tipo Replark 20 - faixas de laje da série M) e as restantes quatro foram reforçadas com o sistema pré-fabricado (laminado semí-rígido do tipo SikaDur S512 - faixas de laje da série L). Em cada uma das séries de modelos reforçados com CFRP (M e L), duas das faixas de laje foram solicitadas, previamente à aplicação do reforço, até atingirem um estado de fendilhação estabilizada. A Figura 2.29 apresenta o reforço de uma faixa de laje com manta de CFRP (Figura 2.29a) e uma faixa de laje reforçada com laminados de CFRP (Figura 2.29b). Em ambos os casos é possível verificar que o reforço foi aplicado com o betão fendilhado (após o ensaio de pré-fendilhação).

As faixas de laje testadas tinham 45 cm de largura, 8 cm de espessura e 180 cm de comprimento. Para a armadura longitudinal de tração, foram utilizados 3 varões de 6 mm ($3\phi 6$) e para a armadura longitudinal de compressão, foram colocados 3 varões de 3 mm ($3\phi 3$). A geometria do reforço de CFRP das faixas de laje das séries M e L foi determinada de forma a que, os modelos destas séries, tivessem o dobro da capacidade máxima resistente dos modelos da série MIN. Assim, no caso do reforço com manta de CFRP (modelos da série M), foram adotadas duas faixas, constituídas por sobreposição de duas camadas (uma com largura de 75 mm e outra com largura de 65 mm). No caso do reforço com laminados de CFRP (modelos da série L), adotaram-se duas tiras, cada uma com 16 mm de largura. A Figura 2.30 apresenta a geometria de cada uma das séries de faixas de laje envolvidas no trabalho experimental realizado por Dias *et al.* (2004), cujas informações gerais se encontram registadas na Tabela 2.11.

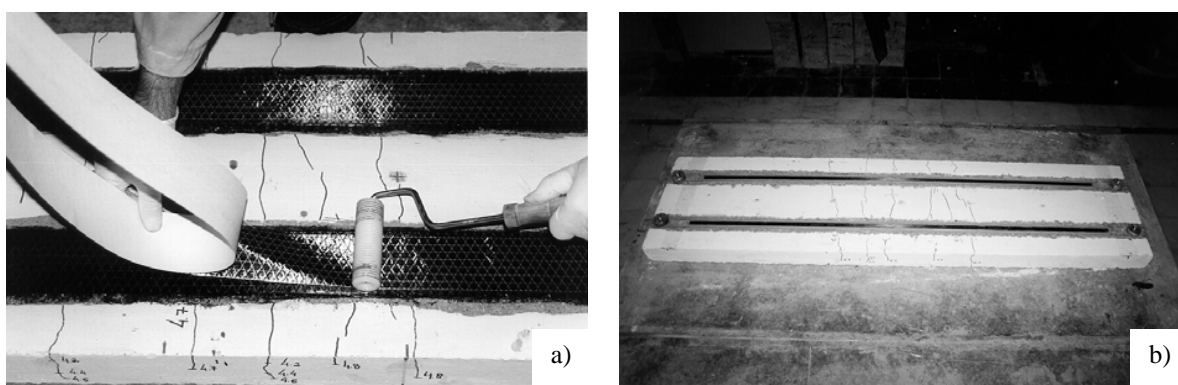


Figura 2.29 - Reforço de faixas de laje pré-fendilhadas com o sistema de CFRP: a) curado “in situ” (manta); b) pré-fabricado (laminado) (Dias *et al.*, 2004)).

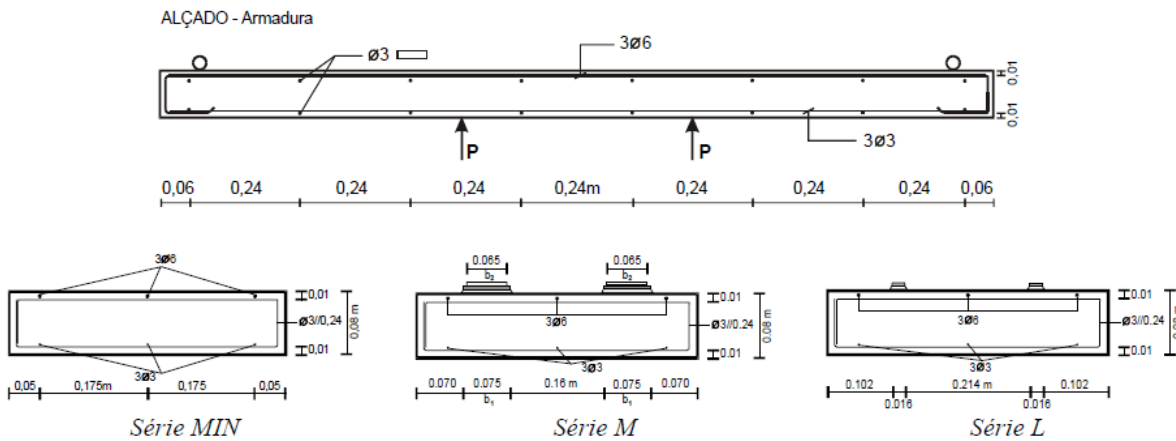


Figura 2.30 - Geometria das faixas de laje ensaiadas por Dias *et al.* (2004).

Tabela 2.11 - Informações gerais sobre os modelos ensaiados por Dias *et al.* (2004).

| Faixas de laje | | Armadura longitudinal | | Betão ** | Pré-fendilhada | Solução de reforço de CFRP | | |
|-----------------|---------|-----------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------------------|---|--------------------|
| Série | Modelos | Quantidade | ρ_{sl}^* (%) | f_{cm} (MPa) | | Material | Quantidade | ρ_f^{***} (%) |
| MIN | LA1M | 3φ6 | 0.258 | 59.5 | Não | — | — | — |
| | LA2M | | | 59.5 | | | | |
| M (manta) | LA3R | 3φ6 | 0.258 | 60.2 | Sim | Replark 20 | 2 faixas de duas camadas de manta de CFRP. Largura das faixas de manta: 75 mm e 65 mm | 0.09 |
| | LB1R | | | 61.6 | | | | |
| | LC3R | | | 65.8 | Não | | | |
| | LC4R | | | 65.5 | | | | |
| L (laminado) | LA4S | 3φ6 | 0.258 | 60.3 | Sim | CarboDur S512 | 2 tiras de laminado, cada uma com 16 mm | 0.11 |
| | LB2S | | | 61.8 | | | | |
| | LC1S | | | 65.6 | Não | | | |
| | LC2S | | | 65.7 | | | | |

* Percentagem de armadura longitudinal de tração - $\rho_{sl} = A_{sl}/(b_w \times d)$; ** À data do ensaio das faixas de laje; *** Percentagem de reforço - $\rho_f = A_f/A_c$.

A manta Replark 20 caracterizava-se por ter um módulo de elasticidade de 230 GPa, uma extensão de rotura de 15% e uma espessura de 0.111 mm. No que respeita ao laminado CarboDur S512, as suas propriedades em termos de módulo de elasticidade, extensão de rotura e espessura eram de 160 GPa, 20% e 1.2 mm, respetivamente.

Dias *et al.* (2004) efetuaram dois tipos de ensaios à flexão em quatro pontos. O primeiro (tipo I) que correspondeu ao carregamento das faixas de laje LA3R, LB1R, LA4S e LB2S, antes da

aplicação do reforço, até atingirem um determinado padrão de fendilhação. Neste ensaio as referidas faixas de laje foram solicitadas até uma carga que provoca-se a meio vão um deslocamento compreendido entre 6.0 a 6.5 mm. Este carregamento provocou o aparecimento de fendas, na zona central das faixas de laje, ou seja, fendas de flexão pura, registando-se um afastamento médio, entre fendas, de 11.7 cm. O segundo tipo de ensaio (tipo II) correspondeu ao carregamento de todas as faixas de laje até à rotura. De forma a facilitar a observação do desenvolvimento da fendilhação e dos modos de ruína do compósito de CFRP, os autores deste trabalho optaram por solicitar as faixas de laje no sentido ascendente (Figura 2.30).

Na Figura 2.31 apresentam-se as curvas médias carga total vs deslocamento central, obtidas nos ensaios realizados por Dias *et al.* (2004). A análise desta figura permite constatar o seguinte: i) comparando as séries MIN, M e L verifica-se que nos modelos reforçados, sem pré-fendilhação do betão, o reforço permitiu aumentar a capacidade resistente última, bem como, a carga de início de fendilhação e proporcionou um ganho significativo, em termos de rigidez e de flecha na rotura; ii) a principal diferença entre as faixas de laje reforçadas, com e sem pré-fendilhação, é a existência da perda de rigidez inicial, nos modelos pré-fendilhados, até ao nível de carga de pré-fendilhação; iii) após este patamar de carga, as curvas dos modelos pré-fendilhados vão, progressivamente, para níveis próximos dos verificados, nas curvas dos modelos não pré-fendilhados.

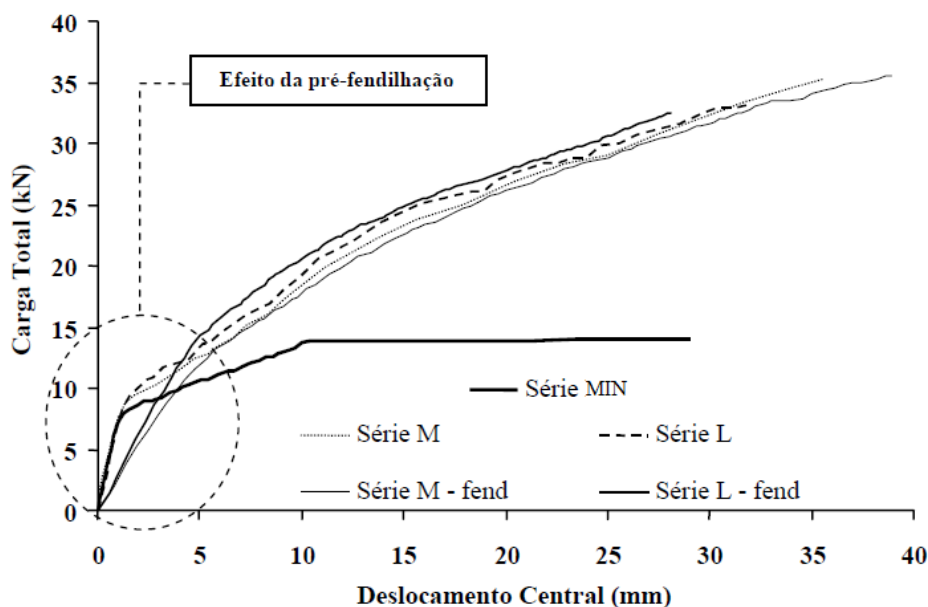


Figura 2.31 - Curvas médias carga total vs deslocamento central das séries de modelos ensaiadas até à rotura (Dias *et al.*, 2004).

Em termos de modos de rotura, e independentemente de ter sido aplicada uma pré-fendilhação no betão ou não, nos modelos reforçados com o sistema pré-fabricado (laminado) ocorreu o

destacamento precoce do CFRP, enquanto nos modelos reforçados com o sistema curado “in situ” (manta) ocorreu a rotura do CFRP. O esgotamento da capacidade resistente à tração da armadura de aço foi o modo de rotura observado nos modelos da série MIN.

A Tabela 2.12 apresenta, em termos médios, os valores da carga máxima (F_{max}) e da flecha máxima (δ_{max}), das séries de lajes ensaiadas. Nesta tabela também se apresentam os valores da relação entre carga máxima das lajes reforçadas e a carga máxima das lajes da série MIN ($F_{max}/F_{max,MIN}$), bem como, os seus valores médios máximos no CFRP (ϵ_{max}^{CFRP}).

Tabela 2.12 - Comparação do comportamento último e desempenho do CFRP (valores médios) (Dias *et al.*, 2004).

| Séries | F_{max} (kN) | $F_{max}/F_{max,MIN}$ | δ_{max} (mm) | ϵ_{max}^{CFRP} (%) |
|-----------|-------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------|
| MIN | 14.2 | 1.00 | 29.7 | — |
| M | 34.5 | 2.43 | 35.8 | 10.23 |
| M - fend. | 35.5 | 2.50 | 37.8 | 11.57 |
| L | 33.4 | 2.35 | 31.3 | 10.82 |
| L - fend. | 32.0 | 2.25 | 27.2 | 9.43 |

Em termos médios e relativamente aos modelos da série MIN, os modelos reforçados com CFRP apresentaram uma carga máxima (F_{max}) 2.38 vezes superior e uma flecha máxima (δ_{max}) 1.11 vezes superior. Independentemente do tipo de sistema de CFRP usado (manta ou laminado), a existência de pré-fendilhação do betão não levou a variações significativas na eficácia do reforço.

Em relação ao nível de aproveitamento do compósito, nos modelos reforçados com a manta de CFRP, a ocorrência da rotura do compósito, levou a um nível médio de rendimento elevado (superior a 74 %), quando comparado com o verificado para os modelos reforçados com laminados de CFRP, onde, se verificou um baixo rendimento do compósito (apenas 52%), devido ao destacamento precoce do mesmo.

De um modo geral, os autores concluíram que a carga de início de fendilhação apresentou valores mais elevados nos modelos reforçados sem pré-fendilhação, do que nos modelos não reforçados. O espaçamento médio final, entre fendas, foi semelhante para os elementos reforçados, com e sem pré-fendilhação, e muito inferior ao verificado nos modelos da série MIN e os níveis de desempenho dos reforços foram idênticos, independentemente, do betão estar ou não pré-fendilhado.

Capítulo 3

Programa Experimental

Neste capítulo é apresentado o programa experimental realizado no âmbito da presente dissertação sobre a influência da pré-fendilhação do betão, no reforço à flexão de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos. Serão apresentados os modelos ensaiados, as características dos materiais utilizados, o tipo de ensaios realizados, assim como, será feita uma descrição sobre a execução do reforço de CFRP. Posteriormente, serão apresentados e analisados os resultados obtidos.

No programa experimental foram ensaiadas à flexão, em quatro pontos de carga, cinco vigas de betão armado. Numa primeira fase, as cinco vigas anteriormente referidas foram pré-fendilhadas e, posteriormente, reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento. Uma foi reforçada com um laminado, duas foram reforçadas com dois laminados e as restantes duas foram reforçadas com três laminados. Para as soluções de reforço com dois e três laminados foram analisados dois níveis de dano (pré-fendilhação). Após o reforço das vigas, estas foram levadas à rotura. Por forma a atingir os objetivos estabelecidos para a presente dissertação, os resultados obtidos no presente programa experimental serão comparados com os que obteve Azevedo (2011). Com efeito, no âmbito do trabalho de Azevedo (2011) foram testadas vigas semelhantes às testadas no âmbito do presente programa experimental, com a diferença de não existir pré-fendilhação das vigas antes da execução do reforço.

3.1. CONCEÇÃO DOS MODELOS

No presente programa experimental foram testadas cinco vigas de betão armado de secção transversal retangular ($150 \times 300 \text{ mm}^2$) com 2600 mm de comprimento, sendo 2400 mm a distância entre apoios. As vigas continham dois varões de aço nervurado, com 8 mm de diâmetro ($2\phi 8$), para a armadura longitudinal de compressão e dois varões de aço nervurado, com 10 mm de diâmetro ($2\phi 10$), para a armadura longitudinal de tração. De forma a evitar a

rotura por corte, foram colocados em todas as vigas, tal como está representado na Figura 3.1, estribos de aço verticais (2 ramos) com varões de aço nervurado de 6 mm de diâmetro espaçados de 75 mm ($\phi 6/75$).

