



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Manuel Magalhães Coelho Lima da Costa

Efeito do carregamento cíclico e da pré-fendilhação do betão no comportamento de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Manuel Magalhães Coelho Lima da Costa

Efeito do carregamento cíclico e da pré-fendilhação do betão no comportamento de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos

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

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

# Agradecimentos

---

Nesta secção desejo expressar o meu agradecimento às pessoas e entidades que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Salvador Dias, meu orientador, quero expressar a minha profunda gratidão pela disponibilidade, orientação, dedicação, interesse e apoio demonstrados ao longo da realização deste trabalho.

Ao aluno de doutoramento, Mohammadreza Hosseini, pela ajuda e pelos seus ensinamentos transmitidos durante a realização do trabalho experimental.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST), António Matos e Marco Peixoto, pela colaboração na realização dos ensaios experimentais.

À empresa Casais, S.A., pelo apoio prestado em termos da conceção das lajes 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 FCOMP-01-0124-FEDER-014844.

Aos meus amigos quero exprimir a minha gratidão por todo o apoio e amizade demonstrados na realização deste trabalho.

O agradecimento mais especial vai para aqueles sempre me apoiaram incondicionalmente: a minha mãe, o meu pai e o meu irmão. O meu muito obrigado.



# Resumo

---

A presente dissertação aborda a investigação efetuada no âmbito do comportamento de lajes de betão armado reforçadas à flexão com a técnica da inserção (técnica NSM) de laminados de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) em entalhes efetuados no betão de recobrimento. Neste contexto, é estudado o efeito da pré-fendilhação do betão e do carregamento cíclico no comportamento à rotura de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos.

Este trabalho é iniciado com a revisão bibliográfica, onde é apresentado o estado atual de conhecimento relativamente à utilização de materiais compósitos de CFRP no reforço à flexão de estruturas de betão armado no âmbito da temática da presente dissertação. De seguida, é apresentado o programa experimental no qual foi avaliado o efeito da pré-fendilhação e do carregamento cíclico no comportamento à rotura de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos. Foram analisados dois níveis de dano (pré-fendilhação) e dois níveis de carregamento cíclico. O comportamento à rotura das lajes pré-fendilhadas e reforçadas à flexão, com laminados de CFRP inseridos é comparado com o de uma laje semelhante, com a diferença de esta não ter sido pré-fendilhada. O comportamento à rotura das lajes reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos e sujeitas a carregamento cíclico é comparado com o de uma laje semelhante, com a diferença de esta não ter sido submetida a carregamento cíclico. Por fim, são apresentadas as conclusões gerais obtidas com a realização desta dissertação, sendo posteriormente indicadas perspetivas de desenvolvimento futuro.

**Palavras-chave:** Lajes de betão armado; Pré-fendilhação; Reforço à flexão; Laminados de CFRP inseridos; Carregamento cíclico; Comportamento experimental.



# Abstract

---

The current dissertation deals with the reasearch carried out on the behavior of reinforced concrete (RC) slabs flexural strengthened with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) laminates according to the NSM (Near Surface Mounted) technique, which is based on introducing CFRP laminates into slits opened on the concrete of the slabs. Therefore, this work aims to study the effect of pre-cracking and cyclic loading on the behavior until failure of RC slabs flexural strengthened with NSM CFRP laminates.

This work starts with the literature review about the current knowledge on the use of composite materials, such as CFRP, for the flexural strengthening of RC structures. Afterwards, the experimental program carried out on this work is described, which purpose is to evaluate the effect of pre-cracking and cyclic loading on the behavior until failure of RC slabs flexural strengthened with NSM CFRP laminates. It were analyzed two levels of damage (pre-cracking) and two levels of cyclic loading. The behavior until failure of pre-cracked RC slabs flexural strengthened with NSM CFRP laminates is compared with similar RC slab without pre-cracks before the CFRP application. The behavior until failure of RC slabs flexural strengthened with NSM CFRP laminates and subsequently subjected to a cyclic loading is compared with similar RC slab without cyclic loading. Finally, the most relevant conclusions obtained in this research are presented and the prospects for future developments are indicated.

**Keywords:** Reinforced concrete slabs; Pre-cracking; Flexural strengthening; NSM CFRP laminates; Cyclic loading; Experimental behavior.





# Índice geral

---

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....        | <b>i</b>   |
| <b>RESUMO/PALAVRAS-CHAVE</b> ..... | <b>iii</b> |
| <b>ABSTRACT/KEYWORDS</b> .....     | <b>v</b>   |
| <b>ÍNDICE GERAL</b> .....          | <b>vii</b> |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....     | <b>xi</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....     | <b>xv</b>  |

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 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 - Soluções tradicionais de reforço de estruturas de betão armado ..... | 2.1  |
| 2.1.1 - Reforço por colagem de chapas metálicas .....                      | 2.2  |
| 2.1.2 - Reforço por encamisamento das secções com betão armado.....        | 2.2  |
| 2.1.3 - Aplicação de pré-esforço exterior .....                            | 2.3  |
| 2.2 - Materiais compósitos .....   | 2.4  |
| 2.2.1 - Fibras .....   | 2.4  |
| 2.2.2 - Matriz.....  | 2.6  |
| 2.2.3 - Material compósito de CFRP .....                                   | 2.6  |
| 2.3 - Técnicas de reforço usando materiais compósitos de CFRP .....        | 2.7  |
| 2.3.1 - Técnica da colagem externa com CFRP (EBR).....                     | 2.7  |
| 2.3.2 - Técnica da inserção (NSM).....                                     | 2.9  |
| 2.3.3 - Comparação entre as técnicas EBR e NSM .....                       | 2.12 |

|   |      |
|---|------|
| 2.4 - Reforço à flexão de lajes de betão armado com CFRP .....  | 2.15 |
| 2.5 - Reforço à flexão com compósitos de CFRP de estruturas de betão armado pré-fendilhadas .....                               | 2.24 |
| 2.6 - Reforço à flexão com compósitos de CFRP de estruturas de betão armado sujeitas a carregamento cíclico .....               | 2.29 |
| 2.6.1 - Comportamento à fadiga do betão e do aço .....  | 2.29 |
| 2.6.2 - Comportamento à fadiga do material compósito de CFRP .....  | 2.30 |
| 2.6.3 - Comportamento à flexão de vigas de betão armado reforçadas com compósitos de CFRP sujeitas a carregamento cíclico ..... | 2.31 |
| 2.6.4 - Modos de rotura .....   | 2.33 |

### **CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL**

|  |      |
|--|------|
| 3.1 - Conceção dos modelos .....   | 3.1  |
| 3.2 - Caracterização dos materiais .....   | 3.5  |
| 3.2.1 - Betão .....  | 3.5  |
| 3.2.2 - Aço .....  | 3.6  |
| 3.2.3 - Laminados de CFRP .....  | 3.7  |
| 3.2.4 - Adesivo .....  | 3.7  |
| 3.3 - Aplicação do reforço de CFRP .....   | 3.8  |
| 3.4 - Sistema de ensaio e instrumentação das lajes .....                                     | 3.10 |
| 3.5 - Apresentação e análise dos resultados .....  | 3.13 |
| 3.5.1 - Lajes pré-fendilhadas e posteriormente reforçadas à flexão (S2L-PC1 e S2L-PC2) ..... | 3.13 |
| 3.5.1.1 - Critérios para escolha dos níveis de pré-fendilhação .....                         | 3.13 |
| 3.5.1.2 - Ensaio de pré-fendilhação das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 .....                        | 3.14 |
| 3.5.1.3 - Ensaio de rotura das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 .....                                 | 3.15 |
| 3.5.1.4 - Efeito da pré-fendilhação .....  | 3.20 |

|   |      |
|---|------|
| 3.5.2 - Lajes submetidas a carregamento cíclico (S2L-F1 e S2L-F2) .....                       | 3.23 |
| 3.5.2.1 - Critérios para escolha dos níveis de carregamento cíclico.....                      | 3.23 |
| 3.5.2.2 - Ensaio monotónico até à rotura das lajes submetidas a carregamento cíclico<br>..... | 3.25 |
| 3.5.2.3 - Efeito do carregamento cíclico.....   | 3.30 |

## **CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

|  |     |
|--|-----|
| 4.1 - Conclusões gerais .....  | 4.1 |
| 4.1.1 - Efeito da pré-fendilhação antes da aplicação do reforço de CFRP (lajes S2L-PC1 e<br>S2L-PC2 vs laje S2L-PC0) ..... | 4.1 |
| 4.1.2 - Efeito do carregamento cíclico (lajes S2L-F1 e S2L-F2 vs laje S2L-F0).....   | 4.3 |
| 4.2 - Conclusões gerais .....  | 4.4 |

## **CAPÍTULO 5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



# Índice de figuras

---

|   |      |
|---|------|
| Figura 1.1 - Construção nova vs reabilitação e reforço de edifícios existentes (INE, 2013) ..   | 1.1  |
| Figura 2.1 - Reforço de uma viga através da colagem de chapas metálicas (Stap, 2015).....   | 2.2  |
| Figura 2.2 - Reforço de uma viga através de encamisamento com betão armado (Sena-Cruz <i>et al.</i> , 2011).....  | 2.3  |
| Figura 2.3 - Reforço do viaduto de acesso da Ponte Edgar Cardoso com pré-esforço exterior (Neves, 2012) .....   | 2.3  |
| Figura 2.4 - Diagrama tensão vs extensão de vários tipos de fibras (aramida, carbono e vidro) e de aços tradicionalmente usados em engenharia civil (adaptado de ACI 440R-96, 1996). ....                                 | 2.5  |
| Figura 2.5 - Aplicação de sistemas de reforço de CFRP de acordo com a técnica EBR (Dias, 2001).....   | 2.8  |
| Figura 2.6 - Aplicação da técnica de colagem externa e procedimentos fundamentais de controlo de qualidade da execução do reforço (Dias <i>et al.</i> , 2006).....  | 2.9  |
| Figura 2.7 - Tipos de CFRP utilizados no reforço com a técnica NSM (De Lorenzis e Teng, 2007).....  | 2.10 |
| Figura 2.8 - Execução do reforço à flexão de uma viga de betão armado com laminados de CFRP inseridos (Dias, 2008).....   | 2.11 |
| Figura 2.9 - Aplicação da técnica da inserção e procedimentos fundamenttais de controlo de qualidade da execução do reforço (Dias, 2008). ....  | 2.11 |
| Figura 2.10 - Grau de ancoragem conferido pela técnica de reforço EBR e NSM para o mesmo laminado de CFRP (adaptado de Carolin, 2003).....  | 2.12 |
| Figura 2.11 - Momento fletor vs deslocamento a meio vão das vigas ensaiadas por Blaschko e Zilch (1999).....  | 2.13 |
| Figura 2.12 - Configuração dos ensaios realizados por Bonaldo (2008).....   | 2.15 |
| Figura 2.13 - Força vs deslocamento das faixas de laje com betão da classe de resistência: a) C12/16; b) C35/45 e c) C50/60; Aumento de carga: d) de serviço; e) de cedência da armadura e f) máxima (Bonaldo, 2008)..... | 2.17 |