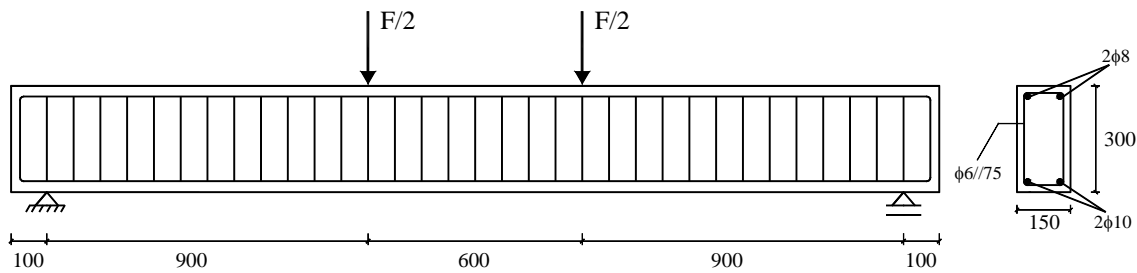


Figura 3.1 - Geometria dos modelos a ensaiar (medidas em mm).

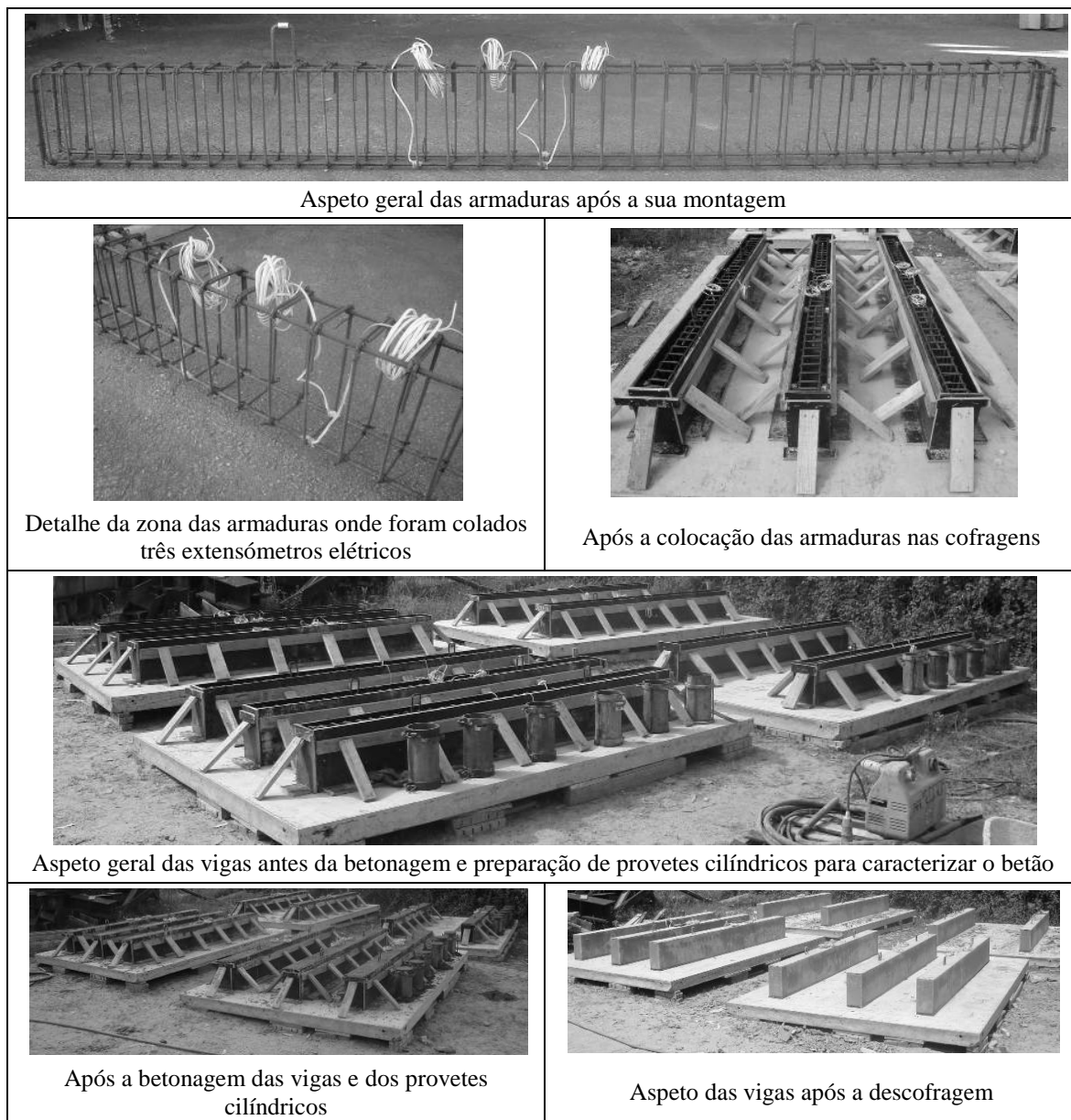


Figura 3.2 - Execução das vigas de betão armado.

Estas vigas fazem parte de uma investigação que está a ser desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, que visa fundamentalmente avaliar o efeito da percentagem de CFRP, o efeito do carregamento cíclico e o efeito da pré-fendilhação do betão no comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos. Na Figura 3.2 apresentam-se detalhes da execução das vigas de betão armado.

A percentagem de armadura longitudinal de tração (ρ_{sl}) das vigas, obtida por intermédio da expressão 3.1, era de 0.39%.

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w \times d} \times 100 \quad (3.1)$$

Na expressão 3.1, A_{sl} é a área de aço correspondente às armaduras longitudinais de tração ($2\phi 10$), b_w é a largura da secção transversal da viga e d é a distância a partir da fibra de betão mais comprimida ao baricentro dos varões de aço da armadura longitudinal de tração. Tendo em conta que o betão de recobrimento tinha uma espessura de 20 mm, que os estribos de aço tinham um diâmetro de 6 mm e que os varões da armadura longitudinal de tração tinham um diâmetro de 10 mm, o valor de d era de 269 mm.

Das cinco vigas de betão armado usadas no presente programa experimental, uma foi reforçada com um laminado de CFRP (viga S1-PC1), duas foram reforçadas com dois laminados (vigas S2-PC1 e S2-PC2) e as restantes duas foram reforçadas com três laminados (vigas S3-PC1 e S3-PC3), de acordo com o representado na Figura 3.3. As siglas S1, S2 e S3, referem-se ao facto da viga de betão armado ser reforçada com um, dois e três laminados, respetivamente. As siglas PC1, PC2 e PC3 referem-se ao facto das vigas terem sido pré-fendilhadas, antes da execução do reforço, com o nível de dano (pré-fendilhação) 1, 2 e 3, respetivamente. O nível de dano foi caracterizado pela carga máxima imposta no ensaio de pré-fendilhação (Tabela 3.1). Os laminados usados tinham uma secção transversal de $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ e um comprimento de 2300 mm, sendo que as suas extremidades distavam 50 mm dos apoios (Figura 3.3).

As vigas com um (S1-PC1), dois (S2-PC1 e S2-PC2) e três (S3-PC1 e S3-PC3) laminados de CFRP continham percentagens de reforço de CFRP (ρ_f) de 0.03%, 0.06% e 0.09%, respetivamente. Estas percentagens foram calculadas de acordo com a expressão 3.2:

$$\rho_f = \frac{A_f}{A_c} \times 100 \quad (3.2)$$

Em que, A_f é a área de reforço de CFRP e A_c é a área da secção transversal das vigas.

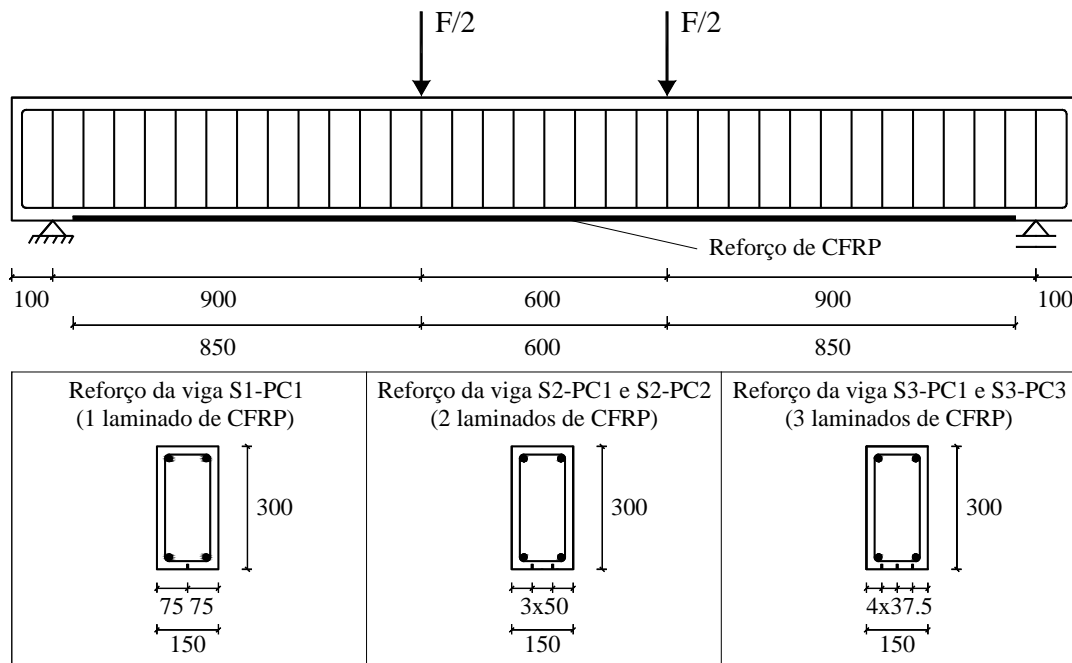


Figura 3.3 - Soluções de reforço de CFRP adotadas (medidas em mm).

Tal como anteriormente referido, as cinco vigas foram pré-fendilhadas previamente à aplicação do reforço de CFRP. Para tal, as vigas foram sujeitas a ensaios à flexão em quatro pontos de carga, com carregamento monotónico até um determinado valor de carga (Ensaio tipo I - Ensaio de pré-fendilhação). Por forma a avaliar o efeito do nível de dano na estrutura na eficácia da técnica em estudo, foram analisados três níveis de dano, caracterizados pela força máxima a impor no ensaio de pré-fendilhação. Para obtenção da força anteriormente referida foi considerada a curva de comportamento (Figura 3.4) de uma viga de betão armado sem reforço de CFRP (REF-M) semelhante às que serão utilizadas no presente programa experimental e que foi testada no âmbito do trabalho desenvolvido por Azevedo (2011).

Os valores da força máxima impostos no ensaio de pré-fendilhação das vigas estão associados a valores de flecha a meio vão compreendidos entre 50% e 80% do valor máximo permitido regulamentarmente (Eurocódigo 2, 2010) para estados limites de serviço ($L/250$, em que L é o vão livre da viga, de valor 2400 mm). De acordo com a Figura 3.4, os valores da força associada a uma flecha de 50% e 80% do valor da flecha correspondente a $L/250$, eram de 40 kN (força máxima do ensaio de pré-fendilhação das vigas S1-PC1, S2-PC1 e S3-PC1) e de 55 kN (força máxima do ensaio de pré-fendilhação da viga S3-PC3), respetivamente (Tabela 3.1). O valor da força máxima adotado para o ensaio de pré-fendilhação da viga S2-PC2 (47.5 kN) correspondia ao valor médio da força máxima aplicada nas restantes vigas (40 kN e 55 kN).

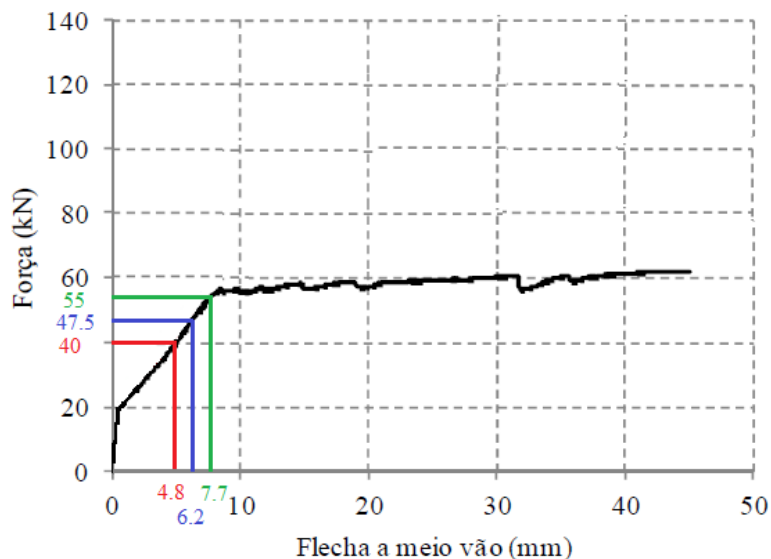


Figura 3.4 - Força vs Flecha a meio vão da viga de referência REF-M (Azevedo, 2011), com a identificação dos valores da força máxima a impor nos ensaios de pré-fendilhação.

A Tabela 3.1 apresenta as características gerais das vigas que foram ensaiadas no presente programa experimental, nomeadamente: a percentagem de armadura longitudinal de tração (ρ_{sl}); o valor médio da resistência à compressão do betão das vigas, à data dos ensaios das vigas (f_{cm}), obtido através de ensaios de compressão uniaxial em provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura; a solução de reforço de CFRP aplicada; a percentagem de reforço de CFRP (ρ_f) e o valor da força máxima a impor no ensaio de pré-fendilhação.

Tabela 3.1 - Características das vigas ensaiadas.

| Vigas | ρ_{sl} (%) | f_{cm} (MPa) | Quantidade de reforço | ρ_f (%) | Força máxima a impor no ensaio de pré-fendilhação (kN) |
|--------|--------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|---|
| S1-PC1 | | | 1 laminado | 0.03 | 40.0 |
| S2-PC1 | | | 2 laminados | 0.06 | 40.0 |
| S3-PC1 | 0.39 | 49.4 | 3 laminados | 0.09 | 40.0 |
| S2-PC2 | | | 2 laminados | 0.06 | 47.5 |
| S3-PC3 | | | 3 laminados | 0.09 | 55.0 |

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização do betão e das armaduras das vigas e do laminado de CFRP utilizado foi feita por intermédio da realização de ensaios experimentais.

3.2.1. Betão

A caracterização do betão à data do ensaio das vigas foi feita por intermédio da realização de ensaios de compressão uniaxial em três provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (Figura 3.5a), de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011). A Figura 3.5b ilustra a realização de um ensaio de compressão uniaxial e a Figura 3.5c apresenta os modos de rotura dos três provetes ensaiados. O resultado obtido para o valor médio da resistência à compressão do betão foi de 49.4 MPa ($f_{cm} = 49.4$ MPa).

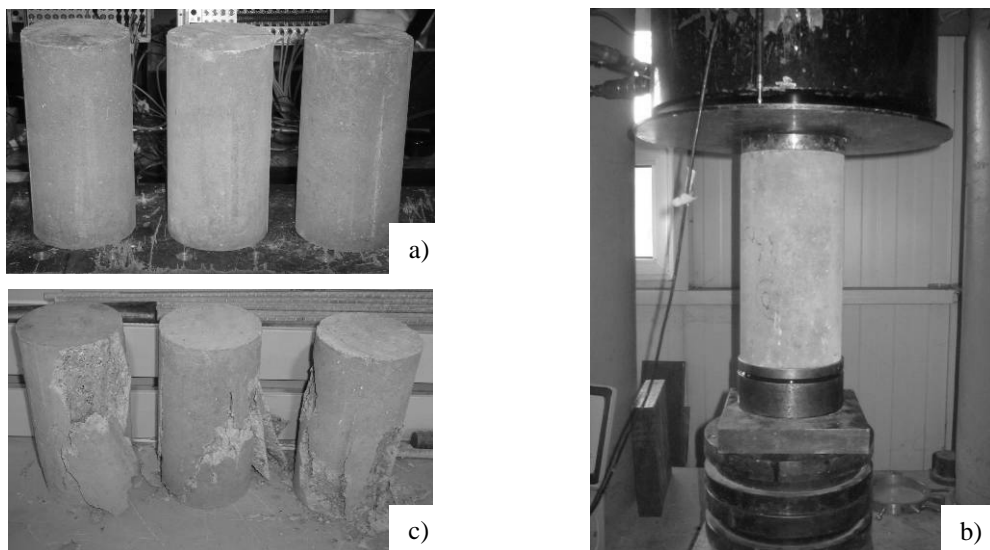


Figura 3.5 - Caracterização do betão: a) Provetes cilíndricos antes da realização do ensaio; b) Ensaio de compressão uniaxial; c) Modo de rotura dos provetes.

3.2.2. Aço

As vigas de betão armado continham três tipos de varões de aço nervurado: varões com 6, 8 e 10 mm de diâmetro, conforme está ilustrado na Figura 3.1. Para a caracterização do aço de cada tipo de varão, foram realizados ensaios de tração uniaxial de acordo com a norma EN 10002-1 (1990). Foram testados seis provetes de aço com 6 mm de diâmetro ($\phi 6$), quatro provetes de aço com 8 mm de diâmetro ($\phi 8$) e seis provetes de aço com 10 mm de diâmetro ($\phi 10$), todos eles com um comprimento de 500 mm. A Figura 3.6a ilustra a realização de um ensaio de tração uniaxial e a Figura 3.6b apresenta o modo de rotura de um dos provetes ensaiados. O valor médio da tensão de cedência e da tensão máxima dos aços testados estão registados na Tabela 3.2.

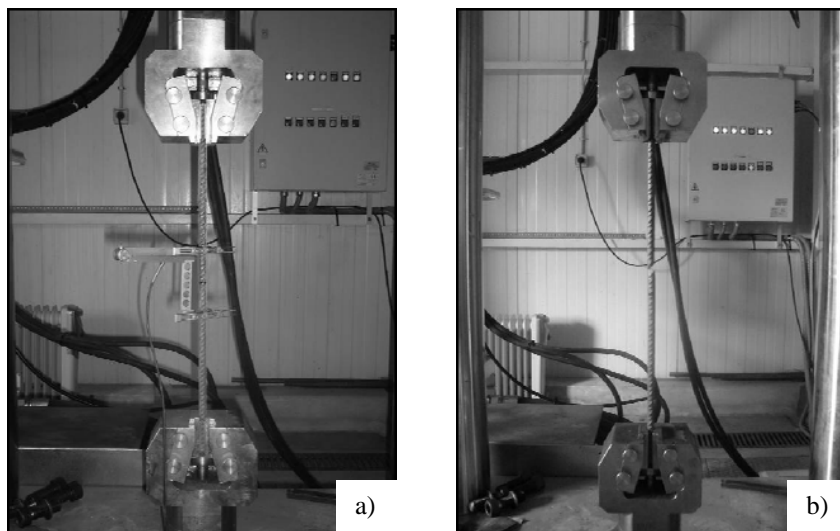


Figura 3.6 - Caracterização experimental do aço das armaduras das vigas: a) ensaio de tração uniaxial; b) modo de rotura (Azevedo, 2011).

Tabela 3.2 - Principais propriedades do aço das armaduras das vigas (Azevedo, 2011).

| Tensão (MPa) | φ6 | φ8 | φ10 |
|--------------|-------|-------|-------|
| Cedência | 564.1 | 534.5 | 566.7 |
| Máxima | 682.6 | 618.5 | 661.3 |

3.2.3. Laminado de CFRP

O laminado de CFRP utilizado no reforço das vigas, com a designação de S&P CFK150/2000 (Figura 3.7), foi caracterizado através da realização de ensaios de tração uniaxial (Azevedo, 2011), de acordo com a norma ISO 527-5 (1997). Foram utilizados três provetes de laminados, contendo uma secção transversal de $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ e um comprimento de 250 mm. A Figura 3.8 apresenta a realização do ensaio de um provete de laminado e respetivo modo de rotura, assim como o modo de rotura de todos os provetes ensaiados. A Tabela 3.3 apresenta os valores médios das características do laminado de CFRP.



Figura 3.7 - Referência dos laminados de CFRP adotados.

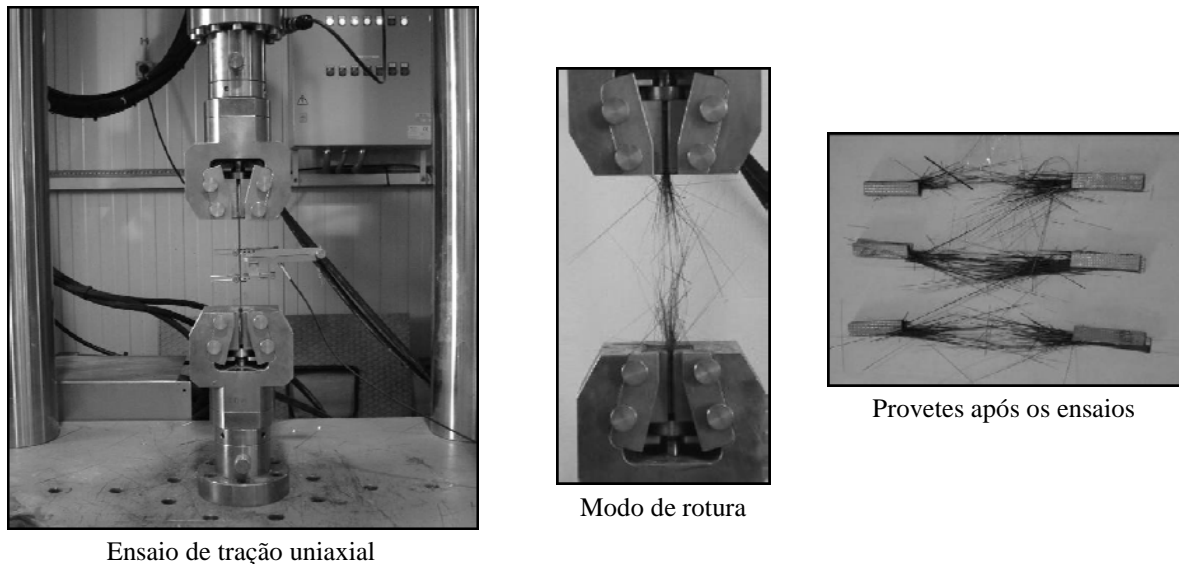


Figura 3.8 - Ensaio de tração uniaxial de um provete de laminado de CFRP e o modo de rotura (Azevedo, 2011).

Tabela 3.3 - Principais propriedades do laminado de CFRP (Azevedo, 2011).

| Tensão de rotura (MPa) | Módulo de elasticidade (GPa) | Extensão máxima (‰) |
|---------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 3165 | 175 | 18 |

3.2.4. Adesivo

A fixação dos laminados de CFRP ao betão foi feita por intermédio de um adesivo epoxídico, designado comercialmente por “S&P Resin 220 epoxy adhesive” (S&P, 2013). Este material é constituído por duas componentes: a resina (Componente A) e o endurecedor (Componente B). Estes dois componentes são combinados numa razão de 4 (Componente A) por 1 (Componente B), aquando do fabrico do adesivo. Este caracteriza-se por ter um tempo de trabalhabilidade (“pot life”) de cerca de 25 minutos. Na Tabela 3.4 estão apresentadas as principais características do adesivo S&P Resin 220 indicadas pelo fornecedor.

Tabela 3.4 - Principais propriedades do adesivo epoxídico (S&P, 2013).

| Propriedades | Valor |
|---|-----------|
| Densidade (Componente A e B) (g/cm ³) | 1.70-1.80 |
| Resistência à compressão (MPa) | >70 |
| Resistência à tração por flexão (MPa) | >26 |
| Resistência do adesivo - betão; 3 dias; 20°C (MPa) | >3 |
| Resistência do adesivo - Laminado CFK da S&P (MPa) | >3 |
| Validade do adesivo pronto (minutos) | ~25 |
| Idade mínima do betão antes da aplicação do adesivo (semanas) | 3 a 6 |
| Razão da mistura (A/B) | 4/1 |

3.3. APLICAÇÃO DO REFORÇO DE CFRP

Na aplicação dos reforços de CFRP, nas cinco vigas alvo do presente estudo, foi utilizada a técnica NSM, *Near Surface Mounted*, que consiste na inserção dos mesmos em entalhes executados no betão de recobrimento.

Com uma máquina de corte e na face mais tracionada, de cada uma das vigas de betão armado, foram executados os entalhes, com 5 mm de largura e 15 mm de profundidade. De forma a proporcionar uma boa aderência na ligação betão-adesivo, é necessário que os entalhes, já efetuados, se apresentem secos, isentos de gordura e sem partículas soltas. Esta limpeza foi conseguida com a aplicação de ar comprimido nos mesmos (Figura 3.9). Os laminados com secção transversal de 1.4 mm de espessura e 10 mm de largura, foram cortados transversalmente ao eixo das fibras, com um comprimento de 2300 mm, visto serem fornecidos em rolo (Figura 3.10a). Posteriormente, foi efetuada a limpeza dos laminados, com acetona (Figura 3.10b), de modo a proporcionar uma boa aderência entre o laminado de CFRP e o adesivo.



Figura 3.9 - Limpeza dos entalhes das vigas de betão armado, antes da aplicação dos laminados de CFRP.

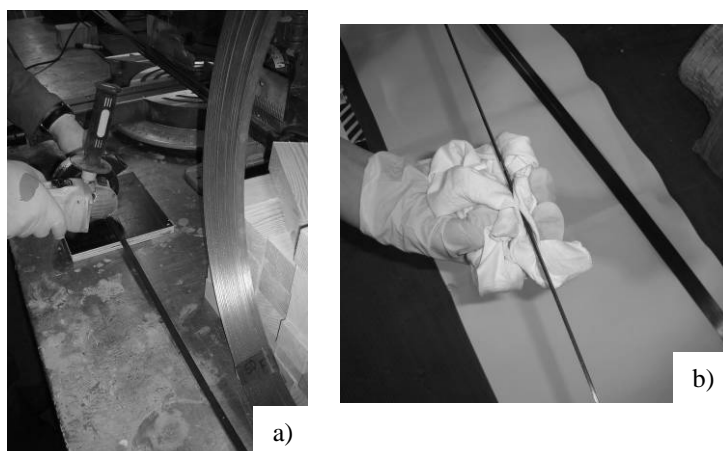


Figura 3.10 - Corte e limpeza dos laminados.

Posteriormente, procedeu-se à produção do adesivo, combinando e misturando os dois componentes que o constituíam (componente A, a resina, e componente B, o endurecedor), conforme indicações do fabricante, relativamente às dosagens de cada um dos componentes, ao modo e tempo de mistura e ao tempo de trabalhabilidade (Figura 3.11). Após a produção do adesivo, os entalhes foram preenchidos com o mesmo, com o auxílio de uma espátula (Figura 3.12a) e o adesivo foi aplicado, também, nas faces dos laminados (Figura 3.12b). Seguidamente, os laminados foram inseridos nos entalhes (Figura 3.12c), retirando-se o excesso de adesivo e nivelando e regularizando superfície (Figura 3.12d).



Figura 3.11 - Produção do adesivo epoxídico.



Figura 3.12 - Reforço à flexão de uma viga com três laminados de CFRP.

A Figura 3.13 apresenta o aspeto final de três vigas reforçadas com 1, 2 e 3 laminados, após efetuada a pintura.



Figura 3.13 - Aspeto final de três vigas reforçadas à flexão com 1, 2 e 3 laminados de CFRP, aplicando a técnica NSM.

3.4. SISTEMA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO DAS VIGAS

O presente programa experimental contemplou cinco vigas de betão armado, que foram sujeitas a dois tipos de ensaios à flexão, em quatro pontos de carga (Figuras 3.1 e 3.14), com carregamento monotónico. O primeiro tipo de ensaio (tipo I), designado por ensaio de pré-fendilhação, correspondeu à solicitação das vigas até um determinado nível de carga. Após o ensaio de pré-fendilhação (instalação de um determinado dano na estrutura) as vigas foram reforçadas. Posteriormente, as vigas foram sujeitas ao segundo tipo de ensaio (tipo II), que consistiu em solicitar as vigas até atingirem a rotura.

Na instrumentação das vigas foi utilizada uma célula de carga com capacidade máxima de carga de 500 kN, para que fosse possível a medição da força aplicada durante o ensaio (Figura 3.14). De forma a medir os deslocamentos verticais em determinadas secções das vigas (cinco), recorreu-se à utilização de transdutores de deslocamentos (LVDT's - *Linear Variable Differential Transformer*), que ficaram suportados pelo sistema "Japanese Yoke", evitando-se, assim, o registo de deslocamentos parasitas. Tal como é possível observar na Figura 3.15, as cinco secções de cada viga instrumentadas com LVDT's foram: a secção a meio vão, as duas secções de aplicação de carga e as duas secções a meio dos vãos de corte.



Figura 3.14 - Esquema geral dos ensaios realizados.

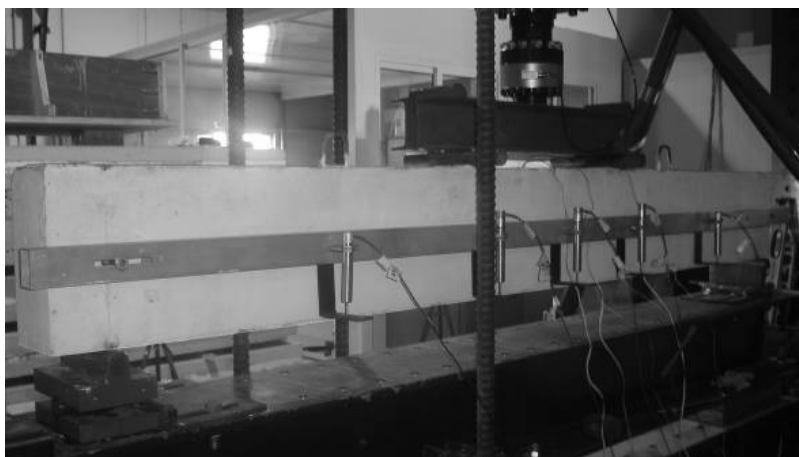
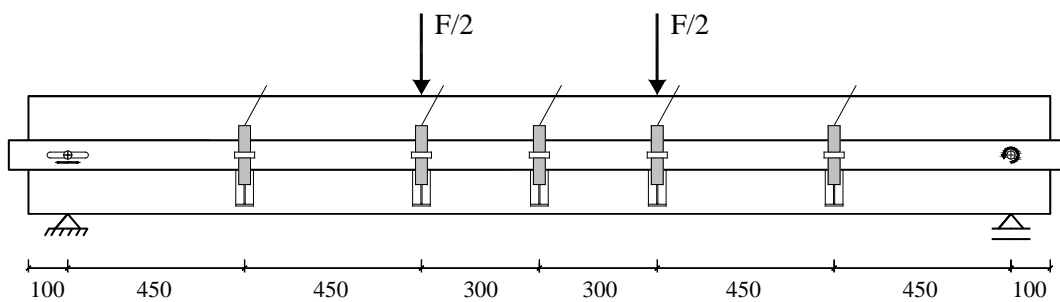


Figura 3.15 - Localização das secções com transdutores de deslocamentos (dimensões em mm).