|  |      |
|--|------|
| Figura 2.14 - Geometria das faixas de laje ensaiadas por Dalfré e Barros (2012).....   | 2.20 |
| Figura 2.15 - Detalhes das séries SL15-H/HS, SL30H/HS e SL45H/HS (Dalfré e Barros, 2012)<br>.....  | 2.21 |
| Figura 2.16 - Curvas força média vs deslocamento vertical das faixas de laje ensaiadas por<br>Dalfré e Barros (2012) .....   | 2.22 |
| Figura 2.17 - Geometria das faixas de laje de cada série ensaiadas por Dias <i>et al.</i> (2004) ..  | 2.25 |
| Figura 2.18 - Padrão de pré-fendilhação imposto aos modelos ensaiados por Dias <i>et al.</i> (2004).<br>.....  | 2.26 |
| Figura 2.19 - Curvas médias carga total vs deslocamento central das faixas de laje ensaiadas<br>por Dias <i>et al.</i> (2004) .....  | 2.26 |
| Figura 2.20 - Comportamento do aço e betão sob carregamento cíclico (Oudah e El-Hacha,<br>2013) .....  | 2.30 |
| Figura 2.21 - Comportamento do material de CFRP sujeito a carregamento cíclico (Heffernan,<br>1997) .....  | 2.31 |
| Figura 2.22 - Amplitude de tensões na armadura longitudinal vs número de carregamentos<br>cíclicos em vigas reforçadas e não reforçadas com FRP (Kim e Heffernan, 2008). ..... | 2.32 |
| Figura 2.23 - Evolução dos parâmetros referentes a vigas de betão reforçadas à flexão com<br>CFRP em termos de fadiga (Kim e Heffernan, 2008).....                             | 2.33 |
| Figura 2.24 - Sequência de rotura de uma viga de betão armado reforçada com FRP sujeita a<br>carregamento de fadiga (Kim e Heffernan, 2008) .....                              | 2.33 |
| Figura 2.25 - Secção transversal das vigas de referência e reforçada de acordo com a técnica<br>NSM (Badawi e Soudki, 2009).....   | 2.37 |
| Figura 2.26 - Nível de carregamento vs número de ciclos suportados pelas vigas (Badawi e<br>Soudki, 2009).....   | 2.37 |
| Figura 2.27 - (a) Geometria das lajes; (b) Configuração dos ensaios realizados por Fernandes<br><i>et al.</i> (2014).....  | 2.38 |
| Figura 2.28 - Curvas força vs deslocamento dos ensaios monotónicos pós-fadiga (Fernandes <i>et al.</i> ,<br>2014) .....  | 2.39 |
| Figura 3.1 - Geometria e armadura das lajes ensaiadas e tipo de ensaio (dimensões em mm)<br>.....  | 3.2  |

|  |      |
|--|------|
| Figura 3.2 - Aspetto das armaduras após montagem e colocação na cofragem. ....   | 3.3  |
| Figura 3.3 - Betonagem: a) das lajes; b) dos provetes cilíndricos para caracterização do betão<br>.....  | 3.3  |
| Figura 3.4 - Aspetto das lajes: a) após betonagem; b) final após a descofragem.....  | 3.3  |
| Figura 3.5 - Solução de reforço com laminados de CFRP inseridos adotada (dimensões em mm)<br>.....   | 3.4  |
| Figura 3.6 - Provetes cilíndricos antes da realização do ensaio de compressão uniaxial.....  | 3.5  |
| Figura 3.7 - Caracterização das propriedades mecânicas do betão à data da realização dos<br>ensaios das lajes: a) módulo de elasticidade; b) resistência média à compressão..... | 3.5  |
| Figura 3.8 - Modo de rotura dos provetes de betão .....  | 3.6  |
| Figura 3.9 - Caracterização do aço utilizado nas armaduras das lajes: a) ensaio de tração<br>uniaxial; b) modo de rotura dos provetes .....                                      | 3.6  |
| Figura 3.10 - Caracterização das propriedades mecânicas do laminado de CFRP: a) ensaio à<br>tração uniaxial; b) modo de rotura do laminado.....                                  | 3.7  |
| Figura 3.11 - Sequência de aplicação do reforço à flexão de uma laje pré-fendilhada usando a<br>técnica NSM com laminados de CFRP .....  | 3.9  |
| Figura 3.12 - Esquema geral de ensaio à flexão das lajes de betão armado .....   | 3.10 |
| Figura 3.13 - Posição dos LVDT's nas lajes ensaiadas (dimensões em mm) .....   | 3.11 |
| Figura 3.14 - Posição dos extensómetros nas armaduras de aço (dimensões em mm) .....   | 3.12 |
| Figura 3.15 - Extensómetros colocados nos laminados de CFRP: a) posição dos extensómetros;<br>b) pormenor da colagem de um extensómetro no laminado (dimensões em mm).....       | 3.12 |
| Figura 3.16 - Identificação da fenda existente na laje S2L-PC2 antes do ensaio de pré-<br>fendilhação .....  | 3.13 |
| Figura 3.17 - Laje S2L-PC1: a) padrão de fendilhação após a realização do ensaio de pré-<br>fendilhação; b) após a aplicação do reforço de CFRP.....                             | 3.14 |
| Figura 3.18 - Laje S2L-PC2: a) padrão de fendilhação após a realização do ensaio de pré-<br>fendilhação; b) após a aplicação do reforço de CFRP .....                            | 3.15 |
| Figura 3.19 - Laje S2L-PC1 nas seguintes fases: a) imediatamente antes do ensaio à rotura; b)<br>no momento em que a laje atinge a sua capacidade de carga máxima.....           | 3.16 |

|  |      |
|--|------|
| Figura 3.20 - Laje S2L-PC2 nas seguintes fases: a) imediatamente antes do ensaio à rotura; b) no momento em que a laje atinge a sua capacidade de carga máxima ..... | 3.16 |
| Figura 3.21 - Laje S2L-PC1 após o ensaio à rotura e pormenor do modo de rotura. ....   | 3.17 |
| Figura 3.22 - Laje S2L-PC2 após o ensaio à rotura e pormenor do modo de rotura .....   | 3.17 |
| Figura 3.23 - Padrão de fendilhação final das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2.....   | 3.17 |
| Figura 3.24 - Curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2.....  | 3.18 |
| Figura 3.25 - Variação das extensões registadas nos laminados de CFRP no ensaio à rotura da laje: a) S2L-PC1; b) S2L-PC2 .....                                       | 3.19 |
| Figura 3.26 - Curva de comportamento força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas com e sem pré-fendilhação .....  | 3.21 |
| Figura 3.27 - Laje S2L-F1 nas seguintes fases: a) imediatamente antes do ensaio à rotura; b) no momento em que a laje atinge a sua capacidade de carga máxima .....  | 3.26 |
| Figura 3.28 - Laje S2L-F2 nas seguintes fases: a) imediatamente antes do ensaio à rotura; b) no momento em que a laje atinge a sua capacidade de carga máxima .....  | 3.26 |
| Figura 3.29 - Laje S2L-F1 após o ensaio à rotura e pormenor do modo de rotura.....   | 3.27 |
| Figura 3.30 - Laje S2L-F2 após o ensaio à rotura e pormenor do modo de rotura.....   | 3.27 |
| Figura 3.31 - Padrão de fendilhação final das faixas de laje S2L-F1 e S2L-F2: a) vista superior; b) vista lateral.....   | 3.27 |
| Figura 3.32 - Curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão das lajes S2L-F1 e S2L-F2 .....   | 3.28 |
| Figura 3.33 - Variação das extensões registadas nos laminados de CFRP no ensaio à rotura da laje: a) S2L-F1; b) S2L-F2.....  | 3.29 |
| Figura 3.34 - Curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas com e sem carregamento cíclico.....   | 3.30 |



# Índice de tabelas

---

|   |      |
|---|------|
| Tabela 2.1 - Propriedades das fibras de carbono, vidro e aramida (adaptado de <i>fib</i> - Bulletin 14, 2001).....  | 2.5  |
| Tabela 2.2 - Propriedades típicas do betão, do aço e de fibras de carbono (adaptado de Dias, 2008).....   | 2.6  |
| Tabela 2.3 - Propriedades de resinas utilizadas em materiais compósitos (Dias, 2008). .....   | 2.6  |
| Tabela 2.4 - Programa experimental desenvolvido por Blaschko e Zilch (1999) .....   | 2.13 |
| Tabela 2.5 - Programa experimental desenvolvido por Sena-Cruz <i>et al.</i> (2012) .....  | 2.14 |
| Tabela 2.6 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Sena-Cruz <i>et al.</i> (2012) .....   | 2.14 |
| Tabela 2.7 - Informações sobre a secção transversal, armadura longitudinal e reforço com laminados de CFRP das faixas de laje ensaiadas por Bonaldo (2008)..... | 2.16 |
| Tabela 2.8 - Aumento das cargas de serviço, cedência das armaduras e máxima (Bonaldo, 2008) .....   | 2.17 |
| Tabela 2.9 - Propriedades dos materiais utilizados por Bonaldo (2008).....  | 2.19 |
| Tabela 2.10 - Propriedades que permitem avaliar a eficácia da técnica de reforço (Bonaldo, 2008).....   | 2.20 |
| Tabela 2.11 - Informações gerais das faixas de laje ensaiadas por Dalfré e Barros (2012) ..   | 2.21 |
| Tabela 2.12 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Dalfré e Barros (2012) .....  | 2.23 |
| Tabela 2.13 - Informações gerais sobre as faixas de laje ensaiadas por Dias <i>et al.</i> (2004)...   | 2.25 |
| Tabela 2.14 - Resultados obtidos por Dias <i>et al.</i> (2004) .....  | 2.27 |
| Tabela 2.15 - Programas experimentais com o reforço à flexão com CFRP aplicado em estruturas de betão armado pré-fendilhadas .....                              | 2.28 |
| Tabela 2.16 - Incremento da resistência à fadiga de vigas de betão armado reforçadas com CFRP (adaptado de Kim e Heffernan, 2008). .....                        | 2.32 |
| Tabela 2.17 - Resistência à fadiga de vigas de betão armado reforçadas com CFRP (adaptado de Kim e Heffernan, 2008).....  | 2.34 |
| Tabela 2.18 - Programa experimental realizado por Badawi e Soudki (2009).....   | 2.36 |

---

|   |      |
|---|------|
| Tabela 2.19 - Programa experimental realizado por Fernandes <i>et al.</i> (2014).....   | 2.38 |
| Tabela 2.20 - Resultados das lajes submetidas a ensaio cíclico (Fernandes <i>et al.</i> , 2014) ....                                  | 2.39 |
| Tabela 3.1 - Informações gerais das lajes ensaiadas .....   | 3.4  |
| Tabela 3.2 -Valores das propriedades do aço das armaduras das lajes.....  | 3.7  |
| Tabela 3.3 - Dados referentes ao ensaio de pré-fendilhação.....   | 3.13 |
| Tabela 3.4 - Valores máximos da extensão registados nos laminados de CFRP (lajes S2L-PC1 e S2L-PC2).....                              | 3.20 |
| Tabela 3.5 - Resultados do ensaio à rotura da laje de referência sem CFRP e das lajes reforçadas com e sem pré-fendilhação .....      | 3.22 |
| Tabela 3.6 - Dados referentes ao carregamento cíclico .....   | 3.25 |
| Tabela 3.7 - Valores máximos da extensão registados nos laminados de CFRP (lajes S2L-F1 e S2L-F2).....                                | 3.30 |
| Tabela 3.8 - Resultados do ensaio à rotura da laje de referência sem CFRP e das lajes reforçadas com e sem carregamento cíclico ..... | 3.31 |

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A necessidade de reabilitar e reforçar estruturas constitui nos dias de hoje um dos setores de maior atividade na indústria da construção civil. Dados do Instituto Nacional de Estatística (INE) indicam, de acordo com a Figura 1.1, que entre 2001 e 2011 o volume de reabilitação de edifícios aumentou cerca de 14% relativamente à construção de novos edifícios.