Em cada uma das vigas ensaiadas, o comportamento do CFRP ao longo do ensaio, foi obtido por intermédio das extensões registadas em extensómetros eléctricos, que foram colados num dos laminados. Concretamente, cada laminado instrumentado foi provido de três extensómetros eléctricos, de acordo com a disposição apresentada na Figura 3.16. A Figura

3.17 apresenta o tipo de extensômetros que foram colados nos laminados de CFRP, um detalhe da colagem de um extensômetro e o aspecto geral de três dos cinco laminados que foram instrumentados no âmbito do presente programa experimental.

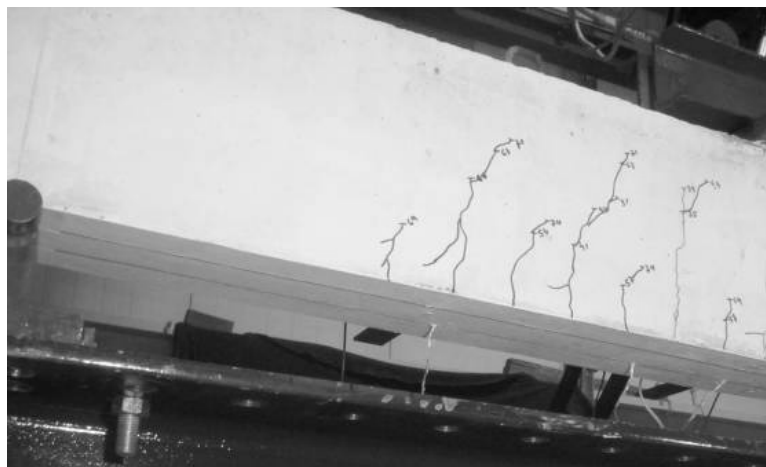
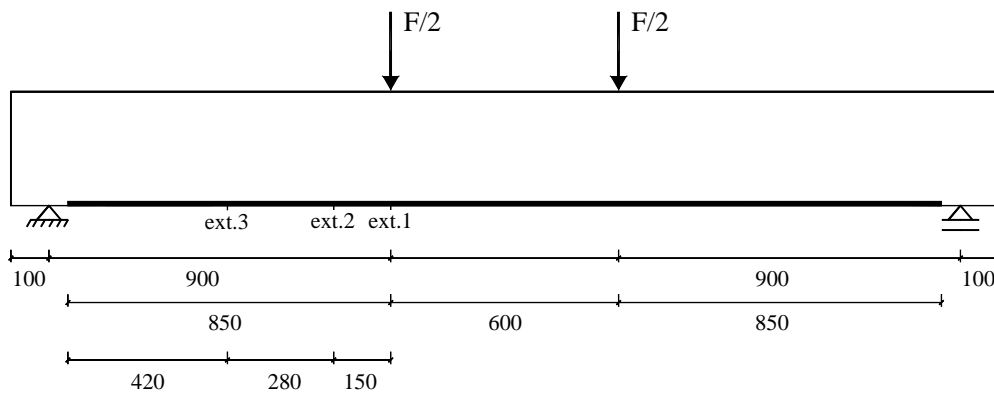


Figura 3.16 - Localização dos extensômetros colados nos laminados instrumentados (dimensões em mm).

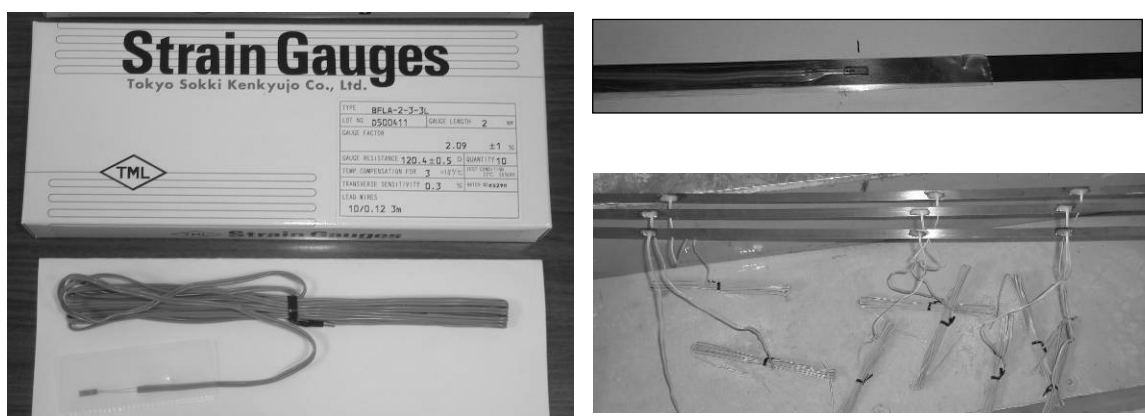


Figura 3.17 - Instrumentação dos laminados com extensômetros elétricos.

À semelhança do que ocorreu nos laminados de CFRP, as armaduras longitudinais de tração das vigas foram instrumentadas com três extensômetros elétricos (do mesmo tipo que os colados nos laminados). Os três extensômetros foram colocados da seguinte forma (Figura

3.2): dois num dos varões de $\phi 10$, um na secção a meio vão da viga e outro numa das secções da aplicação de carga (a 300 mm da secção a meio vão); e um no outro varão de $\phi 10$, na secção a meio vão da viga.

3.5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.5.1. Apresentação dos resultados dos ensaios de pré-fendilhação (ensaio tipo I)

As cinco vigas envolvidas na investigação, do presente programa experimental, foram solicitadas de forma a atingirem um determinado nível de pré-fendilhação, previamente à aplicação do reforço de CFRP. Assim, de acordo com o descrito na secção 3.1, a força máxima aplicada nas vigas com a nomenclatura de PC1, PC2 e PC3 durante o ensaio de pré-fendilhação (ensaio tipo I), foi de 40 kN, 47.5 kN e 55 kN, respetivamente (ver Tabela 3.1).

A Figura 3.18 apresenta o padrão de fendilhação que foi registado nas vigas após a realização do ensaio de pré-fendilhação. Em todas as vigas verificou-se que as primeiras fendas foram registadas entre os pontos de carga (fendas de flexão pura). Com o aumento da carga, as fendas começaram também a surgir nos vãos de corte. O padrão de fendilhação final, instalado, nas vigas foi tanto mais difuso quanto maior foi a carga máxima aplicada nas vigas.

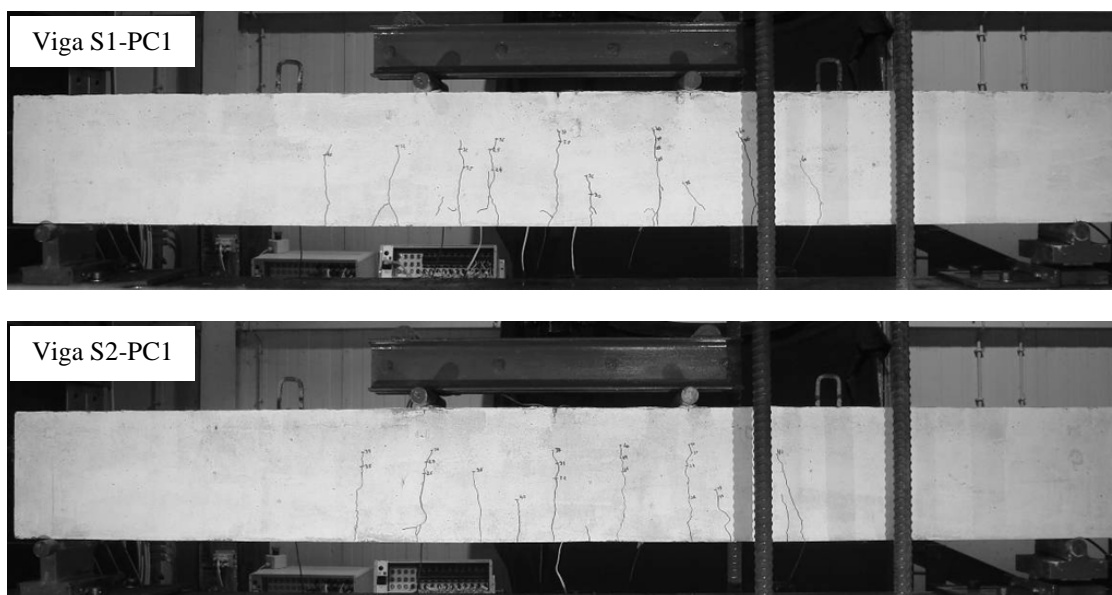




Figura 3.18 - Padrão de fendilhação instalado nas vigas após a realização dos ensaios de pré-fendilhação (ensaio tipo I).

Após a realização deste ensaio, que terminou com a descarga das vigas, procedeu-se ao seu reforço, de acordo com o procedimento descrito na secção 3.3. Posteriormente, as vigas foram sujeitas a um carregamento monotónico até atingirem a rotura (ensaio tipo II).

3.5.2. Apresentação e análise dos resultados dos ensaios à rotura das vigas (ensaio tipo II)

A Figura 3.19 apresenta algumas fases do ensaio à rotura da viga S1-PC1. Os valores da carga de cedência das armaduras e da carga máxima desta viga foram, respetivamente, 62.0 kN e 86.4 kN. A Figura 3.20 ilustra o padrão de fendilhação final registado em ambas as faces laterais da viga. Na fotografia superior da Figura 3.20, as fendas a vermelho referem-se às que foram registadas no ensaio de pré-fendilhação e as fendas a azul são as que foram registadas no ensaio à rotura da viga S1-PC1. De acordo com o ilustrado na Figura 3.21, o modo de rotura da viga S1-PC1 ocorreu pelo esgotamento da capacidade resistente à tração do CFRP (rotura do CFRP).



Figura 3.19 - Sequência do ensaio à rotura da viga S1-PC1.

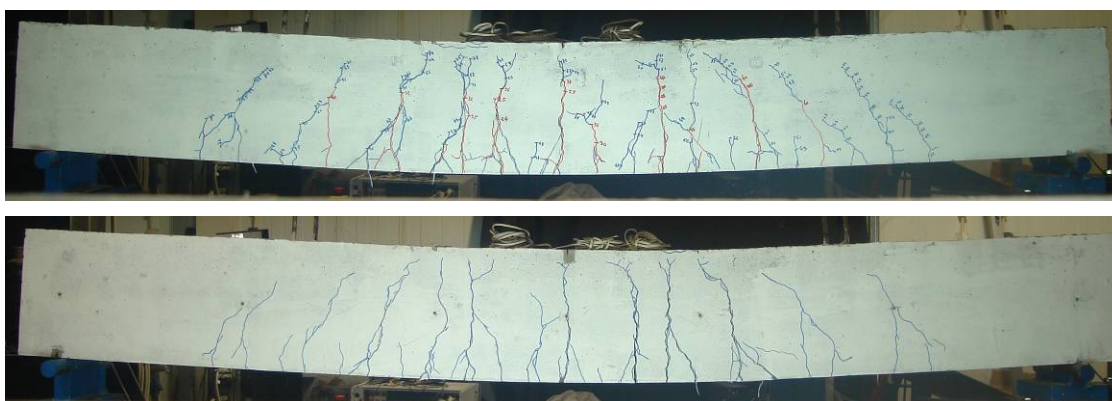


Figura 3.20 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S1-PC1.

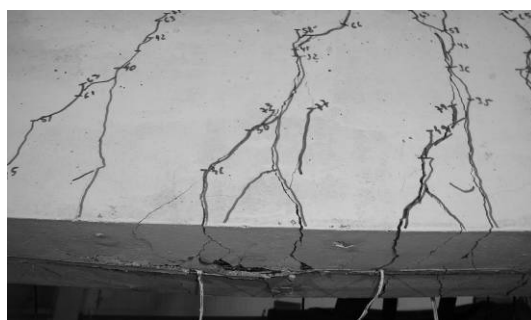


Figura 3.21 - Pormenor do modo de rotura da viga S1-PC1 (rotura do laminado de CFRP).

A Figura 3.22 mostra algumas fases do ensaio à rotura da viga S2-PC1. Os valores da carga de cedência das armaduras e da carga máxima desta viga foram, respetivamente, 67.5 kN e 115.6 kN. A Figura 3.23 ilustra o padrão de fendilhação final registado em ambas as faces laterais da viga. Na fotografia superior da Figura 3.23, as fendas a vermelho referem-se às que

foram registadas no ensaio de pré-fendilhação e as fendas a azul são as que foram registadas no ensaio à rotura da viga S2-PC1. De acordo com o ilustrado na Figura 3.24, o modo de rotura da viga S2-PC1 ocorreu pelo esgotamento da capacidade resistente à tração do CFRP (rotura do CFRP).

A Figura 3.25 apresenta algumas fases do ensaio à rotura da viga S2-PC2. Os valores da carga de cedência das armaduras e da carga máxima desta viga foram, respetivamente, 70.0 kN e 113.7 kN. A Figura 3.26 ilustra o padrão de fendilhação final registado em ambas as faces laterais da viga. Em ambas as fotografias da Figura 3.26, as fendas a vermelho referem-se às que foram registadas no ensaio de pré-fendilhação e as fendas a azul são as que foram registadas no ensaio à rotura da viga S2-PC2. De acordo com o ilustrado na Figura 3.27, o modo de rotura da viga S2-PC2 ocorreu pelo destacamento do CFRP.



Figura 3.22 - Sequência do ensaio à rotura da viga S2-PC1.

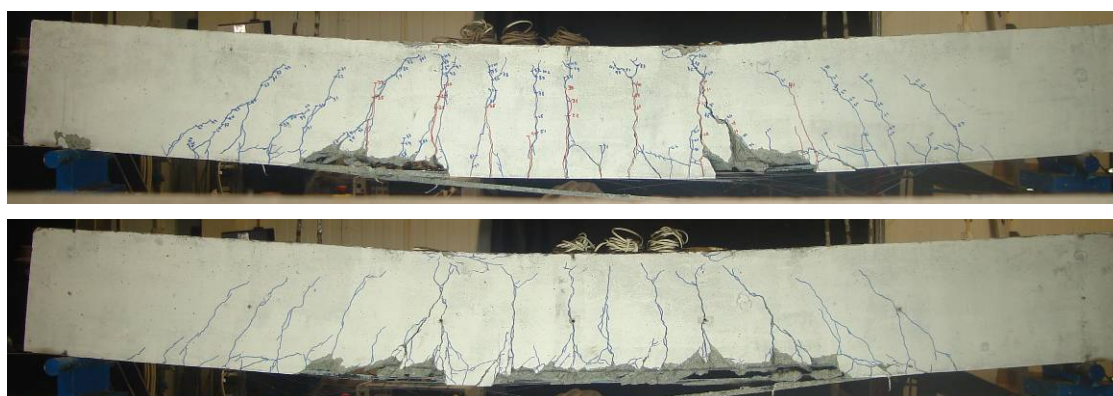


Figura 3.23 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S2-PC1.

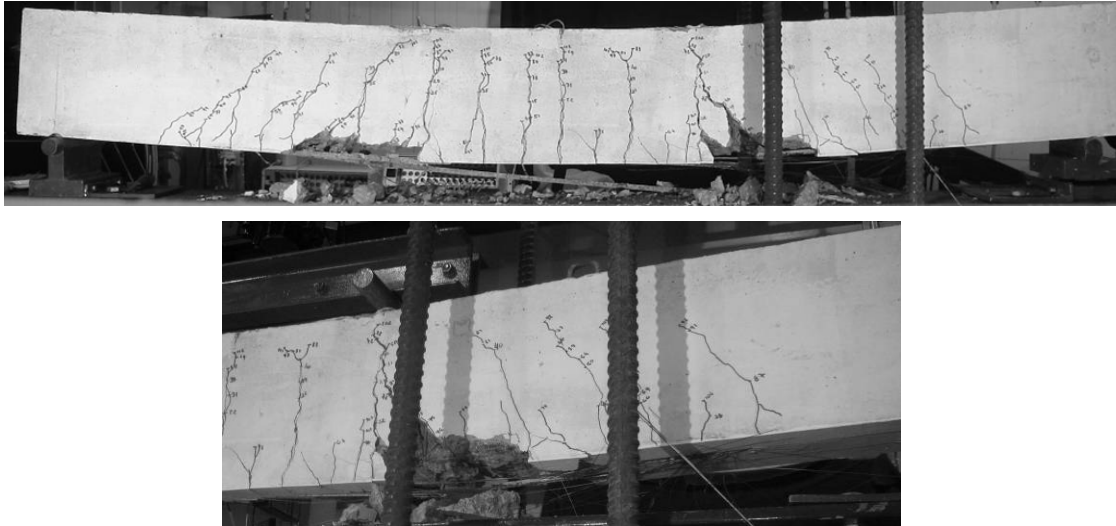


Figura 3.24 - Pormenor do modo de rotura da viga S2-PC1 (rotura do laminado de CFRP).



Figura 3.25 - Sequência do ensaio à rotura da viga S2-PC2.

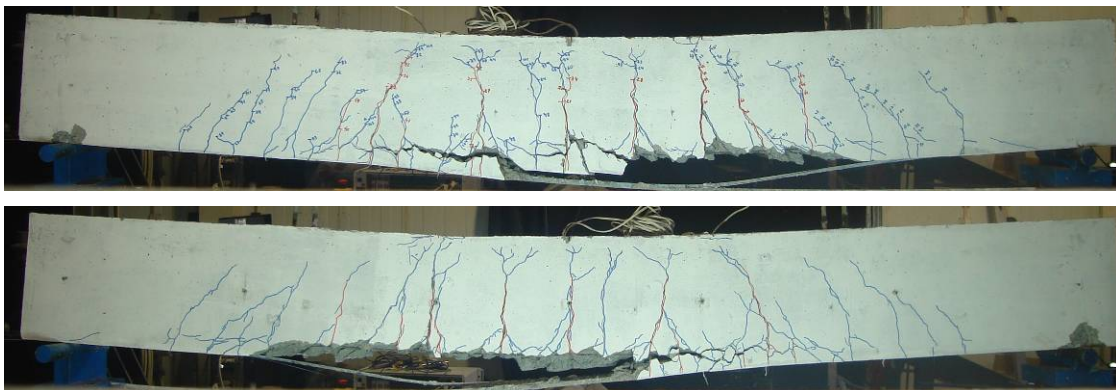


Figura 3.26 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S2-PC2.



Figura 3.27 - Pormenor do modo de rotura da viga S2-PC2 (destacamento do laminado de CFRP).

A Figura 3.28 apresenta algumas fases do ensaio à rotura da viga S3-PC1. Os valores da carga de cedência das armaduras e da carga máxima desta viga foram, respetivamente, 76.5 kN e 128.2 kN. A Figura 3.29 ilustra o padrão de fendilhação final registado em ambas as faces laterais da viga. Na fotografia superior da Figura 3.29, as fendas a vermelho referem-se às que foram registadas no ensaio de pré-fendilhação e as fendas a azul são as que foram registadas no ensaio à rotura da viga S3-PC1. De acordo com o ilustrado na Figura 3.30, o modo de rotura da viga S3-PC1 ocorreu pelo destacamento do CFRP.

A Figura 3.31 apresenta algumas fases do ensaio à rotura da viga S3-PC3. Os valores da carga de cedência das armaduras e da carga máxima desta viga foram, respetivamente, 74.8 kN e 131.0 kN. A Figura 3.32 ilustra o padrão de fendilhação final registado em ambas as faces laterais da viga. Na fotografia superior da Figura 3.32, as fendas a vermelho referem-se às que foram registadas no ensaio de pré-fendilhação e as fendas a azul são as que foram registadas no ensaio à rotura da viga S3-PC3. De acordo com o ilustrado na Figura 3.33, o modo de rotura da viga S3-PC3 ocorreu pelo destacamento do CFRP.

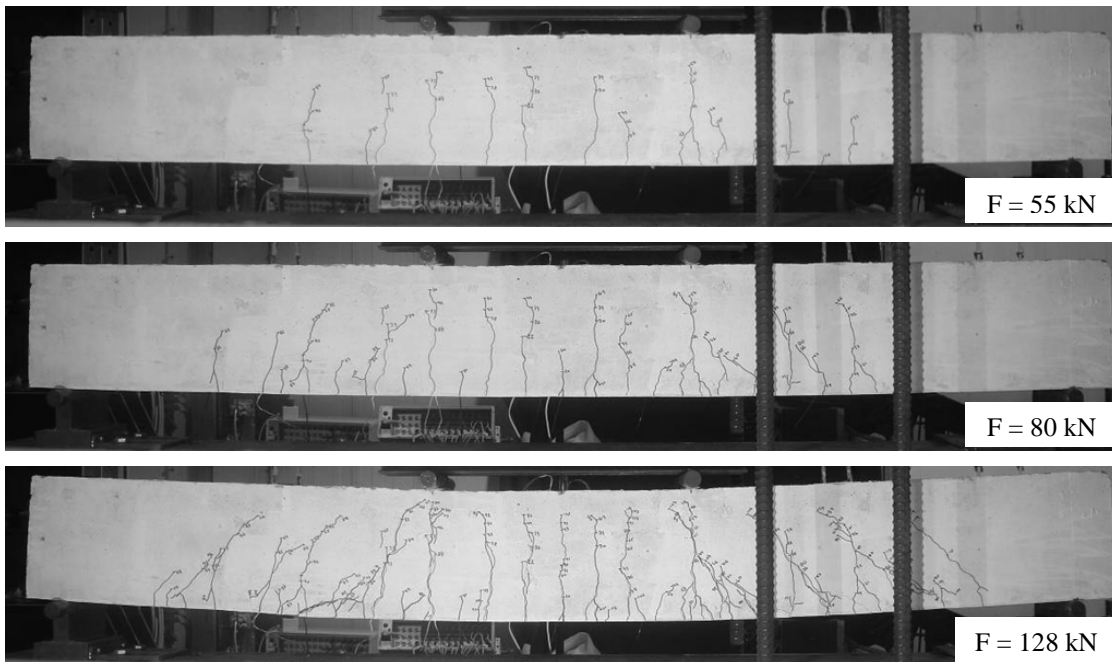


Figura 3.28 - Sequência do ensaio à rotura da viga S3-PC1.

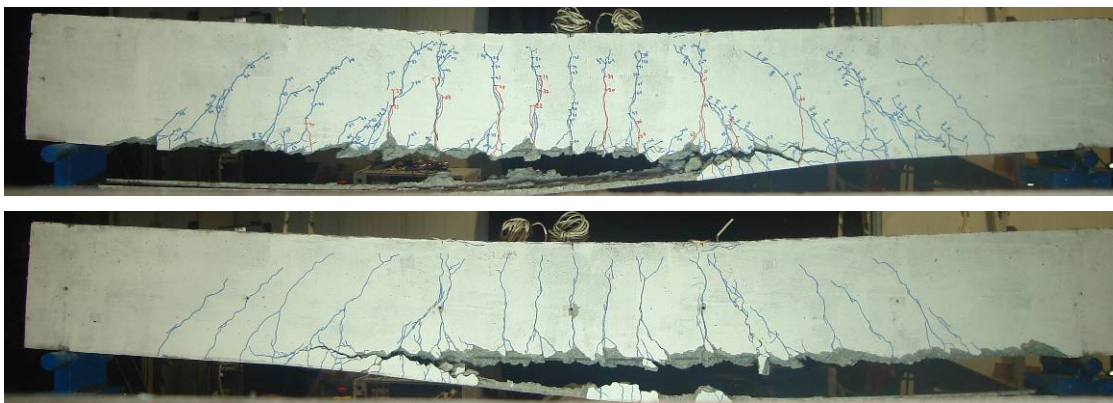


Figura 3.29 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S3-PC1.



Figura 3.30 - Pormenor do modo de rotura da viga S3-PC1 (destacamento do laminado de CFRP).

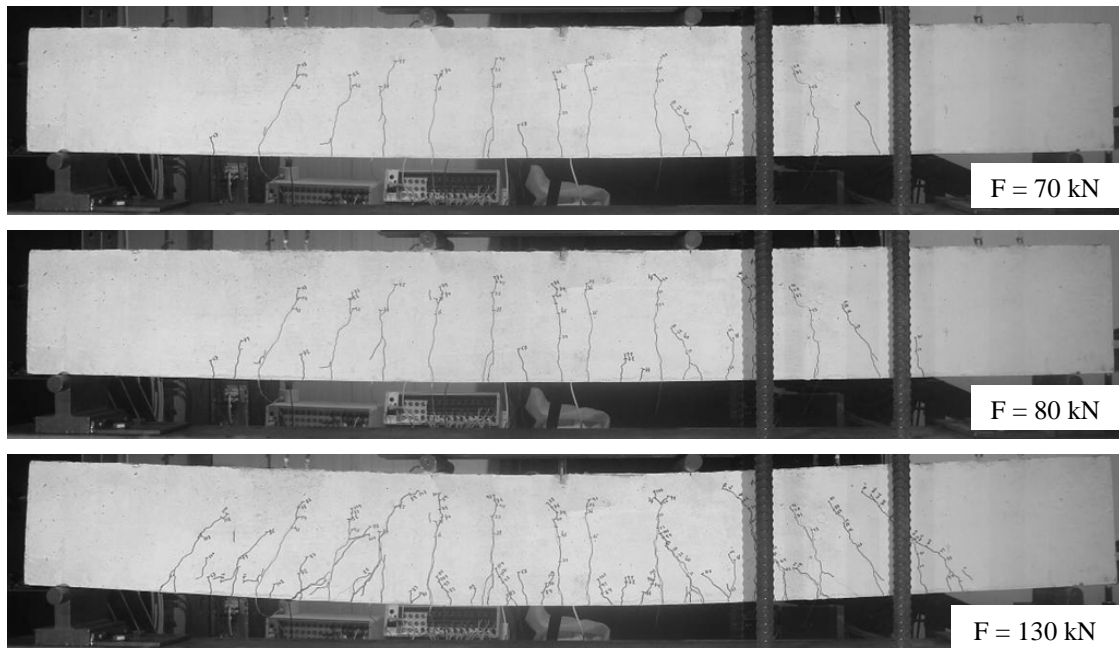


Figura 3.31 - Sequência do ensaio à rotura da viga S3-PC3.

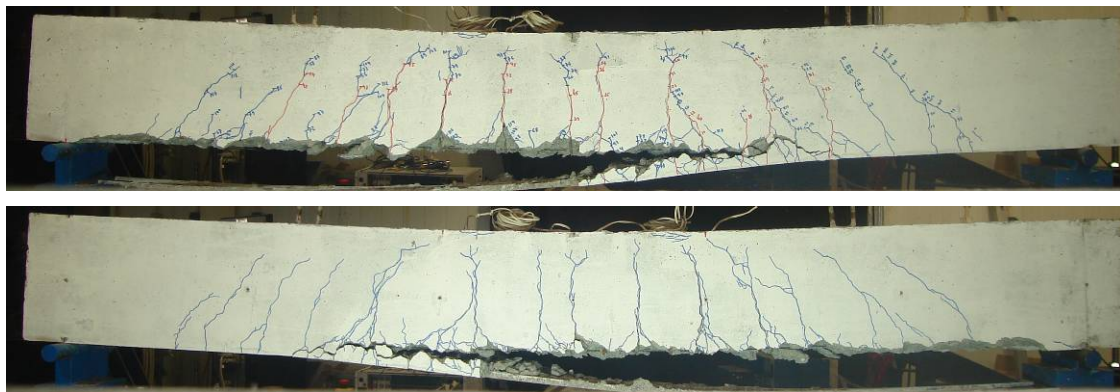


Figura 3.32 - Padrão de fendilhação final instalado na viga S3-PC3.



Figura 3.33 - Pormenor do modo de rotura da viga S3-PC3 (destacamento do laminado de CFRP).

A Figura 3.34 apresenta as curvas referentes ao comportamento das vigas S1-PC1, S2-PC1 e S3-PC1, reforçadas à flexão com um, dois e três laminados, respetivamente. Todas estas vigas caracterizam-se por terem sido submetidas a um ensaio de pré-fendilhação, cuja carga

máxima aplicada foi de 40 kN. De forma a avaliar os benefícios da presença do reforço de CFRP, na Figura 3.34 está, ainda, representada a curva de comportamento da viga de referência REF-M (Azevedo, 2011).

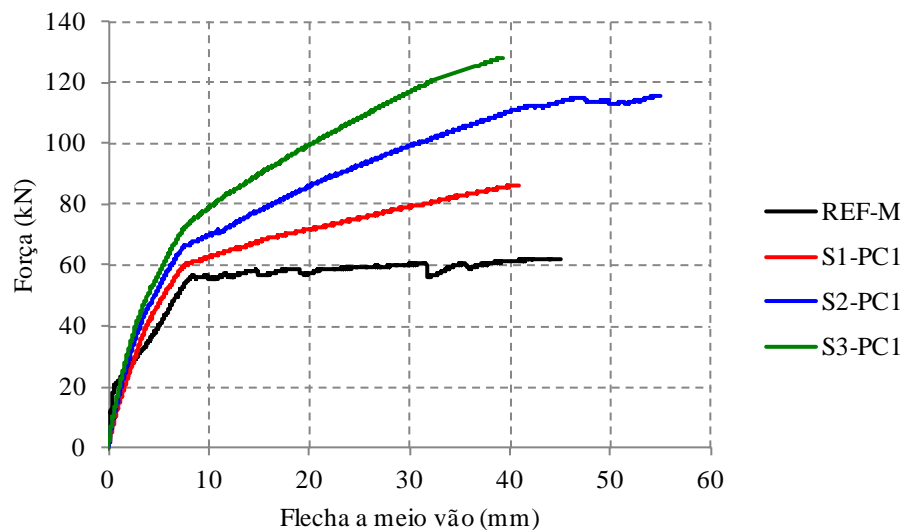


Figura 3.34 - Curvas de comportamento das vigas REF-M, S1-PC1, S2-PC1 e S3-PC1.