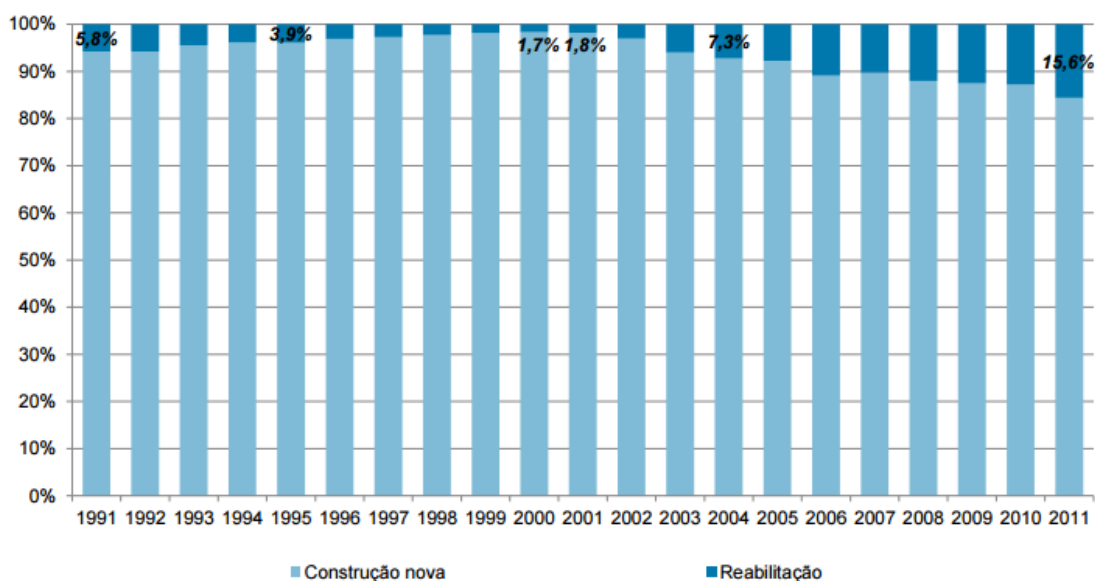


Figura 1.1 - Construção nova vs reabilitação e reforço de edifícios existentes (INE, 2013).

A referida necessidade de reabilitar/reforçar estruturas deve-se a diversos fatores: problemas derivados de carregamentos excessivos; erros de dimensionamento e/ou de construção; alterações dos códigos de dimensionamento para disposições mais severas; mudança do tipo de utilização da estrutura e degradação da estrutura ao longo do tempo.

Neste contexto, e tendo em conta os aspetos menos positivos apresentados pelas técnicas tradicionais de reforço (colagem externa de chapas metálicas, encamisamento das secções com betão armado e aplicação de pré-esforço exterior), começaram a ser aplicados novos materiais de elevado desempenho (compósitos de CFRP), que surgiram noutra contexto (indústrias naval, aeroespacial e automobilística), mas que face às suas propriedades passaram a ser aplicados na Engenharia Civil, designadamente no reforço de estruturas. Este tipo de materiais apresentam como vantagens a elevada resistência à tração, baixo peso específico, elevada resistência à corrosão e fadiga e facilidade de transporte e de aplicação.

A aplicação de materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado pode ser efetuado usando a técnica da colagem externa (EBR) ou por intermédio da técnica da inserção (NSM). A primeira consiste na colagem do CFRP na face externa do elemento a reforçar, mediante o tipo de reforço pretendido, enquanto a segunda técnica consiste na inserção do CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento. Investigação já efetuada demonstrou que a técnica NSM é mais eficaz que a técnica EBR pelo facto da área de colagem conferida ao material compósito de CFRP ser bastante superior à oferecida pela técnica da colagem externa, permitindo prevenir ou mesmo evitar roturas prematuras. No âmbito da utilização da técnica NSM com compósitos de CFRP, estudos já realizados demonstraram que o reforço com laminados de CFRP é mais eficiente do que o reforço com varões de CFRP.

Existem determinadas estruturas de betão armado, como por exemplo o caso de pontes e de viadutos, que ao longo do seu período de vida são solicitadas por um número elevado de carregamentos cíclicos. A necessidade de reforçar lajes de betão armado à flexão com este tipo de carregamento torna necessário que seja avaliado o comportamento destas estruturas reforçadas com laminados de CFRP inseridos quando sujeitas a um carregamento cíclico. Por outro lado, a necessidade de reabilitar ou reforçar estruturas existentes está relacionada, habitualmente, com a presença de betões em estado fendilhado. Nesse sentido, torna-se necessário avaliar a eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP quando aplicada no reforço à flexão de lajes de betão armado que apresentam um determinado padrão de fendilhação previamente à aplicação do reforço de CFRP.

Neste contexto, a presente dissertação terá como propósito estudar o efeito da pré-fendilhação do betão e do carregamento cíclico no comportamento à rotura de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos.

## **1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO**

De um modo geral, e tal como referido anteriormente, com a presente dissertação pretende-se avaliar o efeito da pré-fendilhação do betão e do carregamento cíclico no comportamento à rotura de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM). Neste contexto, a investigação a realizar no âmbito da presente dissertação visa atingir os seguintes objetivos:

- Avaliar a eficácia da técnica da inserção de laminados de CFRP quando aplicada no reforço à flexão de lajes de betão armado 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 lajes de betão armado apresentam no desempenho do reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos em termos do comportamento estrutural das lajes, dos modos de rotura e do nível máximo de mobilização do CFRP.
- Verificar a eficácia da técnica da inserção de laminados de CFRP quando aplicada no reforço à flexão de lajes de betão armado sujeitas a um carregamento cíclico;
- Avaliar o efeito do nível de carregamento cíclico no desempenho de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos em termos do comportamento estrutural das lajes, dos modos de rotura e do nível máximo de mobilização do CFRP;

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos.

O Capítulo 1 (Introdução) é composto pelas considerações gerais, onde se apresenta o tema a abordar na dissertação, pelos objetivos a cumprir com a sua realização e pela organização adotada para a sua estrutura.

No Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) consta o trabalho de pesquisa bibliográfico efetuado sobre o tema desta dissertação. Após uma breve descrição das técnicas de reforço tradicionais, são apresentados os diversos tipos de materiais compósitos existentes, dando particular ênfase aos materiais compósitos de CFRP. Numa fase seguinte são descritas as técnicas de reforço de estruturas de betão armado que utilizam os materiais de CFRP, com destaque para a técnica da inserção do CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM). O capítulo termina com uma abordagem ao efeito da pré-fendilhação do betão e do carregamento cíclico na eficácia do reforço à flexão de estruturas de betão armado com materiais compósitos de CFRP.

O Capítulo 3 (Programa Experimental) contém a descrição detalhada do programa experimental desenvolvido no âmbito da presente dissertação. Assim, são apresentados os modelos ensaiados e as características dos materiais utilizados, é descrita a aplicação do reforço de CFRP aplicado nas lajes, bem como o tipo de ensaios realizados e a instrumentação utilizada nas lajes. De seguida, são apresentados os resultados obtidos, sendo posteriormente efetuada uma análise dos

mesmos. Os resultados experimentais obtidos serão comparados com os que foram alcançados, em ensaio realizado no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, numa laje semelhante às testadas no presente programa experimental, com a diferença de não ter sido pré-fendilhada antes da aplicação do reforço nem lhe ter sido imposto um carregamento cíclico.

No Capítulo 4 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho de investigação desenvolvido no âmbito da presente dissertação. Posteriormente, são apresentadas algumas sugestões visando desenvolvimentos futuros.

A presente dissertação termina com o Capítulo 5, onde são indicadas as referências bibliográficas que serviram de suporte ao trabalho de investigação desenvolvido.

# Capítulo 2

---

## Revisão bibliográfica

Neste capítulo é apresentado, de forma resumida, o estado atual de conhecimento relativamente à temática da dissertação. Na parte inicial são descritas, de forma breve, as técnicas tradicionais de reforço de elementos estruturais de betão armado. No contexto da utilização dos FRP no reforço estrutural, são identificados os tipos de materiais compósitos existentes, bem como os seus constituintes e as suas propriedades. De seguida, são apresentadas técnicas de reforço de estruturas de betão armado com compósitos de CFRP, designadamente as técnicas EBR e NSM, sendo também efetuada uma comparação entre a eficácia das mencionadas técnicas de reforço. Posteriormente, são descritos trabalhos experimentais já realizados no âmbito do reforço à flexão de estruturas de betão que apresentavam um determinado nível de dano previamente à aplicação do reforço de CFRP. O capítulo termina com uma abordagem ao comportamento de estruturas de betão armado com e sem reforço de CFRP, quando submetidas a carregamento cíclico.

### **2.1. SOLUÇÕES TRADICIONAIS DE REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO**

As estruturas de betão são projetadas para um determinado período de vida útil, durante o qual devem exibir níveis adequados de segurança, funcionalidade e durabilidade (Dias, 2008). No entanto, verifica-se em muitas situações que estes requisitos não são cumpridos, levando à necessidade de reabilitar e/ou reforçar as estruturas. As razões que levam à necessidade de intervenção em estruturas de betão armado podem ser: eliminação de danos estruturais derivados de carregamentos excessivos; erros de projeto e/ou de construção; alterações nos códigos de dimensionamento com introdução de disposições mais severas; necessidade de mudança do tipo de utilização (que normalmente implica aumento das cargas que atuam sobre a estrutura); degradação dos materiais e consequente redução da sua capacidade resistente; falta de manutenção e eventos acidentais como sismos, fogo ou cheias.

As técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas em estruturas de betão são a colagem externa de chapas metálicas, o encamisamento das secções com betão armado e a aplicação de pré-esforço exterior (Dias, 2008).

### 2.1.1. Reforço por colagem de chapas metálicas

A colagem externa de chapas metálicas (Figura 2.1) é uma das técnicas mais utilizadas no reforço de estruturas, sendo usada principalmente em elementos estruturais como vigas ou lajes no reforço à flexão e/ou corte. Trata-se de uma técnica que permite uma melhoria considerável da capacidade resistente; não implica alterações importantes da secção transversal do elemento original; não é necessária a interrupção da utilização da estrutura; permite controlo de fendilhação e reposição do monolitismo através de injeção de calda e evita presença de poeiras ou ruídos durante a intervenção (Branco, 2011). Além disso, permite controlar o desempenho da estrutura tanto em estados limites de serviço (através da redução de fendilhação e flechas), como em estado limite último, através do aumento da sua capacidade de carga (Hassanen, 2000). No entanto, este tipo de reforço apresenta alguns aspetos menos positivos (Dias, 2008): possibilidade de corrosão das chapas que pode conduzir à degradação da ligação entre o reforço e o elemento estrutural; dificuldade na manipulação e alteração da forma original das chapas, especialmente em superfícies curvas; necessidade de suportes durante o tempo de cura do adesivo; e, por questões de transporte, as dimensões das chapas são limitadas, podendo dar origem à necessidade de juntas.



Figura 2.1 - Reforço de uma viga através da colagem de chapas metálicas (Stap, 2015).

### 2.1.2. Reforço por encamisamento das secções com betão armado

O reforço de estruturas por encamisamento com betão armado consiste no aumento da secção transversal através da adição de uma armadura suplementar e de uma camada de betão envolvente. Aplica-se essencialmente no reforço de vigas à flexão e ao corte e no caso de reforço de pilares permite aumentar o confinamento. Comparativamente com a técnica por colagem de chapas metálicas, o reforço por encamisamento das secções garante melhor proteção contra o fogo e corrosão das armaduras, apresentando também benefícios do ponto de vista arquitetónico (Gomes e Appleton, 1997). No entanto, implica um aumento considerável



das secções transversais e das cargas permanentes que atuam sobre a estrutura (Dias, 2008). Na Figura 2.2 encontra-se representada a aplicação da técnica de reforço por encamisamento das secções com betão armado de uma viga.



Figura 2.2 - Reforço de uma viga através de encamisamento com betão armado (Sena-Cruz *et al.*, 2011).

### 2.1.3. Aplicação de pré-esforço exterior

A aplicação do pré-esforço é uma técnica com excelentes resultados no reforço à flexão e permite o controlo, em simultâneo, da capacidade de carga e da deformação da estrutura (Dias, 2008). Além disso, permite: fácil instalação, inspeção e substituição dos cabos de pré-esforço; existe possibilidade de retensionar ou destensionar os cabos e há menor peso próprio a atuar sobre a estrutura (Neves, 2012). No entanto, devem ser tomadas precauções em termos de proteção das armaduras de pré-esforço para fazer face à ação do fogo, à corrosão e a atos de vandalismo. Além disso, devem ser estabelecidos sistemas de ancoragem e há possibilidade de aparecimento de esforços adicionais em elementos não reforçados (Dias, 2008). Na Figura 2.3 é possível observar o reforço do viaduto de acesso à Ponte Edgar Cardoso (Figueira da Foz) com pré-esforço exterior.



Figura 2.3 - Reforço do viaduto de acesso à Ponte Edgar Cardoso com pré-esforço exterior (Neves, 2012).

## 2.2. MATERIAIS COMPÓSITOS

A necessidade de reforçar estruturas de betão aumentou significativamente ao longo da última década, tornando-se atualmente numa parcela significativa da atividade de construção civil (Bakis *et al.*, 2002). Considerando os aspetos menos positivos associados às técnicas tradicionais de reforço e a crescente necessidade de reabilitar e reforçar estruturas, começaram a ser aplicados novos materiais de elevado desempenho (compósitos de FRP) que surgiram noutra contexto (indústrias naval, aeroespacial e automobilística) mas que, face ao sucesso que obtiveram na sua aplicação, passaram também a ser aplicados na Engenharia Civil, designadamente no reforço de estruturas.

Os materiais compósitos de FRP são constituídos por duas fases: a fase dispersa (reforço), que é constituída por fibras que são compostas por filamentos de pequeno diâmetro e a fase contínua (a matriz).

### 2.2.1. Fibras

As fibras são responsáveis pelo desempenho mecânico do material compósito, garantindo grande parte da sua resistência e rigidez, sendo por isso a fase que desempenha funções estruturais. Apresentam módulo de elasticidade e resistência à tração elevados, têm baixa densidade e apresentam rotura frágil. As fibras podem ser colocadas apenas numa direção (compósitos de FRP unidirecionais), maximizando a resistência e rigidez na direção das fibras, ou em duas ou mais direções (compósitos de FRP multidirecionais) (Dias, 2008). No âmbito da engenharia civil são utilizados essencialmente três tipos de fibras: vidro, aramida e carbono sendo os respetivos compósitos denominados por GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro), AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida) e CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono).

Na Tabela 2.1 apresentam-se valores típicos de propriedades das fibras de carbono, vidro e aramida e na Figura 2.4 encontra-se representado o diagrama de comportamento tensão vs extensão de diferentes tipos de fibras (carbono, aramida e vidro), bem como do aço de pré-esforço e do aço A500. A análise da Figura 2.4 permite concluir que as fibras de carbono são aquelas que apresentam melhor comportamento mecânico na medida em que as suas propriedades superam as restantes fibras em termos de rigidez e de capacidade máxima resistente.

Tabela 2.1 - Propriedades das fibras de carbono, vidro e aramida (adaptado de *fib* - Bulletin 14, 2001).

| Tipo de fibra       | Módulo de elasticidade (GPa) | Resistência à tração (MPa) | Extensão na rotura (%) |
|---------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------|
| <u>Carbono</u>      |                              |                            |                        |
| Alta resistência    | 215 – 235                    | 3500 – 4800                | 1.4 – 2.0              |
| Elevada resistência | 215 – 235                    | 3500 – 6000                | 1.5 – 2.3              |
| Módulo alto         | 350 – 500                    | 2500 – 3100                | 0.5 – 0.9              |
| Módulo elevado      | 500 – 700                    | 2100 – 2400                | 0.2 – 0.4              |
| <u>Vidro</u>        |                              |                            |                        |
| Tipo E              | 70                           | 1900 – 3000                | 3.0 – 4.5              |
| Tipo S              | 85 – 90                      | 3500 – 4800                | 4.5 – 5.5              |
| <u>Aramida</u>      |                              |                            |                        |
| Corrente            | 70 – 80                      | 3500 – 4100                | 4.3 – 5.0              |
| Elevado desempenho  | 115 – 130                    | 3500 – 4000                | 2.5 – 3.5              |

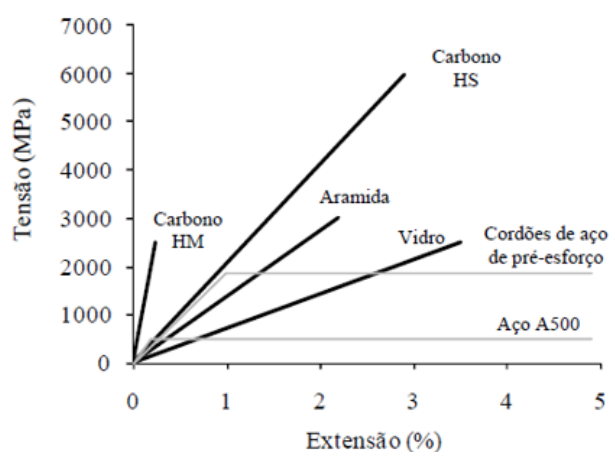


Figura 2.4 - Diagrama tensão vs extensão de vários tipos de fibras (aramida, carbono e vidro) e de aços tradicionalmente usados em engenharia civil (adaptado de ACI 440R-96, 1996).

Tendo em consideração as inúmeras vantagens apresentadas pelas fibras de carbono relativamente às fibras de aramida e de vidro, as intervenções de reforço e reabilitação de estruturas têm sido feitas essencialmente com compósitos de CFRP. Deste modo, e considerando a temática da dissertação, a presente revisão bibliográfica irá apenas abordar o reforço de estruturas de betão armado com compósitos de CFRP.

Na Tabela 2.2 apresentam-se os valores do módulo de elasticidade, da resistência à compressão, da resistência à tração e da densidade das fibras de carbono e de dois materiais tradicionalmente utilizados na engenharia civil: o betão e o aço. Verifica-se que as propriedades mecânicas das fibras de carbono ultrapassam largamente os valores apresentados pelo aço e betão, quer em termos de resistência e de rigidez e que a sua densidade é consideravelmente inferior aos dois materiais anteriormente referidos.

Tabela 2.2 - Propriedades típicas do betão, do aço e de fibras de carbono (adaptado de Dias, 2008)

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

<sup>1</sup>Propriedades das fibras de carbono, não do compósito.

### 2.2.2. Matriz

A matriz constitui a parte contínua do material compósito. Tem como função proporcionar que as fibras funcionem em conjunto, bem como garantir a proteção destas a agressões ambientais. A matriz tem menor rigidez e resistência que as fibras, pelo que influenciam muito pouco as propriedades mecânicas do material compósito. A matriz apresenta outras funções, como evitar a encurvadura das fibras quando o material é solicitado à compressão, assim como garantir a transferência e distribuição das cargas até às fibras. Deste modo, é possível afirmar que a matriz tem influência indireta sobre o comportamento mecânico do material compósito (*fib* - Bulletin 14, 2001). As resinas termoendurecíveis do tipo epóxi têm sido as mais utilizadas pelo facto de terem reduzida viscosidade, boa capacidade de impregnação das fibras, excelente aderência a grande parte dos materiais, boa resistência mecânica, boa resistência a agressões por parte do meio ambiente e não absorverem água (*fib* - Bulletin 14, 2001). Na Tabela 2.3 apresentam-se os valores das propriedades das resinas do tipo poliéster e epóxi.

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

| Resina    | Módulo de elasticidade (GPa) | Resistência à tração (MPa) | Extensão na rotura (%) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------|------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Poliéster | 2.1 – 4.1                    | 20 – 100                   | 1.0 – 6.5              | 1000 – 1450                    |
| Epóxi     | 2.5 – 4.1                    | 55 – 130                   | 1.5 – 9.0              | 1100 - 1300                    |

### 2.2.3. Material compósito de CFRP

Os materiais compósitos de CFRP podem ser divididos em dois grupos: sistemas pré-fabricados unidireccionais e sistemas curados “in situ. Nos primeiros, o elemento de ligação do CFRP ao betão é designado por adesivo e os materiais compósitos apresentam-se na forma de varões ou laminados. O segundo grupo pode ainda ser dividido, mediante a disposição das fibras no material compósito, em sistemas unidireccionais (manta) ou sistemas multidireccionais (tecidos). Nestes casos, a fixação do CFRP ao elemento de betão é efetuada por intermédio de uma resina.

Os materiais compósitos de CFRP têm tido elevada aplicação no âmbito do reforço estrutural pelo facto de terem um reduzido peso específico, uma elevada resistência à corrosão, excelentes propriedades mecânicas, tanto em termos de resistência como de rigidez, terem um bom comportamento à fadiga, não necessitarem de suporte durante o tempo de cura e a sua disponibilidade em termos de formas ser praticamente ilimitada. Além disso, apresentam elevados valores das relações resistência à tração/peso e rigidez/peso. Desta forma, são possíveis soluções de reforço leves, de fácil e rápida aplicação, contrariamente ao que acontece nos reforços que envolvem a colagem externa de chapas metálicas, que é uma técnica particularmente trabalhosa em termos de transporte e manuseamento. Para além disso, o facto de existir a possibilidade de obter estes materiais numa grande diversidade de forma, espessura, comprimento e secção transversal é igualmente uma vantagem inerente à utilização dos CFRP no reforço de estruturas de betão armado.

Apesar das vantagens anteriormente referidas, os compósitos de CFRP apresentam algumas desvantagens: contrariamente ao aço, que apresenta comportamento dúctil na rotura, os materiais compósitos têm comportamento linear-elástico até à rotura, o que origina uma rotura sem qualquer tipo de aviso (embora esta ocorra para elevados níveis de extensão do material); o custo dos materiais é elevado, podendo no entanto ser amortizado quando comparado em termos de relação custo/resistência; a exposição a temperaturas elevadas (como é o caso do fogo) leva à degradação do material, o que conduz à ineficácia do reforço e possivelmente a uma rotura prematura; são particularmente suscetíveis aos raios ultravioleta e, pelo facto de serem materiais relativamente recentes, o seu comportamento a longo prazo ainda não é totalmente conhecido.

### **2.3. TÉCNICAS DE REFORÇO USANDO MATERIAIS COMPÓSITOS DE CFRP**

A aplicação de compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão é possível de ser realizada com recurso às seguintes técnicas: a da colagem externa do CFRP (EBR), designada internacionalmente por “*Externally Bonded Reinforcement*” e a da inserção do CFRP em entalhes (NSM), designada internacionalmente por “*Near Surface Mounted*”.

#### **2.3.1. Técnica da colagem externa (EBR)**

Na técnica EBR, o CFRP é colado na face externa do elemento a reforçar de modo a repor ou conferir uma maior capacidade de carga à estrutura. O material compósito poderá ser aplicado consoante o tipo reforço pretendido, isto é, na face tensionada (no reforço à flexão), nas faces

laterais (no reforço ao corte) ou através de encamisamento de secções, aumentando o confinamento no caso de pilares.

A técnica da colagem externa com CFRP envolve, em termos gerais, três procedimentos (Juvandes *et al.*, 2003):

- Preparação da superfície do elemento a reforçar de modo a garantir boas condições de aderência entre o material de reforço e a estrutura a reforçar;
- Colagem do reforço de CFRP;
- Controlo de qualidade da execução do reforço.

A Figura 2.5 apresenta os procedimentos para aplicação do reforço de CFRP de acordo com a técnica EBR, com o sistema pré-fabricado (laminado) e o sistema curado “in situ” (manta).



Figura 2.5 - Aplicação de sistemas de reforço de CFRP de acordo com a técnica EBR (Dias, 2001).

Relativamente à preparação da superfície, no caso do reforço ser realizado com recurso ao sistema curado “in situ”, a superfície deverá ser esmerilada (Figura 2.5-a). Caso sejam utilizados laminados, a superfície do elemento deve ser bojardada com jato de areia ou ser “picotada” com martelo de agulhas (Figura 2.5-b). Posteriormente, a superfície deve ser limpa, usando ar comprimido, de modo a que se apresente isenta de poeiras e outros elementos que dificultem a aderência entre o reforço e a superfície de betão. Em alguns sistemas de reforço de CFRP existentes no mercado é recomendável a aplicação de um primário de modo a melhorar a aderência entre a superfície do elemento e o reforço de CFRP (Figura 2.5-c). Após o tratamento da superfície, procede-se à colagem do CFRP tal como demonstrado na Figura 2.5-d (no caso do reforço com manta) e na Figura 2.5-e (no caso do reforço com laminados). Na Figura 2.6 apresenta-se um organigrama que contém, de forma resumida, os passos

fundamentais a executar numa intervenção de reforço com recurso à colagem externa com materiais compósitos de CFRP, incluindo aspetos essenciais para um rigoroso controlo de qualidade da execução do reforço.