As curvas de comportamento da Figura 3.34 permitem verificar que as vigas reforçadas apresentam, numa fase inicial, uma rigidez inferior à da viga de referência REF-M. Tal é devido à pré-fendilhação instalada nas vigas antes da aplicação do reforço de CFRP. Ao contrário da viga de referência, em que a curva de comportamento apresenta três estados principais de comportamento (betão não fendilhado, betão fendilhado com o aço não plastificado e betão fendilhado após cedência do aço das armaduras longitudinais), nas vigas reforçadas com CFRP só são observados dois estados, sendo eles o betão fendilhado com o aço não plastificado e o betão fendilhado após a cedência das armaduras. No entanto, nas curvas de comportamento da Figura 3.34 são perfeitamente visíveis os benefícios da presença dos reforços de CFRP, quer em termos de rigidez quer em termos de capacidade de carga máxima. Além disso, constata-se que com o aumento do número de laminados, houve maiores incrementos de rigidez e de capacidade de carga máxima.

Na Figura 3.35 estão representadas as curvas força vs deslocamento a meio vão registadas no ensaio à rotura das vigas S2-PC1 e S2-PC2. Estas vigas caracterizam-se por terem sido reforçadas com dois laminados de CFRP e diferenciam-se apenas pelo nível da pré-fendilhação instalada (a força máxima no ensaio de pré-fendilhação das vigas S2-PC1 e S2-PC2 foi de 40 kN e 47.5 kN, respetivamente). Na Figura 3.35 também foi introduzida a curva de comportamento da viga de referência REF-M (Azevedo, 2011).

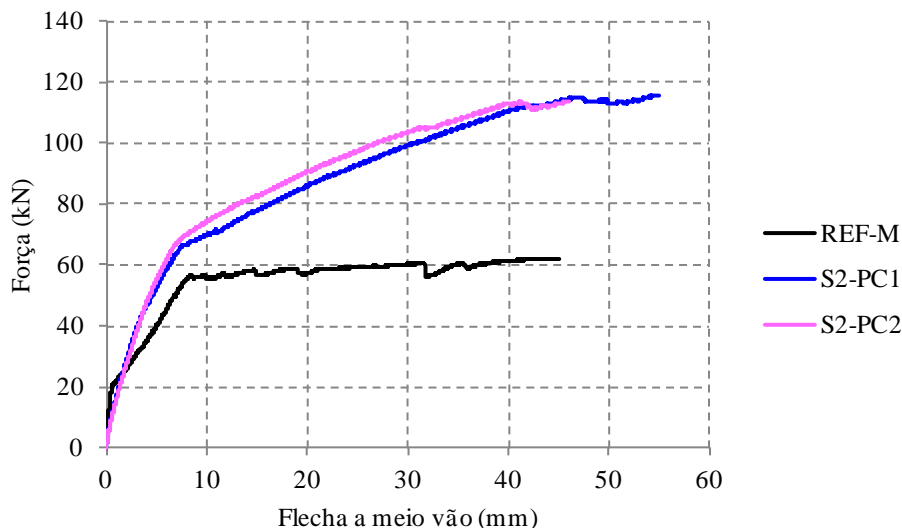


Figura 3.35 - Curvas de comportamento da viga de referência (REF-M) e das vigas reforçadas com dois laminados e que se distinguem pelo nível de pré-fendilhação.

Analisando as curvas de comportamento da Figura 3.35, constata-se que, inicialmente, a rigidez das duas vigas reforçadas é inferior à rigidez da viga de referência REF-M, devido a terem sido sujeitas ao ensaio de pré-fendilhação previamente à aplicação do reforço. Tal como já foi referido na análise da Figura 3.34, as vigas S2-PC1 e S2-PC2 registaram dois estados de comportamento (betão fendilhado com o aço não plastificado e o betão fendilhado após a cedência das armaduras) comparativamente com os três estados de comportamento observados na curva referente à viga de referência REF-M. Apesar das vigas S2-PC1 e S2-PC2 terem sido sujeitas a diferentes níveis de pré-fendilhação, apresentaram um comportamento semelhante. A capacidade de carga máxima da viga S2-PC1 (sujeita ao menor nível de menor pré-fendilhação), de valor igual a 115.6 kN, foi ligeiramente superior à da viga S2-PC2 (113.7 kN). Os valores relativos à carga de cedência das armaduras também foram muito semelhantes (67.5 kN e 70.0 kN para as vigas S2-PC1 e S2-PC2, respetivamente).

Na Figura 3.36 estão representadas as curvas força vs deslocamento a meio vão registadas no ensaio à rotura das vigas S3-PC1 e S3-PC3. Estas vigas caracterizam-se por terem sido reforçadas com três laminados de CFRP e distinguem-se apenas pelo nível da pré-fendilhação instalada (a força máxima no ensaio de pré-fendilhação das vigas S3-PC1 e S3-PC3 foi de 40 kN e 55 kN, respetivamente). Na Figura 3.36 também está representada a curva de comportamento da viga de referência REF-M (Azevedo, 2011).

O comportamento geral das vigas S3-PC1 e S3-PC3 foi muito semelhante ao observado nas restantes vigas pré-fendilhadas e posteriormente reforçadas com CFRP (vigas S1-PC1, S2-PC1 e S2-PC2), quer relativamente à sua menor rigidez inicial quando comparada com a da

viga de referência REF-M, quer em termos do número de estados de comportamento registado (dois: betão fendilhado com o aço não plastificado e o betão fendilhado após a cedência das armaduras). De acordo com a Figura 3.36, as curvas de comportamento das vigas reforçadas com três laminados apresentaram um traçado praticamente igual, apesar do nível de fendilhação imposto previamente à aplicação do reforço ter sido diferente. Os valores da carga máxima das vigas S3-PC1 e S3-PC3 foram muito semelhantes (128.2 kN e 131 kN, respetivamente). O mesmo se passou em termos dos valores de carga de cedência das armaduras (76.5 kN no caso da viga S3-PC1 e 74.8 kN no caso das vigas S3-PC3).

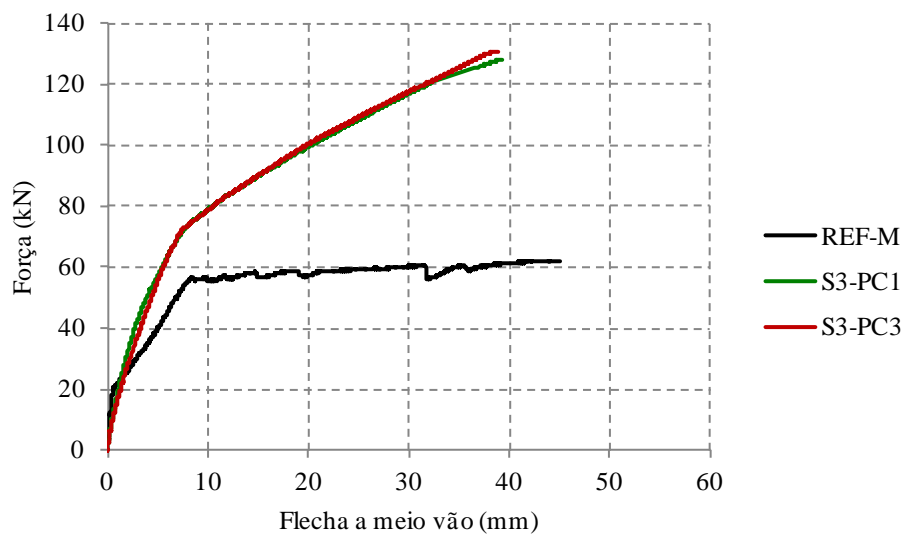


Figura 3.36 - Curvas de comportamento da viga de referência (REF-M) e das vigas reforçadas com três laminados e que se distinguem pelo nível de pré-fendilhação.

A Tabela 3.5 apresenta os principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas até à rotura (ensaio tipo II). Nesta tabela também estão incluídos os resultados da viga de referência sem reforço de CFRP (viga REF-M) que foi testada no âmbito do trabalho de Azevedo (2011). Assim, para cada viga, na Tabela 3.5 são apresentados os valores da carga correspondente à cedência das armaduras de aço (F_{sy}) e da carga máxima (F_{max}). Os acréscimos da carga proporcionados pelos reforços de CFRP, em termos da carga de cedência das armaduras e da carga máxima, assim como, o deslocamento a meio vão correspondente a F_{max} (u_{Fmax}) também se encontram registados na Tabela 3.5.

De acordo com os valores da Tabela 3.5 verifica-se que as soluções de reforços testadas provocaram acréscimos da carga de cedência das armaduras que variaram entre os 9.5% (viga S1-PC1) e os 35.2% (viga S3-PC1). No que respeita à carga máxima, verificaram-se aumentos que variaram entre os 38.7% (viga S1-PC1) e 110.3% (viga S3-PC3). Independentemente do nível de pré-fendilhação, o reforço com 1, 2 e 3 laminados conduziu em termos médios a

acrécimos de carga de cedência das armaduras de 9.5%, 21.5% e 33.9%, respetivamente. Independentemente do nível de pré-fendilhação, o reforço com 1, 2 e 3 laminados conduziu, em termos médios, a acréscimos de carga máxima de 38.7%, 84.1% e 108.1%, respetivamente.

Em relação ao deslocamento a meio vão associado à carga máxima das vigas (u_{Fmax}) verificou-se que, independentemente do nível de pré-fendilhação, nas vigas com 1, 2 e 3 laminados o valor de u_{Fmax} foi de 90.5%, 112.1% e 86.6% do valor de u_{Fmax} da viga de referência REF-M.

Tabela 3.5 - Principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas (ensaio à rotura).

| Vigas | F_{sy} (kN) | Acrécimo de carga de cedência (%) | F_{max} (kN) | Acrécimo de carga máxima (%) | u_{Fmax} (mm) |
|--------|------------------|---|-------------------|------------------------------------|--------------------|
| REF-M | 56.6 | — | 62.3 | — | 45.1 |
| S1-PC1 | 62.0 | 9.5 | 86.4 | 38.7 | 40.8 |
| S2-PC1 | 67.5 | 19.3 | 115.6 | 85.6 | 55.0 |
| S2-PC2 | 70.0 | 23.7 | 113.7 | 82.5 | 46.1 |
| S3-PC1 | 76.5 | 35.2 | 128.2 | 105.8 | 39.3 |
| S3-PC3 | 74.8 | 32.6 | 131.0 | 110.3 | 38.8 |

Na Tabela 3.6 apresenta-se o valor das extensões máximas registadas no CFRP até ao momento em que as vigas atingiram a sua capacidade de carga máxima, o grau de mobilização do reforço de CFRP e o modo de rotura observado. Na Figura 3.37 apresenta-se para as vigas S2-PC1, S2-PC2 e S3-PC1, a relação entre as extensões registadas nos extensómetros colados nas armaduras longitudinais e a força aplicada nas vigas (o Ext.2 foi colado num dos varões $\phi 10$ na secção correspondente ao meio vão das). Nas restantes vigas não foi possível a aquisição das extensões nas armaduras longitudinais. Na mesma figura, apresenta-se, para as vigas S1-PC1, S2-PC1, S2-PC2, S3-PC1 e S3-PC3, a relação entre as extensões registadas nos extensómetros colados nos laminados (ver Figura 3.16) e a força aplicada nas vigas.

A partir da Tabela 3.6, verifica-se que as extensões máximas registadas, nos extensómetros elétricos aplicados nos laminados de CFRP, variaram entre 14.5‰ (S3-PC3) e 17.7‰ (S2-PC1). Assim, tendo em consideração que o valor médio da extensão máxima obtido no ensaio de caracterização do laminado (ensaio de tração uniaxial) foi de 18‰, o grau de mobilização do reforço de CFRP nas configurações de reforço testadas, e independentemente do nível de pré-fendilhação, foi superior aos 81%, chegando em alguns casos aos 100% (vigas em que se verificou a rotura do CFRP). Na viga S1-PC1, o valor máximo da extensão registada no

CFRP refere-se ao extensómetro 2 (Ext. 2 - ver Figura 3.16). Com efeito, não foi possível adquirir as extensões no extensómetro 1 (Ext. 1), que face ao modo de rotura que ocorreu (esgotamento da capacidade resistente à tração do CFRP na zona central da viga) seria o que registaria maior valor de extensão. Desta forma, justifica-se o facto da máxima extensão registada na viga S1-PC1 ser 15.3‰ (bastante inferior aos 18‰ - ver Tabela 3.3).

Tabela 3.6 - Extensões máximas registadas nos laminados de CFRP das vigas S1-PC1, S2-PC1, S2-PC2, S3-PC1 e S3-PC3.

| Vigas | ε_{CFRP}^{max} (‰) | Grau de mobilização do CFRP (%) | Modo de rotura |
|--------------|-----------------------------------|---|-----------------------|
| S1-PC1 | 15.3 | 85.0 | Rotura do CFRP |
| S2-PC1 | 17.7 | 98.3 | Rotura do CFRP |
| S2-PC2 | 16.7 | 92.8 | Destacamento do CFRP |
| S3-PC1 | 15.9 | 88.3 | Destacamento do CFRP |
| S3-PC3 | 14.5 | 80.6 | Destacamento do CFRP |

Da análise da Figura 3.37 verifica-se que em termos das extensões nas armaduras, e tal como já anteriormente se tinha constatado, as vigas atingiram a sua capacidade de carga máxima com as armaduras em cedência (não foi possível a aquisição das extensões nas armaduras no caso das vigas S1-PC1 e S3-PC3). Nas vigas reforçadas com CFRP verifica-se que as extensões aumentam, de forma mais acentuada, a partir do momento em que as armaduras entram em cedência.

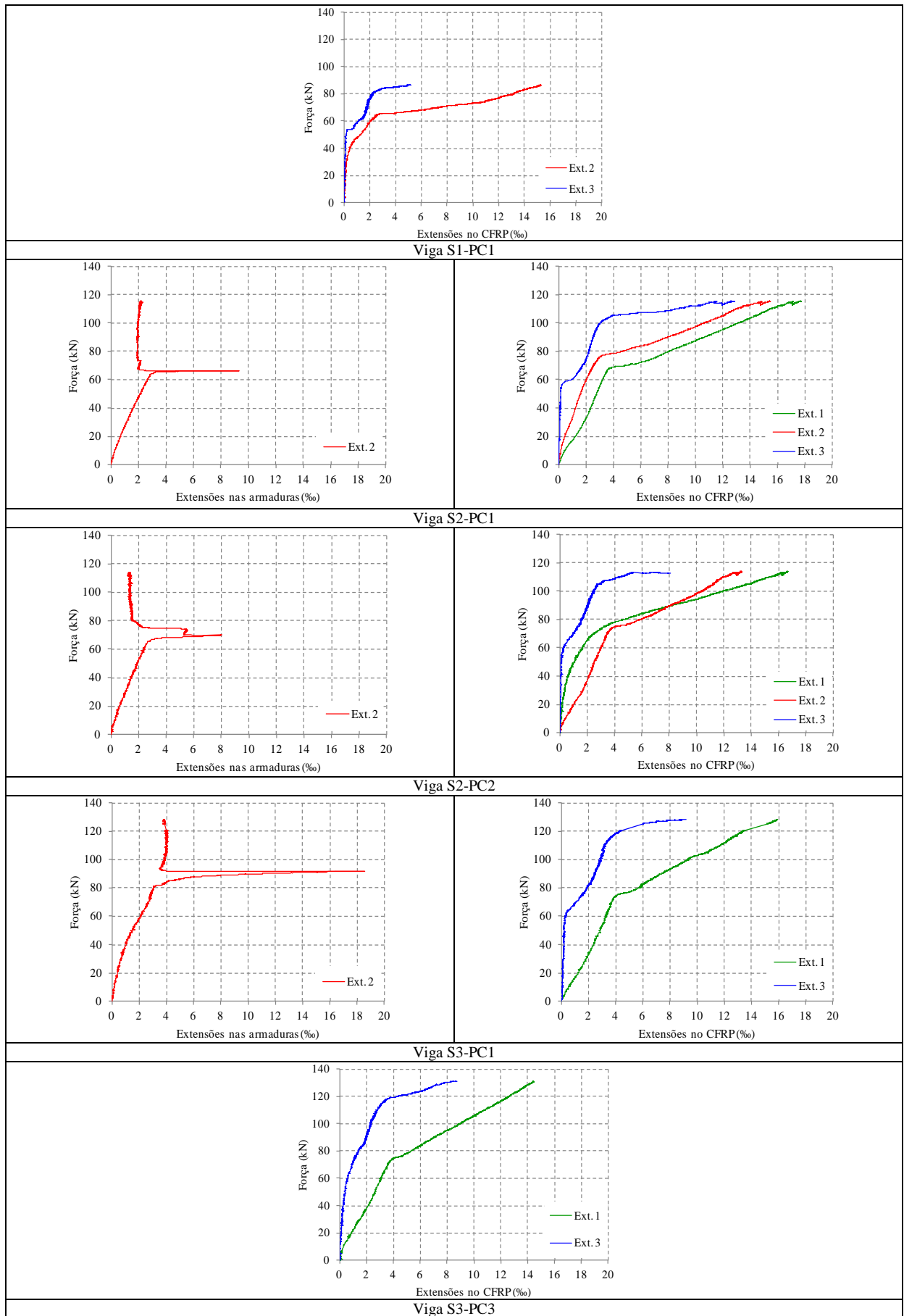


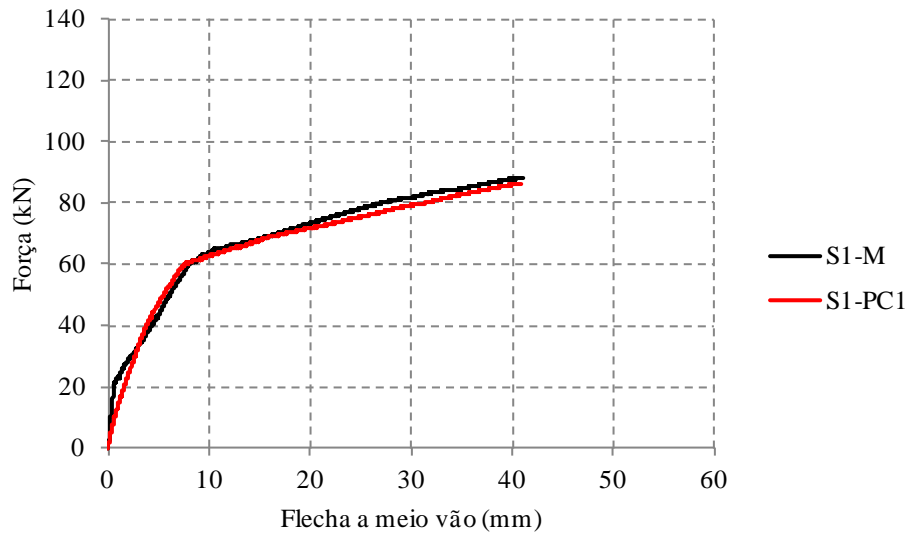
Figura 3.37 - Variação das extensões nas armaduras e nos laminados de CFRP.

3.5.3. Efeito da pré-fendilhação

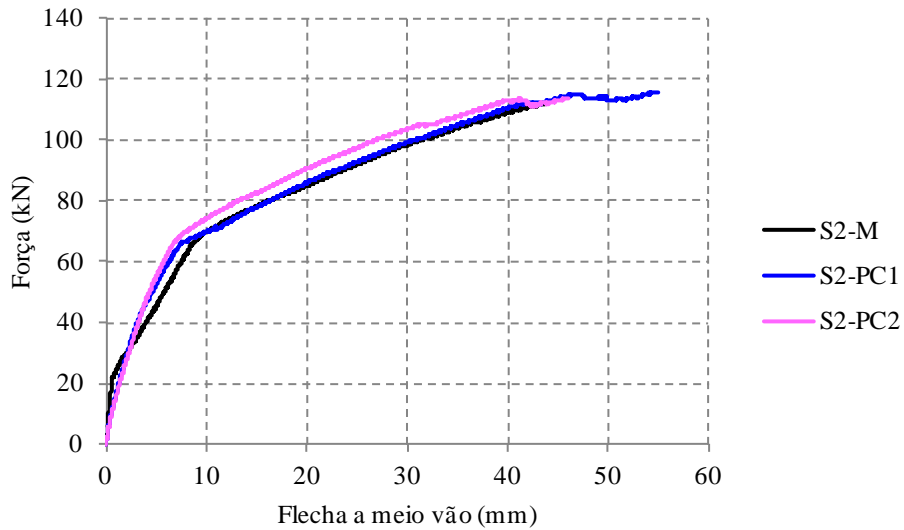
O trabalho experimental de Azevedo (2011), contemplou um conjunto de quatro vigas de betão armado, que foram sujeitas a um carregamento monotónico, até à rotura. Dentro destas, uma era de referência, sem qualquer reforço inserido (viga REF-M) e as restantes foram reforçadas com um, dois e três laminados de CFRP, denominando-se de S1-M, S2-M e S3-M, respetivamente. As vigas testadas por Azevedo (2011) eram semelhantes às que foram ensaiadas no presente programa experimental (a viga S1-M era semelhante à viga S1-PC1, a viga S2-M era semelhante às vigas S2-PC1 e S2-PC2, a viga S3-M era semelhante às vigas S3-PC1 e S3-PC3). A única diferença entre as vigas dos dois programas experimentais está associada ao facto de, no caso de Azevedo (2011), as vigas não terem sido pré-fendilhadas antes da aplicação do reforço.

A Figura 3.38 apresenta as curvas de comportamento das vigas reforçadas sujeitas ao ensaio de pré-fendilhação, previamente à aplicação do reforço e das vigas reforçadas ensaiadas por Azevedo (2011), que não foram sujeitas a este tipo de ensaio. Na Figura 3.38a estão representadas as curvas de comportamento das vigas com um laminado S1-PC1 e S1-M. A Figura 3.38b apresenta as curvas das vigas com dois laminados S2-PC1, S2-PC2 e S2-M. As curvas das vigas com três laminados S3-PC1, S3-PC3 e S3-M estão ilustradas na Figura 3.38c. A Tabela 3.7 apresenta os resultados obtidos nas vigas ensaiadas no presente programa experimental e nas vigas ensaiadas por Azevedo (2011), com e sem pré-fendilhação, respetivamente.

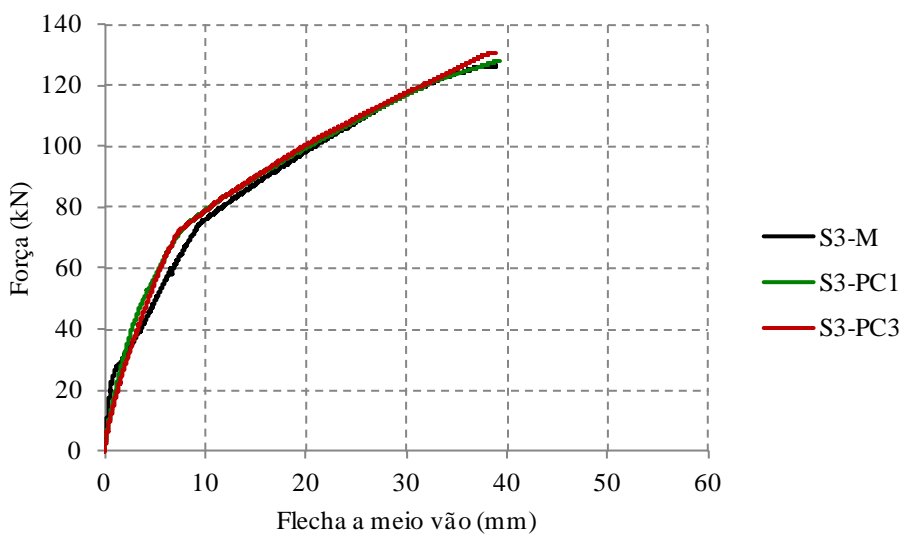
As curvas de comportamento observadas na Figura 3.38 permitem verificar que, numa fase inicial, as vigas reforçadas sujeitas ao ensaio de pré-fendilhação, previamente à aplicação do reforço, apresentam uma rigidez inferior às vigas reforçadas que não foram sujeitas ao ensaio de pré-fendilhação. Devido ao mesmo facto, as vigas com pré-fendilhação exibem apenas dois estados de comportamento, comparativamente aos três estados observados nas curvas das vigas sem pré-fendilhação. Apesar das vigas testadas no presente programa experimental, terem sido pré-fendilhadas, apresentam um traçado muito semelhante ao das vigas sem essa característica. A capacidade de carga máxima alcançada pelas vigas com o mesmo número de laminados (com e sem pré-fendilhação) foi muito semelhante, comprovando que os benefícios da aplicação do reforço foram independentes do nível de dano provocado nas vigas.



a) Curvas de comportamento das vigas com um laminado (com e sem pré-fendilhação).



b) Curvas de comportamento das vigas com dois laminados (com e sem pré-fendilhação).



c) Curvas de comportamento das vigas com três laminados (com e sem pré-fendilhação).

Figura 3.38 - Curvas de comportamento das vigas com um, dois e três laminados (com e sem pré-fendilhação).

Tabela 3.7 - Principais resultados obtidos nas vigas reforçadas, com e sem pré-fendilhação.

| Vigas | Nível de pré-fendilhação (kN)* | F_{sy} (kN) | Acréscimo de carga de cedência (%) | F_{max} (kN) | Acréscimo de carga máxima (%) | ε_{CFRP}^{max} (%) | Grau de mobilização do CFRP (%) |
|--------|--------------------------------|---------------|------------------------------------|----------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| S1-M | — | 62.4 | 10.0 | 88.4 | 42.0 | 17.9 | 100.0 |
| S1-PC1 | 40.0 | 62.0 | 9.5 | 86.4 | 38.7 | 15.3 | 85.0 |
| S2-M | — | 69.5 | 23.0 | 111.9 | 80.0 | 17.4 | 97.0 |
| S2-PC1 | 40.0 | 67.5 | 19.3 | 115.6 | 85.6 | 17.7 | 98.3 |
| S2-PC2 | 47.5 | 70.0 | 23.7 | 113.7 | 82.5 | 16.7 | 92.8 |
| S3-M | — | 76.0 | 34.0 | 126.6 | 103.0 | 14.9 | 83.0 |
| S3-PC1 | 40.0 | 76.5 | 35.2 | 128.2 | 105.8 | 15.9 | 88.3 |
| S3-PC3 | 55.0 | 74.8 | 32.6 | 131.0 | 110.3 | 14.5 | 80.6 |

* Força máxima no ensaio de pré-fendilhação.

Os resultados apresentados na Tabela 3.7 permitem constatar que, para cada percentagem de CFRP testada, o desempenho do reforço foi semelhante, independentemente de existir pré-fendilhação ou não e independentemente do nível de pré-fendilhação instalado.

Em termos da carga de cedência das armaduras (F_{sy}) verifica-se que a da viga com um laminado, S1-PC1, apresentou um valor 0.64% inferior ao registado na viga sem pré-fendilhação S1-M. Nas vigas pré-fendilhadas e reforçadas com dois laminados, em relação à viga S2-M, o valor de F_{sy} foi 2.88% inferior para a viga S2-PC1 e 0.72% superior para a viga S2-PC2. Ainda em termos de carga de cedência das armaduras e, tendo como base o valor alcançado na viga S3-M, a viga com três laminados S3-PC1 registou um acréscimo de apenas 0.66% e a viga S3-PC3 apresentou uma diminuição de 1.58%. Em termos médios, o acréscimo da carga de cedência das armaduras (F_{sy}) das vigas pré-fendilhadas e reforçadas com 1, 2 e 3 laminados foi igual a 95%, 93.5% e 99.7% do acréscimo de F_{sy} verificado nas vigas semelhantes sem pré-fendilhação do betão.

Em termos da carga máxima (F_{max}), verifica-se que a viga com um laminado S1-PC1 apresentou uma redução percentual de 2.26%, relativamente à viga S1-M. Já as vigas pré-fendilhadas e reforçadas com dois e três laminados registaram valores de carga máxima ligeiramente superiores aos registados nas respetivas vigas sem pré-fendilhação (S2-M e S3-M, respetivamente). O valor de F_{max} das vigas com dois laminados S2-PC1 e S2-PC2 foi respetivamente 3.31% e 1.61% superior ao da viga S2-M. O valor de F_{max} das vigas com três laminados S3-PC1 e S3-PC3 foi respetivamente 1.26% e 3.43% superior ao da viga S3-M. Em termos médios, o acréscimo da carga máxima (F_{max}) das vigas pré-fendilhadas e

reforçadas com 1, 2 e 3 laminados foi igual a 92.1%, 105.1% e 104.9% do acréscimo de F_{max} verificado nas vigas semelhantes sem pré-fendilhação do betão.

No que se refere aos valores da extensão máxima registada nos laminados (ε_{CFRP}^{max}), verificaram-se elevados níveis de mobilização do reforço de CFRP (superiores a 81%), independentemente da percentagem de CFRP e das vigas terem estado, ou não, sujeitas ao ensaio de pré-fendilhação. Como já foi referido anteriormente, na viga S1-PC1 o valor máximo da extensão registada no CFRP refere-se ao extensómetro 2 (Ext. 2 - ver Figura 3.16). No entanto, nesta viga, o modo de rotura foi o esgotamento da capacidade resistente à tração do CFRP na zona central da viga, tendo havido assim, o aproveitamento em pleno do material de reforço. Desta forma, verifica-se que nas vigas reforçadas com um laminado, independentemente de existir ou não pré-fendilhação, o nível de mobilização do CFRP foi semelhante (o modo de rotura das duas vigas foi a rotura do CFRP). Nas vigas pré-fendilhadas e reforçadas com dois laminados, e tendo como base a viga sem pré-fendilhação S2-M, verifica-se que a viga S2-PC1 registou uma extensão ε_{CFRP}^{max} praticamente igual (as vigas S2-PC1 e S2-M tiveram o mesmo modo de rotura (rotura do CFRP)), enquanto que a viga S2-PC2 apresentou uma extensão ε_{CFRP}^{max} inferior (o modo de rotura desta viga foi o destacamento do CFRP, embora tenha sido alcançado um grau de mobilização bastante elevado (92.8%)). Em relação às vigas pré-fendilhadas e reforçadas com três laminados, o modo de rotura de todos os modelos, com e sem pré-fendilhação, ocorreu pelo destacamento do CFRP. Em relação à extensão ε_{CFRP}^{max} obtida na viga S3-M, a viga S3-PC1 registou um valor de ε_{CFRP}^{max} ligeiramente superior e a viga S3-PC3 apresentou um valor de ε_{CFRP}^{max} ligeiramente inferior. Apesar de se verificar uma diminuição da efetividade do reforço com o aumento da percentagem de CFRP, os níveis de mobilização do CFRP nas vigas com três laminados foram bastante elevados.