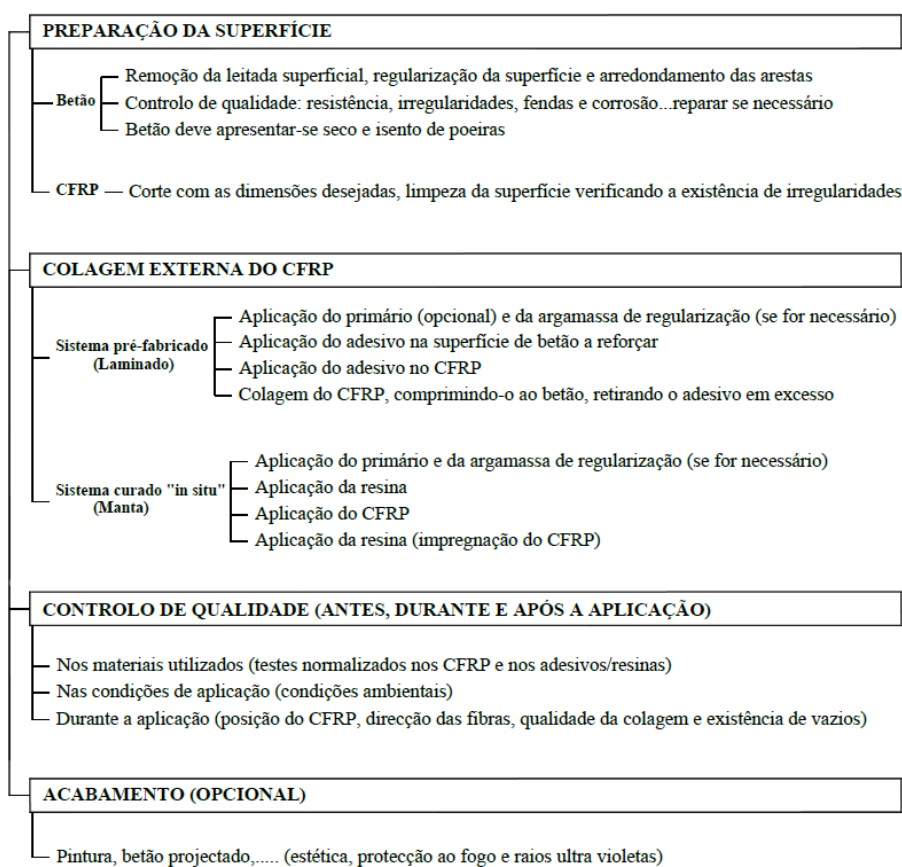


Figura 2.6 - Aplicação da técnica de colagem externa e procedimentos fundamentais de controlo de qualidade da execução do reforço (Dias *et al.*, 2006).

A técnica de reforço por colagem externa com CFRP apresenta como aspetos positivos a sua simplicidade e rapidez de execução, além do facto de proporcionar melhorias consideráveis nos elementos reforçados, quer em termos de estados limites de serviço (controlo da fendilhação e deformação) assim como em estados limites últimos (aumento da capacidade de carga máxima). No entanto, pelo facto do CFRP ficar colado na face exterior do elemento de betão, implica que o sistema de reforço fique exposto diretamente a impactos, atos de vandalismo, fogo, temperaturas elevadas e raios ultravioleta (aos quais o material de CFRP é particularmente sensível). Nesse sentido, é necessário conceber um adequado sistema de proteção do reforço de modo a não reduzir o período de vida útil da estrutura reforçada.

### 2.3.2. Técnica da inserção (NSM)

A técnica da inserção (NSM) surgiu como alternativa à técnica da colagem externa (EBR) e consiste na inserção do CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento, e cuja ligação

é efetuada através de um adesivo epoxídico. O reforço de estruturas através da técnica NSM pode ser efetuado utilizando vários tipos de CFRP, em termos de secção transversal: varões de secção circular, varões de secção retangular e laminados (elementos em que uma das dimensões da secção transversal é bastante menor que a outra). Os vários tipos de CFRP usados no reforço de estruturas de betão segundo a técnica NSM encontram-se representados na Figura 2.7.

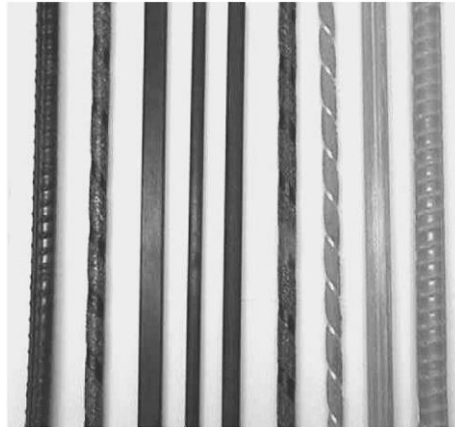


Figura 2.7 - Tipos de CFRP utilizados no reforço com a técnica NSM (De Lorenzis e Teng, 2007).

A utilização de varões de CFRP no reforço de estruturas de betão segundo a técnica NSM apresenta alguns aspetos menos positivos: a dificuldade de execução dos entalhes com os equipamentos de corte existentes no mercado face ao diâmetro dos varões; e o baixo valor da relação entre a área da superfície colada e a área da secção transversal do varão de CFRP. Neste contexto, El-Hacha e Rizkalla (2004) compararam a eficiência da técnica de reforço NSM com recurso a varões e laminados de CFRP. Os autores concluíram que, para modelos com a mesma rigidez axial em termos de CFRP, o reforço com laminados foi mais eficiente que a solução de reforço com varões, pelo facto da área de colagem dos laminados ser superior à dos varões.

Os procedimentos para a execução do reforço de estruturas de betão segundo a técnica NSM com laminados de CFRP são os seguintes (Dias, 2008): execução do entalhe no betão de recobrimento do elemento a reforçar (Figura 2.8-a); limpeza do entalhe com recurso à aplicação de ar comprimido, de modo a melhorar a aderência entre o betão e o adesivo (Figura 2.8-b); corte do laminado de CFRP com as dimensões desejadas e posterior limpeza com acetona de modo a maximizar a aderência entre o laminado e o adesivo (Figura 2.8-c e Figura 2.8-d); produção do adesivo epóxi segundo as recomendações do fabricante (Figura 2.8-e); preenchimento do entalhe com o adesivo (Figura 2.8-f); aplicação do adesivo nas faces do laminado (Figura 2.8-g) e inserção do laminado no entalhe, devendo-se de seguida retirar o adesivo em excesso (Figura 2.8-h).



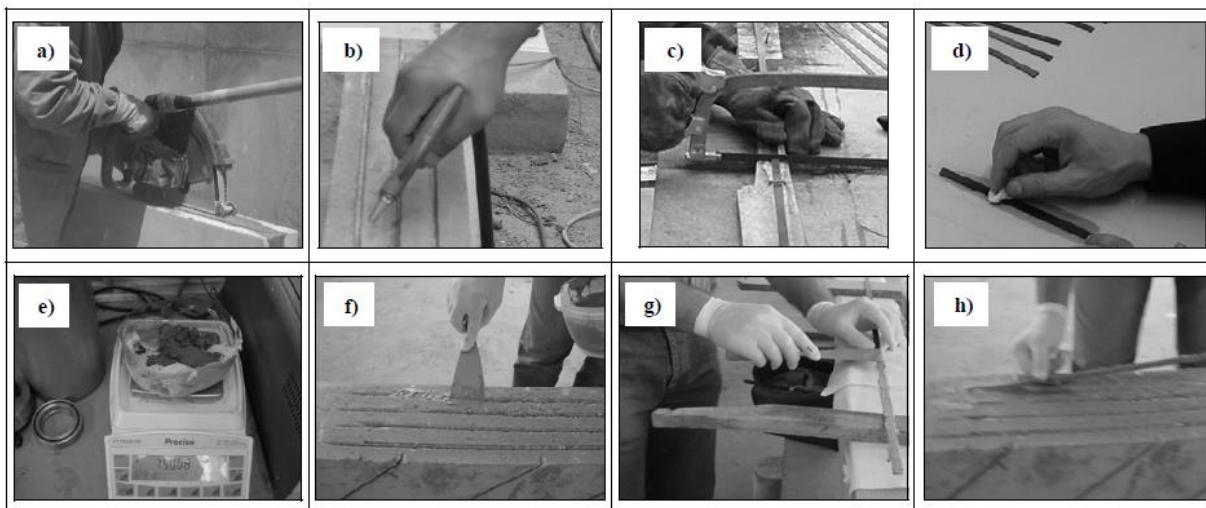


Figura 2.8 - Execução do reforço à flexão de uma viga de betão armado com laminados de CFRP inseridos (Dias, 2008).

A Figura 2.9 apresenta um organigrama que contém os passos essenciais na execução de um reforço com materiais compósitos de CFRP de acordo com a técnica NSM, bem como os procedimentos fundamentais para um rigoroso controlo de qualidade da técnica antes, durante e após a execução do reforço.

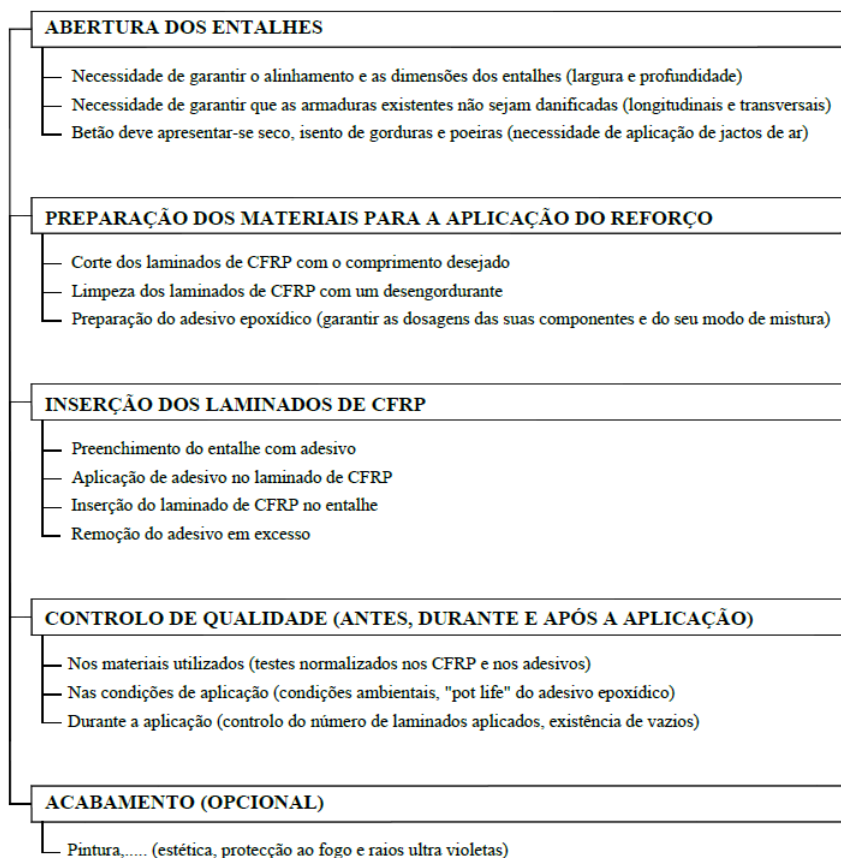


Figura 2.9 - Aplicação da técnica da inserção e procedimentos fundamentais de controlo de qualidade da execução do reforço (Dias, 2008).