As vigas com a mesma percentagem de CFRP e sujeitas a níveis de dano diferentes alcançaram resultados muito semelhantes. Comparando as vigas com dois laminados, S2-PC1 e S2-PC2 (com dano superior), os valores de carga máxima (F_{max}) foram de 67.5 kN e 70.0 kN, respetivamente. Independentemente do nível de dano aplicado inicialmente, foi obtido, em ambas as vigas, um aumento de rigidez e de capacidade de carga muito idênticos. O mesmo se passou com a carga de cedência das armaduras (F_{sy}), tendo sido registados os valores de 115.6 kN (S2-PC1) e 113.7 kN (S2-PC2). O nível de mobilização do CFRP na viga S2-PC2 (viga com dano superior) foi ligeiramente inferior ao da viga S2-PC1. Com efeito,

apesar de se terem registado modos de rotura diferentes (na viga S2-PC2 foi por destacamento do CFRP e na viga S2-PC1 foi por rotura do CFRP), verificou-se que o destacamento do reforço ocorrido na viga S2-PC2 se deu para um nível muito elevado de mobilização do CFRP (cerca de 93%).

À semelhança do verificado na solução de reforço com dois laminados, também as vigas S3-PC1 e S3-PC3, reforçadas com três laminados de CFRP, apresentaram resultados muito análogos em termos de carga máxima (F_{max}) e carga de cedência das armaduras (F_{sy}), independentemente do nível de pré-fendilhação imposto. Contrariamente ao observado nas vigas com dois laminados, o valor mais elevado de F_{max} (131.0 kN) ocorreu na viga onde foi imposto um maior dano inicialmente (viga S3-PC3) e o valor mais elevado de F_{sy} (76.5 kN) verificou-se na viga com menos dano associado (viga S3-PC1). O modo de rotura destas vigas ocorreu pelo destacamento do reforço de CFRP, apresentando um grau de mobilização que variou entre os 81% (viga S3-PC3) e os 88% (viga S3-PC1).

Capítulo 4

Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros

No presente capítulo são apresentadas as conclusões gerais da investigação realizada no âmbito da presente dissertação. Além disso, são apontadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

4.1. CONCLUSÕES GERAIS

A investigação experimental realizada no âmbito da presente dissertação teve como objetivo avaliar o efeito da pré-fendilhação do betão, no comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos. O nível de dano (pré-fendilhação) e a percentagem de reforço de CFRP foram os parâmetros que distinguiram as soluções de reforço testadas. O comportamento de vigas pré-fendilhadas e reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos foi comparado com o de vigas semelhantes, com a diferença de não existir pré-fendilhação antes da execução do reforço. As principais conclusões extraídas deste trabalho de investigação foram às seguintes:

- A aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado, independentemente da percentagem de CFRP e independentemente do nível de pré-fendilhação instalado previamente à aplicação do reforço, permitiu aumentar a capacidade de carga das vigas. Tendo como base o comportamento da viga de referência sem CFRP, as soluções de reforço de CFRP testadas proporcionaram acréscimos de carga correspondente à cedência das armaduras que variaram entre os 9.5% e os 35.2%. Tendo ainda como base de comparação a viga de referência sem CFRP, as soluções de reforço de CFRP testadas proporcionaram acréscimos de carga máxima que variaram entre os 38.7% e os 110.3%. Neste contexto, refira-se que a solução com três laminados de CFRP duplicou a capacidade de carga máxima da viga de referência sem CFRP, atingindo aumentos de 105.8% a 110.3%, enquanto que as soluções de reforço com dois laminados proporcionaram acréscimos de capacidade de carga máxima superiores a 80%.

- Independentemente do nível de pré-fendilhação instalado antes da aplicação do reforço nas vigas, os ganhos de resistência obtidos foram proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_f), ou seja, maiores valores de ρ_f garantiram maiores aumentos da capacidade resistente. O reforço com 1, 2 e 3 laminados conduziu, em termos médios, a acréscimos de carga de cedência das armaduras de 9.5%, 21.5% e 33.9%, respetivamente. O reforço com 1, 2 e 3 laminados conduziu, em termos médios, a acréscimos de carga máxima de 38.7%, 84.1% e 108.1%.
- As extensões máximas registadas, nos extensómetros elétricos aplicados nos laminados de CFRP, variaram entre 14.5‰ e 17.7‰. Tendo em consideração que o valor médio da extensão máxima obtido no ensaio de caracterização do laminado (ensaio de tração uniaxial) foi de 18‰, o grau de mobilização do reforço de CFRP nas configurações de reforço testadas, e independentemente do nível de pré-fendilhação, foi superior aos 81% chegando em alguns casos aos 100% (vigas em que se verificou a rotura do CFRP).
- Os modos de rotura observados nas vigas pré-fendilhadas e reforçadas com CFRP foram dois: rotura do CFRP e destacamento do CFRP. Em todas as vigas testadas, a rotura ocorreu com as armaduras longitudinais tracionadas em cedência. A rotura por esgotamento da capacidade resistente à tração do CFRP ocorreu na viga reforçada com um laminado e numa das vigas reforçadas com dois laminados (viga S2-PC1). O destacamento do laminado de CFRP foi o modo de rotura observado numa das vigas reforçadas com dois laminados (viga S2-PC2) e nas duas vigas reforçadas com três laminados inseridos. O destacamento do reforço ocorreu para níveis elevados de mobilização do CFRP (cerca de 93% no caso da viga S2-PC2 e entre os 81% e os 88% no caso das vigas reforçadas com três laminados).
- As curvas de comportamento força vs flecha a meio vão correspondentes ao ensaio à rotura das vigas permitiram concluir que, numa fase inicial, as vigas pré-fendilhadas e posteriormente reforçadas com laminados de CFRP inseridos apresentaram menor rigidez do que as vigas semelhantes mas sem pré-fendilhação do betão. Com efeito, tipicamente as vigas pré-fendilhadas e posteriormente reforçadas com laminados de CFRP inseridos apresentaram dois estados principais de comportamento: betão fendilhado com o aço não plastificado e betão fendilhado após a cedência das armaduras (nas vigas reforçadas com CFRP sem pré-fendilhação existe ainda o estado associado à fase inicial em que o betão não se encontra fendilhado).

- Para cada uma das percentagens de reforço de CFRP testadas, verificou-se que, independentemente do nível de dano (nível de pré-fendilhação) que as vigas apresentavam na altura do reforço de CFRP, os valores da carga de cedência das armaduras, da carga máxima e do nível de mobilização do reforço de CFRP, aquando da rotura das vigas, foram similares aos alcançados em vigas semelhantes mas sem pré-fendilhação do betão. No caso das vigas reforçadas com dois e três laminados de CFRP, onde foram estudados dois níveis de dano, verificou-se que a eficácia das soluções de reforço não foi afetada com o aumento do nível de dano (nível de pré-fendilhação). Desta forma, conclui-se que os níveis de dano analisados no presente programa experimental não comprometeram a eficácia da técnica de reforço à flexão de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos.

4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A presente dissertação corresponde a mais um contributo ao nível do conhecimento existente em termos do uso da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado. Em termos de desenvolvimentos futuros, alguns aspetos devem ser objeto de análise:

- Avaliar o efeito da aplicação de laminados de CFRP pré-tensionados na eficácia da técnica NSM quando aplicada no reforço à flexão de elementos de betão armado.
- Avaliar o comportamento a longo prazo dos reforços de CFRP aplicados de acordo com a técnica NSM.

Capítulo 5

Referências bibliográficas

- ACI 440.2R-02, 2007, “*Guide for the Design and Construction of Reinforced Concrete Structures Reinforced with Externally FRP Systems*”, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 440, 55 pp.
- Appleton, J. e Gomes, A., 1997, “*Reforço de estruturas de betão armado por encamisamento das secções*”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE), nº 42.
- Araújo, C. M., 2002, “*Reforço de Vigas de Concreto à Flexão e ao Cisalhamento com Tecidos de Fibra de Carbono*”, Tese de Doutoramento, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Março, 153 pp.
- Asplund, S.O., 1949, “*Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement*”, Journal of the American Concrete Institute, vol. 20, nº6, pp. 397-406.
- Azevedo, C. R., 2011, “*Comportamento monotónico e cíclico de vigas de betão armado reforçadas à flexão por inserção de laminados de CFRP*”, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 91 pp.
- Azevedo, D., 2008, “*Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP - Recomendações para Dimensionamento*”, Tese de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Novembro, 238 pp.
- Barros, J. A. O. e Costa, I., 2009, “*Flexural and shear strengthening of RC beams with composites materials – The influence of cutting steel stirrups to install CFRP strips*”, 9th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9), Sidney, Australia, 13-15 July.

- Barros, J. A. O., Dias, S. J. E. e Fortes, A. S., 2005, “*Near surface mounted technique for the flexural and shear strengthening of concrete beams*”, Proceedings of the INCOS 05 - International Conference on Concrete for Structures, Coimbra, Portugal, July 7-8, pp. 229-236.
- Barros, J. A. O. e Koczynia, R., 2008, “*Possibilities and challenges of NSM for the flexural strengthening of RC structures*”, Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2008), Zurich, Switzerland, 22-24 July 2008.
- Barros, J. A. O., Sena-Cruz, J., Dias, S., Ferreira, D. e Fortes, A., 2007, “*Nova abordagem do reforço de estruturas de betão com materiais compósitos*”, Revista INGENIUM, Ordem dos Engenheiros, II série, nº98, Março/Abril, pp. 84-90.
- Blaschko, M. e Zilch, K., 1999, “*Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits*”, 12th International Conference on Composites for Construction, Paris, France.
- Carolin, A., 2003, “*Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*”, Doctoral Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Sweden, June, 190 pp.
- Carvalho, T. S., 2010, “*Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP*”, Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Setembro, 185 pp.
- Casadei, P., Galati, N., Parreti, R. e Nanni, A., 2003, “*Strengthening of a bridge using two FRP technologies*”, Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies, ACI International SP-215, Editors: Sami Rizkalla and Antonio Nanni, American Concrete Institute, pp. 219-237.
- Coelho, F. M. M., 2010, “*Reforço Sísmico de pontes com FRP’s*”, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 176 pp.
- 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, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Março, 203 pp.
- Dias, S. J. E., 2008, “*Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com técnica de inserção de laminados de CFRP*”, Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, Julho, 391 pp.
- Dias, S. J. E., Juvandes, L. F. P. e Figueiras, J. A., 2004, “*Efeito da Pré-fendilhação do Betão no Comportamento à Flexão de Faixas de Laje Reforçadas com Sistemas Compósitos de CFRP*”, Revista Engenharia Civil · UM, Universidade do Minho, nº 19, Janeiro, pp. 41-54.
- Dias, S. J. E., Juvandes, L. e Figueiras, J., 2006, “*Estruturas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas de CFRP*”, Revista IBRACON de Estruturas, vol. 2, nº2, Junho, pp. 252-275.
- El-Hacha, R. e Rizkalla, S. H., 2004, “*Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures*”, ACI Structural Journal, vol. 101, nº5, September-October, pp. 717-726.
- EN 10002-1, 1990, “*Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)*”, European standard, CEN, 35 pp.
- Fardis, M. N., 2009, “*Seismic design, assesment and retrofitting of concrete buildings – based on EN-Eurocode 8*”, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Springer, USA.
- Fayyadh, M. M. e Razak, H. A., 2012, “*Assessment of effectiveness of CFRP repaired RC beams under different damage levels based on flexural stiffness*”, Construction and Building Materials Journal, vol. 37, December, pp. 125-134.
- Firmo, J., 2010, “*Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP)*”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Dezembro, 288 pp.

- Fonseca, S. B. C., 2005, “*Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras usadas na Engenharia Civil – Características e Aplicações*”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 142 pp.
- Fortes, A. S. e Barros, J., 2002, “*Desempenho de três técnicas de reforço à flexão de vigas de betão armado com CFRP*”, Encontro Nacional Betão Estrutural 2002, Lisboa, pp. 233-242.
- 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, 9 pp.
- 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, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, nº52, pp. 33-42.
- Juvandes, L. F. P., Marques, A. e Figueiras, J., 1996, “*Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas de Betão*”, Relatório técnico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Março, 112 pp.
- 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, 16-18 de Julho.
- Marques, N. F. A. A., 2008, “*Procedimentos de Aplicação e Controlo de Qualidade para Reforço com Sistemas Compósitos de FRP*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, 146 pp.
- Martins, J. G. e Soares, C. M., 2006, “*Reforço de Estruturas de betão Armado com CFRP - série Reabilitação*”, Universidade Fernando Pessoa, Lisboa, 252 pp.
- 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, pp.60-68.

- NP EN 1992-1-1, 2010, “*Projeto de estruturas de betão armado – Regras gerais e regras para edifícios*”, IPQ - Instituto Português da Qualidade, Março, 259 pp.
- NP EN 12390-3, 2011, “*Ensaaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes.*”, IPQ - Instituto Português da Qualidade.
- Rodrigues, C. C., 1993, “*Comportamento da Ligação Aço-Resina-Betão em Elementos Estruturais*”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Rodrigues, C. C., 2005, “*Comportamento às acções cíclicas de pilares de betão armado reforçados com materiais compósitos*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Janeiro.
- Rodrigues, C. C., 2010, “*Reforço com chapas coladas*”, Actas de apoio à disciplina de “Reforço e Reparação de Estruturas”, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Rodrigues, T. J. S., 2009, “*Reforço de Estruturas com FRP’s*”, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 178 pp.
- Romeira, T. C. B., 2012, “*Estudo do comportamento de vigas de betão simples e reforçadas com CFRP, sujeitas a envelhecimento*”, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Junho, 155 pp.
- Ross, C. A., Jerome D. M., Tedesco J. W. e Hughes M. L., 1999, “*Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates*”, ACI Structural Journal, vol. 96, nº 2, pp. 212-220.
- S&P, 2013, “*Technical Data Sheet - S&P Resin 220 epoxy adhesive*”, S&P Clever Reinforcement Company, CH-6440, Brunnen, Switzerland, <http://www.sp-reinforcement.eu>, acedido em 06-05-2013.
- Sena-Cruz, J. M., Barros, J. A., Coelho, M. R. e Silva, L. F., 2012, “*Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading*”, Construction and Building Materials Journal, vol. 29, April, pp. 175-182.

Shehata, I., Shehata, L., Santos, E. e Simões, M., 2009, “*Strengthening of reinforced concrete beams in flexure by partial jacketing*”, *Materials and Structures*, nº 42, May, pp. 495-504.