### 2.3.3. Comparação entre as técnicas EBR e NSM

A execução do reforço de CFRP de acordo com a técnica NSM não requer qualquer tipo de preparação da superfície para além da abertura dos entalhes para colocação do reforço, contrariamente ao que acontece na técnica da colagem externa (EBR), que requer um moroso processo de preparação da superfície. Além disso, a técnica EBR envolve a colagem do CFRP na face exterior do elemento a reforçar, pelo que há uma maior probabilidade deste betão se encontrar em pior estado. Na técnica NSM esse risco é inferior, na medida em que o material de reforço é colocado em entalhes efetuados no betão de recobrimento, no qual existe uma menor probabilidade de este se encontrar degradado. Para além destas vantagens, a técnica NSM confere maior proteção ao material de reforço contra impactos, atos de vandalismo, fogo, temperaturas elevadas e raios ultravioleta (aos quais o material de CFRP é particularmente sensível).

O melhor desempenho do CFRP quando aplicado com a técnica NSM pode ser explicado quando se compara a área de colagem de um laminado inserido comparativamente com a de um laminado aplicado com a técnica EBR. Constata-se que a área de colagem do laminado quando aplicado segundo a técnica da inserção é o dobro da conferida quando é colado externamente (Figura 2.10), verificando-se assim que a técnica NSM proporciona ao laminado um grau de fixação superior, mobilizando-se deste modo tensões mais elevadas no CFRP aquando da rotura do elemento reforçado, permitindo retardar ou mesmo evitar roturas prematuras, que tipicamente ocorrem quando o reforço é aplicado com a técnica EBR (destacamento do CFRP) (Dias, 2008).

Além das vantagens anteriormente referidas, é ainda possível mencionar outros benefícios da técnica NSM relativamente à técnica EBR: facilidade de ancorar o reforço por forma a criar um mecanismo de prevenção de roturas prematuras por destacamento do laminado; ideal para o reforço aos momentos negativos e maior facilidade de aplicação do pré-esforço aos laminados de CFRP (Nordin e Taljsten, 2006).

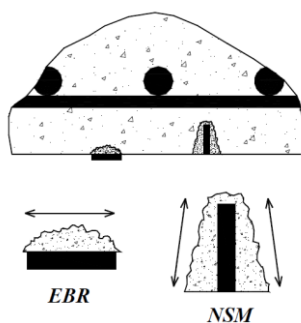


Figura 2.10 - Grau de ancoragem conferido pela técnica de reforço EBR e NSM para o mesmo laminado de CFRP (adaptado de Carolin, 2003).

Blaschko e Zilch (1999) realizaram um programa experimental com quatro vigas de betão armado reforçadas à flexão com compósitos de CFRP aplicados com a técnica EBR (vigas A1 e B1) e a técnica NSM (vigas A2 e B2). A Tabela 2.4 apresenta um resumo das informações referentes ao programa experimental desenvolvido.

Tabela 2.4 - Programa experimental desenvolvido por Blaschko e Zilch (1999).

| Viga |   | Armadura longitudinal de tração | Reforço de CFRP |             |  |                              |
|------|---|---------------------------------|-----------------|-------------|--|------------------------------|
| ID   | $b \times h \times L$<br>(mm <sup>3</sup> ) |                                 | Técnica         | Quantidade  | Secção transversal<br>(mm <sup>2</sup> ) | $\rho_f$<br>(%) <sup>1</sup> |
| A1   | 350×150<br>×3000                            | 3φ6                             | EBR             | 1 laminado  | 50×1.2 mm <sup>2</sup>                   | 0.23                         |
| A2   |   |                                 | NSM             | 2 laminados | 25×1.2 mm <sup>2</sup>                   |                              |
| B1   | 150×350<br>×3000                            | 2φ6                             | EBR             | 1 laminado  | 50×1.2 mm <sup>2</sup>                   | 0.23                         |
| B2   |   |                                 | NSM             | 2 laminados | 25×1.2 mm <sup>2</sup>                   |                              |

<sup>1</sup>Percentagem de reforço de CFRP:  $\rho_f = A_f/bd_f$  em que  $A_f$  corresponde à área da secção transversal do CFRP;  $b$  refere-se à largura da secção transversal e  $d_f$  corresponde à altura útil do reforço de CFRP.

A Figura 2.11 representa as curvas momento fletor vs deslocamento vertical a meio vão das vigas do grupo A (A1 e A2) e do grupo B (B1 e B2), respetivamente.

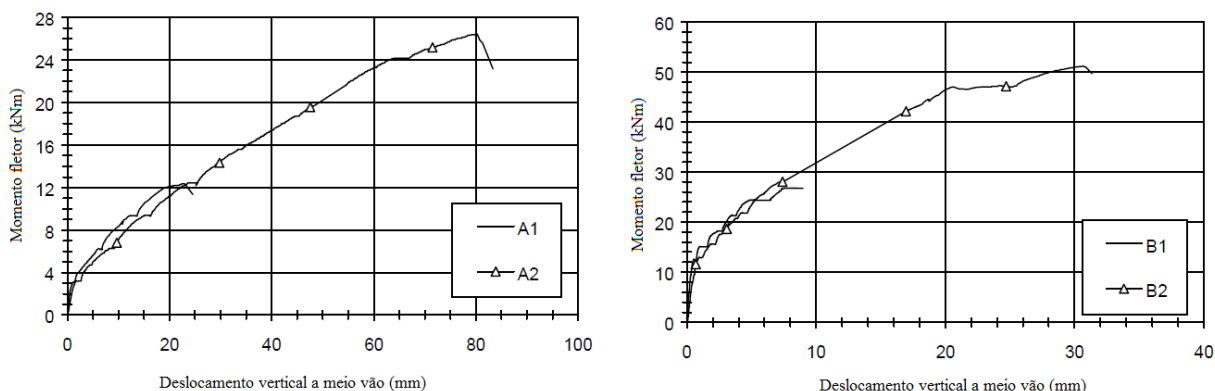


Figura 2.11 - Momento fletor vs deslocamento a meio vão das vigas ensaiadas por Blaschko e Zilch (1999).

As vigas reforçadas com a técnica EBR (A1 e B1) tiveram rotura por descolamento do laminado com níveis baixos de extensão mobilizada no CFRP (7‰). Verificou-se que as vigas reforçadas com a técnica da inserção (A2 e B2) apresentaram maior capacidade de carga que as restantes, pelo facto da técnica NSM proporcionar uma maior capacidade de ancoragem dos laminados, o que levou ao esgotamento da sua resistência máxima à tração (rotura do CFRP). Deste modo, Blaschko e Zilch (1999) concluíram que o material compósito de CFRP pode ser utilizado no âmbito do reforço estrutural com maior eficácia caso seja inserido em entalhes em vez de colado externamente.

Sena-Cruz *et al.* (2012) desenvolveram um programa experimental onde foi possível comparar o nível de eficácia das técnicas de reforço EBR e NSM com laminados de CFRP, quando

aplicadas no reforço à flexão de vigas de betão armado. O programa experimental foi composto por dois grupos de vigas: um sujeito a carregamento monotónico e outro sujeito a carregamento cíclico. As vigas que não atingiram a rotura durante o carregamento à fadiga foram posteriormente submetidas a ensaio monotónico até à rotura (pós-fadiga). Em cada grupo, uma viga foi ensaiada sem qualquer reforço (viga de referência - REF) e havia duas vigas que foram reforçadas com laminados de CFRP (uma com a técnica EBR e outra com a técnica NSM). A Tabela 2.5 apresenta informações sobre o programa experimental realizado.

Tabela 2.5 - Programa experimental desenvolvido por Sena-Cruz *et al.* (2012).

| Viga |   | Armadura longitudinal de tração | Reforço de CFRP |   |
|------|---|---------------------------------|-----------------|---|
| ID   | $b \times h \times L$<br>(mm <sup>3</sup> ) |                                 | Quantidade      | $w_f \times t_f \times L_f$<br>(mm <sup>3</sup> ) |
| REF  | 200×300×2000                                | 3φ10<br>(0.439%) <sup>1</sup>   | -               | -   |
| EBR  |   | 3φ10<br>(0.550%) <sup>1</sup>   | 2 laminados     | 30×1.41×1400                                      |
| NSM  |   | 3φ10<br>(0.561%) <sup>1</sup>   | 4 laminados     | 15×1.41×1400                                      |

<sup>1</sup>Percentagem equivalente da armadura longitudinal de tração, dada por:  $\rho_{s,eq} = A_s/bd_s + (E_f/E_s) \cdot A_f/bd_f$  em que  $A_s$ ,  $E_s$  e  $d_s$  são a área da secção transversal, o módulo de elasticidade e a altura útil da armadura de aço e  $A_f$ ,  $E_f$  e  $d_f$  correspondem à área da secção transversal, módulo de elasticidade e altura útil dos laminados de CFRP; <sup>2</sup>Percentagem da capacidade de carga da correspondente viga submetida a carregamento monotónico.

A Tabela 2.6 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios monotónicos e pós-fadiga. Nesta tabela,  $\delta_{cr}$  e  $F_{cr}$ ,  $\delta_y$  e  $F_y$  e  $\delta_{máx}$  e  $F_{máx}$  correspondem ao deslocamento a meio vão ( $\delta$ ) e à força aplicada ( $F$ ) nas seguintes fases, respetivamente: início da fendilhação, cedência da armadura longitudinal e rotura. O nível de ductilidade foi avaliado através da relação entre os deslocamentos a meio vão no momento da rotura ( $\delta_{máx}$ ) e no momento da cedência da armadura longitudinal ( $\delta_y$ ). O nível de eficácia do reforço de CFRP foi avaliado através do rácio entre a extensão máxima registada no CFRP durante o ensaio da viga ( $\varepsilon_{CFRP}^{max}$ ) e a extensão de rotura registada nos ensaios de tração uniaxial ( $\varepsilon_{fu}$ ).

Tabela 2.6 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Sena-Cruz *et al.* (2012).

| Tipo de ensaio             | Vigas | Fendilhação           |                  | Cedência da armadura |               | Rotura                 |                   | $\delta_{máx}/\delta_y$ | $\varepsilon_{CFRP}^{max}/\varepsilon_{fu}$<br>(%) | Modo de rotura do CFRP    |
|----------------------------|-------|-----------------------|------------------|----------------------|---------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--|---------------------------|
|                            |       | $\delta_{cr}$<br>(mm) | $F_{cr}$<br>(kN) | $\delta_y$<br>(mm)   | $F_y$<br>(kN) | $\delta_{máx}$<br>(mm) | $F_{máx}$<br>(kN) |                         |  |                           |
| Monotónico                 | REF   | 0.36                  | 29               | 3.8                  | 70            | 22.6                   | 79.3              | 5.95                    | -  | -                         |
|                            | EBR   | 0.27                  | 25               | 4.1                  | 90            | 7.4                    | 108.4             | 1.80                    | 36.6   | Descolamento <sup>1</sup> |
|                            | NSM   | 0.40                  | 29               | 4.9                  | 104           | 14.6                   | 147.3             | 2.98                    | 63.3   | Destacamento <sup>2</sup> |
| Monotónico<br>(Pós-fadiga) | REF   | 0.26                  | 20               | 2.5                  | 66            | 23.3                   | 79.9              | 9.32                    | -  | -                         |
|                            | EBR   | 0.32                  | 27               | 3.0                  | 94            | 7.1                    | 114.2             | 2.37                    | 29.6   | Descolamento <sup>1</sup> |
|                            | NSM   | n/a                   | n/a              | 3.3                  | 105           | 22.2                   | 160.7             | 6.73                    | 55.7   | Destacamento <sup>2</sup> |

<sup>1</sup>Descolamento dos laminados de CFRP; <sup>2</sup>Destacamento da camada de betão de recobrimento, que continha os laminados de CFRP.

Nos ensaios monotônicos, relativamente à viga REF, o reforço de CFRP aplicado com as técnicas EBR e NSM permitiu um aumento da capacidade máxima de carga de 37% e 86%, respetivamente. Nos ensaios monotônicos à rotura pós-fadiga, os aumentos proporcionados em termos de capacidade máxima de carga pelas técnicas de reforço EBR e NSM, relativamente à viga de referência, foram de 43% e 101%, respetivamente. Em termos de deformabilidade, o rácio  $\delta_{m\acute{a}x}/\delta_y$  indica que as vigas reforçadas com a técnica NSM apresentaram rotura mais dúctil que as viga reforçadas com a técnica EBR, em ambos os tipos de ensaio. Nos ensaios monotônicos, este índice foi de 1.80 e 2.98, enquanto nos ensaios pós-fadiga registou-se um rácio de 2.37 e 6.73 para as técnicas EBR e NSM, respetivamente.

Com este programa experimental os autores concluíram, de um modo geral, que a técnica NSM apresenta maior eficácia que a técnica EBR. Verificou-se que a técnica da inserção proporcionou um aproveitamento das capacidades do material compósito significativamente superior ao proporcionado pela técnica EBR, onde a rotura ocorreu prematuramente devido a descolamento do CFRP e de modo frágil. Além disso, foi possível concluir que as vigas reforçadas com a técnica NSM apresentaram maior ductilidade na rotura do que as reforçadas com a técnica EBR.

#### 2.4. REFORÇO À FLEXÃO DE LAJES DE BETÃO ARMADO COM CFRP

Bonaldo (2008) desenvolveu um programa experimental composto por 15 faixas de laje divididas em três grupos (C1, C2 e C3), que se distinguíam pelo facto de serem compostos por betão de diferentes classes de resistência. O grupo C1 continha um betão com resistência média à compressão ( $f_{cm}$ ) de 18.85 MPa (C12/16), o grupo C2 tinha um betão cuja resistência era de  $f_{cm} = 41.74$  MPa (C35/45) e o grupo C3 era composto por um betão com resistência à compressão de  $f_{cm} = 57.29$  MPa (C50/60). Em cada grupo havia uma laje de referência (sem reforço) e as restantes quatro foram reforçadas à flexão com diferentes percentagens de reforço correspondentes à aplicação de 1, 2, 4 e 8 laminados de CFRP com a técnica NSM. A Figura 2.12 contém a configuração dos ensaios à flexão em quatro pontos de carga das lajes ensaiadas.

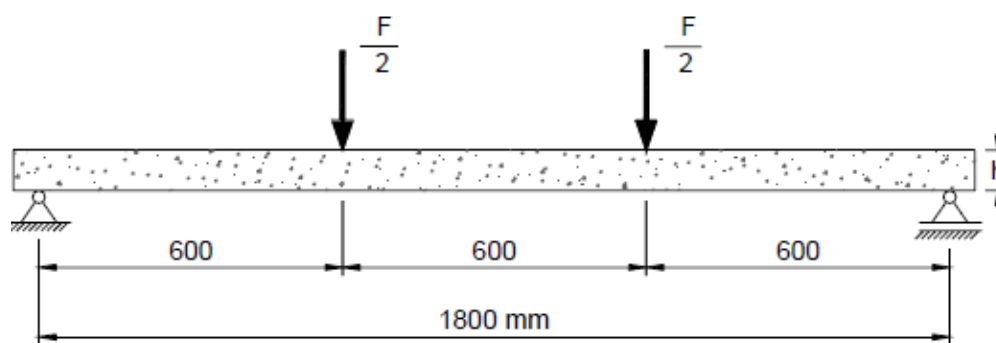
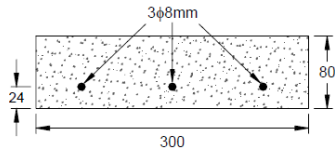
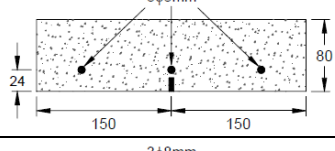
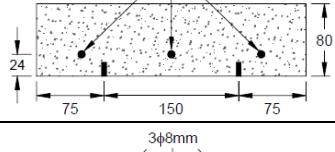
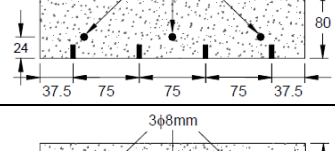
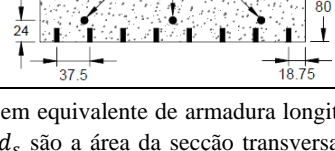


Figura 2.12 - Configuração dos ensaios realizados por Bonaldo (2008).

Na Tabela 2.7 encontram-se detalhes sobre a secção transversal das faixas de laje, armadura longitudinal e reforço de CFRP.

Tabela 2.7 - Informações sobre a secção transversal, armadura longitudinal e reforço com laminados de CFRP das faixas de laje ensaiadas por Bonaldo (2008).

| Faixas de laje |   | Armadura longitudinal de tração | Reforço de CFRP |                           |                |                  |
|----------------|---|---------------------------------|-----------------|---------------------------|----------------|------------------|
| ID             | Secção transversal (dimensões em mm)  |                                 | Nº de laminados | Secção (mm <sup>2</sup> ) | $\rho_f^2$ (%) | $f_{fu}^3$ (MPa) |
| S0             |    | 3φ8<br>(0.90%) <sup>1</sup>     | 0               | -                         | 0              | -                |
| S1             |    | 3φ8<br>(0.95%) <sup>1</sup>     | 1               | 1.40×10.02                | 0.06           | 1776.4           |
| S2             |    | 3φ8<br>(1.00%) <sup>1</sup>     | 2               | 1.40×10.02                | 0.13           | 1776.4           |
| S4             |   | 3φ8<br>(1.10%) <sup>1</sup>     | 4               | 1.40×10.02                | 0.25           | 1776.4           |
| S8             |  | 3φ8<br>(1.30%) <sup>1</sup>     | 8               | 1.40×10.02                | 0.50           | 1776.4           |

<sup>1</sup>Percentagem equivalente de armadura longitudinal, obtida por intermédio de:  $\rho_{s,eq} = A_s/bd_s + (E_f/E_s) \cdot A_f/bd_f$ , em que  $A_s$ ,  $E_s$  e  $d_s$  são a área da secção transversal, o módulo de elasticidade e a altura útil da armadura de aço e  $A_f$ ,  $E_f$  e  $d_f$  correspondem à área da secção transversal, módulo de elasticidade e altura útil dos laminados de CFRP; <sup>2</sup>Percentagem de reforço de CFRP, obtida por:  $\rho_f = A_f/bd_f$ ; <sup>3</sup>Resistência à tração dos laminados de CFRP.

Bonaldo (2008) verificou que, de acordo com a Figura 2.13, a carga de serviço,  $F_s$  (força que originou um deslocamento vertical a meio vão de valor igual a  $L/250$ , em que  $L$  corresponde ao vão da faixa de laje), a carga de cedência das armaduras longitudinais ( $F_y$ ) e a carga máxima ( $F_u$ ) aumentaram significativamente com o aumento da percentagem de reforço ( $\rho_f$ ), assim como com o aumento da classe de resistência do betão. Na mesma figura são apresentados, tendo como base as faixas de laje de referência, os acréscimos em termos da carga de serviço (Figura 2.13-d), da carga de cedência das armaduras longitudinais (Figura 2.13-e) e da capacidade de carga máxima (Figura 2.13-f) das faixas de laje das classes de resistência C1 (C12/16), C2 (C35/45) e C3 (C50/60). Na Tabela 2.8 encontram-se os acréscimos proporcionados pelo reforço de CFRP da carga de serviço, em termos da carga de cedência das armaduras e da carga máxima relativamente às lajes de referência.

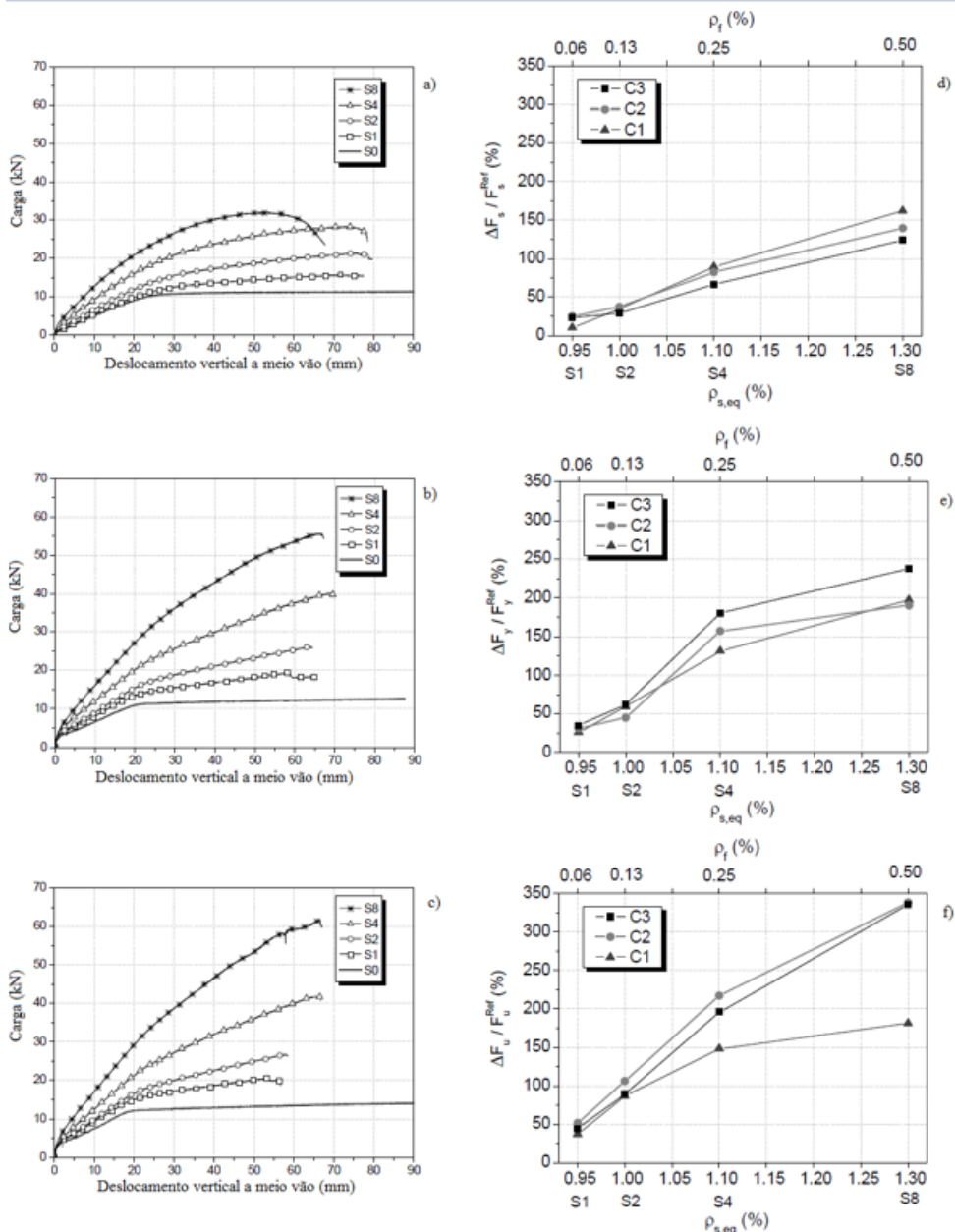


Figura 2.13 - Força vs deslocamento das lajes com betão da classe de resistência: a) C12/16; b) C35/45; c) C50/60; Aumento da carga: d) de serviço; e) de cedência da armadura; f) máxima (Bonaldo, 2008).

Tabela 2.8 - Aumento das cargas de serviço, cedência das armaduras e máxima (Bonaldo, 2008).

| Classe de resistência do betão | Faixa de laje | Serviço | Cedência das armaduras | Rotura |
|--------------------------------|---------------|---------|------------------------|--------|
| C1 (C12/16)                    | S1            | 13%     | 25%                    | 40%    |
|                                | S2            | 30%     | 60%                    | 85%    |
|                                | S4            | 85%     | 130%                   | 150%   |
|                                | S8            | 160%    | 195%                   | 175%   |
| C2 (C35/45)                    | S1            | 25%     | 30%                    | 50%    |
|                                | S2            | 40%     | 40%                    | 110%   |
|                                | S4            | 80%     | 155%                   | 220%   |
|                                | S8            | 140%    | 185%                   | 340%   |
| C3 (C50/60)                    | S1            | 25%     | 40%                    | 45%    |
|                                | S2            | 30%     | 60%                    | 85%    |
|                                | S4            | 65%     | 175%                   | 195%   |
|                                | S8            | 120%    | 240%                   | 335%   |

Em termos gerais, Bonaldo (2008) obteve as seguintes conclusões com a realização do presente estudo:

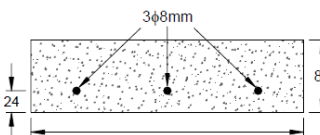
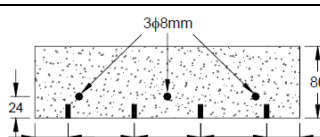
- A capacidade de carga de lajes de betão armado de baixa resistência (como é o caso das lajes com betão da classe C12/16) é limitada pelo betão (rotura por esmagamento do betão comprimido). Não obstante, para a mesma classe de resistência, verificou-se que uma percentagem de armadura longitudinal de 0.90% e uma percentagem de reforço de CFRP de 0.50% levou a um aumento da capacidade de carga de 175%. No entanto, por motivos económicos, não é aconselhável uma percentagem de reforço superior a 0.13%, que ainda assim levou a um aumento da capacidade de carga em 87%.
- As faixas de laje com betão das classes C35/45 e C50/60, com exceção das lajes S8, atingiram a rotura devido ao esgotamento da capacidade resistente máxima à tração dos laminados de CFRP. A faixa de laje S8 da classe de resistência C35/45 (C2) atingiu a rotura devido ao esmagamento do betão comprimido e a faixa de laje S8 da classe C50/60 (C3) atingiu a rotura devido à formação de fendas de corte, pelo que nestas faixas de laje se observou um incremento em termos de capacidade máxima de carga menor do que nas restantes.
- O reforço com laminados de CFRP proporcionou aumentos significativos em termos de capacidade de carga, nas lajes com betão das classes C35/45 e C50/60. Os aumentos obtidos nas lajes com betão da classe C12/16 foram bastante inferiores, o que é explicado pelo autor pelo facto da extensão de rotura à compressão do betão (2.2‰) ter sido atingida para cargas baixas, o que levou a que a resistência à tração dos laminados de CFRP não tivesse sido atingida.
- Nas faixas de laje com betão das classes C35/45 e C50/60, o reforço de CFRP foi mais eficaz até uma percentagem de reforço de  $\rho_f = 0.25\%$ . Nas lajes reforçadas com percentagens de CFRP superiores (faixas de laje S8), observou-se roturas devido ao esmagamento do betão comprimido (classe de resistência C35/45) e devido à abertura de fendas de corte (classe de resistência C50/60).
- Neste programa experimental não foram observadas roturas por destacamento da camada de betão de recobrimento (rotura frequentemente observada), mesmo para um espaçamento entre laminados bastante pequeno (37.5 mm), o que permite afirmar que o reforço de lajes de betão armado com laminados de CFRP segundo a técnica NSM é bastante eficaz.

Bonaldo (2008) desenvolveu um programa experimental com o objetivo de aumentar a capacidade de carga de lajes de betão armado reforçadas com laminados de CFRP aplicados segundo a técnica NSM. O autor ensaiou quatro faixas de laje à flexão em quatro pontos de



carga, divididas em 2 grupos:  $SL_i$ , composto por lajes de referência (SL1 e SL2) e  $SLiS$ , composto por lajes reforçadas com laminados de CFRP segundo a técnica NSM (SL3S e SL4S). As faixas de laje de referência (SL1 e SL2) tinham uma geometria e armadura iguais às lajes do grupo S0 ensaiadas no programa experimental anterior e as faixas de laje SL3S e SL4S possuíam geometria, armadura e reforço de CFRP semelhantes às lajes do grupo S4 do programa experimental anterior. A diferença consistiu no facto da resistência do betão ser em média de 26.16 MPa, os laminados das faixas de laje SL3S e SL4S terem secção transversal de  $1.4 \times 9.4 \text{ mm}^2$  e a resistência à tração dos laminados de CFRP ser de 2879.1 MPa. O número de laminados adotados no reforço à flexão das faixas de laje foi escolhido de modo a aumentar a sua capacidade de carga em serviço em 50%, que foi assumida como uma carga que leva a uma deformação vertical a meio vão de  $l/250 = 1800/250 = 7.2 \text{ mm}$  (em que  $l$  corresponde ao vão das faixas de laje ensaiadas). Os entalhes realizados no betão de recobrimento tinham largura de 4 mm em todas as lajes reforçadas com a técnica NSM (grupo  $SLiS$ ). A Tabela 2.9 contém as principais informações relativas ao presente programa experimental.

Tabela 2.9 - Propriedades dos materiais utilizados por Bonaldo (2008).

| Faixa de laje |        | Betão<br>$f_{cm}$<br>(MPa) | Secção transversal<br>(dimensões em mm)   | Armadura<br>longitudinal<br>de tração | Reforço de CFRP    |                              |                   |                     |
|---------------|--------|----------------------------|---|---------------------------------------|--------------------|------------------------------|-------------------|---------------------|
| Série         | Modelo |                            |   |                                       | Nº de<br>laminados | Secção<br>(mm <sup>2</sup> ) | $\rho_f^2$<br>(%) | $f_{fu}^3$<br>(MPa) |
| SL            | SL1    | 25.97                      |  | 3φ8<br>(0.90%) <sup>1</sup>           | 0                  | -                            | 0                 | -                   |
|               |        | SL2                        |   |                                       |                    |                              |                   |                     |
| SLiS          | SL3S   | 26.35                      |  | 3φ8<br>(1.10%) <sup>1</sup>           | 4                  | 1.4×9.4                      | 0.23              | 2879.1              |
|               |        | SL4S                       |   |                                       |                    |                              |                   |                     |

<sup>1</sup>Percentagem equivalente de armadura longitudinal; <sup>2</sup>Percentagem de reforço de CFRP; <sup>3</sup> Resistência à tração dos laminados de CFRP.

A Tabela 2.10 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados por Bonaldo (2008), em termos de capacidade de carga máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ), do deslocamento vertical a meio vão no momento da cedência das armaduras e na rotura ( $\delta_y$  e  $\delta_{m\acute{a}x}$ , respetivamente) e das extensões máximas registadas no CFRP ( $\epsilon_{CFRP}^{max}$ ). Além disso, nesta tabela são apresentados os parâmetros que permitem quantificar o acréscimo em termos de capacidade de carga devido ao efeito do reforço e em termos de ductilidade ( $\delta_{m\acute{a}x}/\delta_y$ ).

Tabela 2.10 - Propriedades que permitem avaliar a eficácia da técnica de reforço (Bonaldo, 2008).

| Modelo | $F_{m\acute{a}x}$ (kN) | $F_{m\acute{a}x}^{m\acute{e}dia}$ (kN) | Acr\acute{e}scimo (%) | $\delta_y$ (mm) | $\delta_{m\acute{a}x}$ (mm) | $\delta_{m\acute{a}x}/\delta_y$ | $\varepsilon_{CFRP}^{max}$ (%) |
|--------|------------------------|--|-----------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| SL1    | 14.34                  | 14.73                                  | -                     | 16.76           | 56.59                       | 3.38                            | -                              |
| SL2    | 15.12                  |  |                       | 17.29           | 71.41                       | 4.13                            |                                |
| SL3S   | 35.60                  | 36.64                                  | 148.71                | 18.00           | 41.96                       | 2.33                            | 11.06                          |
| SL4S   | 37.67                  |  |                       | 17.99           | 35.64                       | 1.98                            | 12.52                          |

Em termos de capacidade de carga m\acute{a}xima, e relativamente \u00e0s lajes de refer\ência, verifica-se que as faixas de laje refor\cadas com a t\acute{e}cnica NSM registaram um acr\acute{e}scimo de cerca de 150%. \u00c9 poss\u00edvel verificar, atrav\és da tabela anterior, que nas faixas de laje refor\cadas com a t\acute{e}cnica NSM existe um decr\acute{e}scimo do \u00edndice de ductilidade de 42% relativamente \u00e0s lajes de refer\ência. Em termos de desempenho do CFRP, verifica-se que a extens\~ao m\acute{a}xima nos laminados de CFRP foi de 11.06% e 12.52% nas faixas de laje SL3S e SL4S, o que corresponde a um desempenho de 60% e 68%, respetivamente. As lajes refor\cadas com a t\acute{e}cnica NSM (SL3S e SL4S) atingiram a rotura por flex\~ao: ced\ência da armadura longitudinal seguido do esmagamento do bet\~ao na face comprimida. No entanto, na faixa de laje SL3S, foi observado um elevado padr\~ao de fendilha\c\~ao por corte.

Dalfr\ê e Barros (2012) desenvolveram um programa experimental onde foi avaliada a efic\~acia da t\acute{e}cnica NSM aplicada com laminados de CFRP no refor\c\~ao \u00e0 flex\~ao de lajes cont\u00ednuas de bet\~ao armado, com o objetivo de aumentar a capacidade de carga em 25% ou 50%, bem como avaliar o comportamento dos elementos em termos de redistribui\c\~ao de momentos e ductilidade. O programa experimental era composto por dezassete faixas de laje de dois v\~aos e dimens\~oes de 120\times375\times5875 mm<sup>3</sup> (Figura 2.14), divididas em dois grupos: grupo H (refor\c\~ao efetuado na regi\~ao de momentos negativos) e grupo HS (refor\c\~ao efetuado nas regi\~oes de momentos positivos e negativos). Seis faixas de laje foram ensaiadas sem qualquer refor\c\~ao e as restantes onze foram refor\cadas com laminados de CFRP.

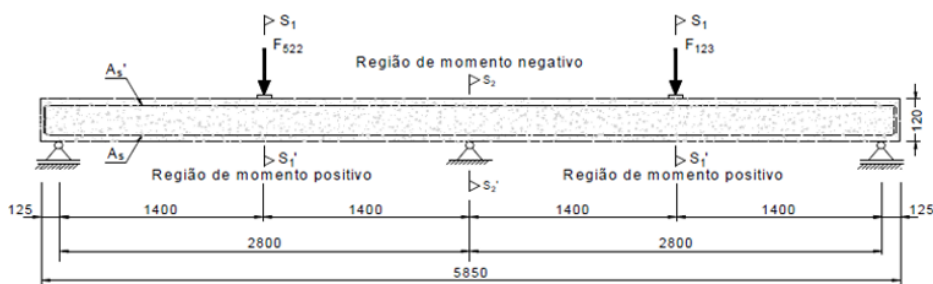


Figura 2.14 - Geometria das faixas de laje ensaiadas por Dalfr\ê e Barros (2012).

Na Figura 2.15 apresentam-se detalhes relacionados com a geometria da se\c\~ao transversal, armadura e refor\c\~ao de CFRP adotadas para cada faixa de laje ensaiada. A s\~erie H era composta por tr\~es lajes de refer\ência (SL15-H, SL30-H e SL45-H) e cinco faixas de laje refor\cadas com CFRP de acordo com a t\acute{e}cnica NSM, com o objetivo de aumentar a sua capacidade de carga

em 25% (SL15s25-H, SL30s25-H e SL45s25-H) ou 50% (SL15s50-H, SL30s50-H e SL45s50-H). A série HS era composta por três faixas de laje de referência (SL15-HS, SL30-HS e SL45-HS) e cinco faixas de laje reforçadas com laminados de CFRP de modo a aumentar a sua capacidade de carga em 25% (SL15s25-HS, SL30s25-HS, SL45s25-HS) ou 50% (SL30s50-HS, SL45s50-HS). A Tabela 2.11 apresenta informações gerais das lajes ensaiadas, nomeadamente a resistência à compressão do betão ( $f_{cm}$ ), a armadura nas secções S1-S1' e S2-S2', as soluções adotadas em termos de CFRP e as percentagens equivalentes de armadura na região de momentos negativos e positivos ( $\rho_{l,eq}^H$  e  $\rho_{l,eq}^S$ , respetivamente).

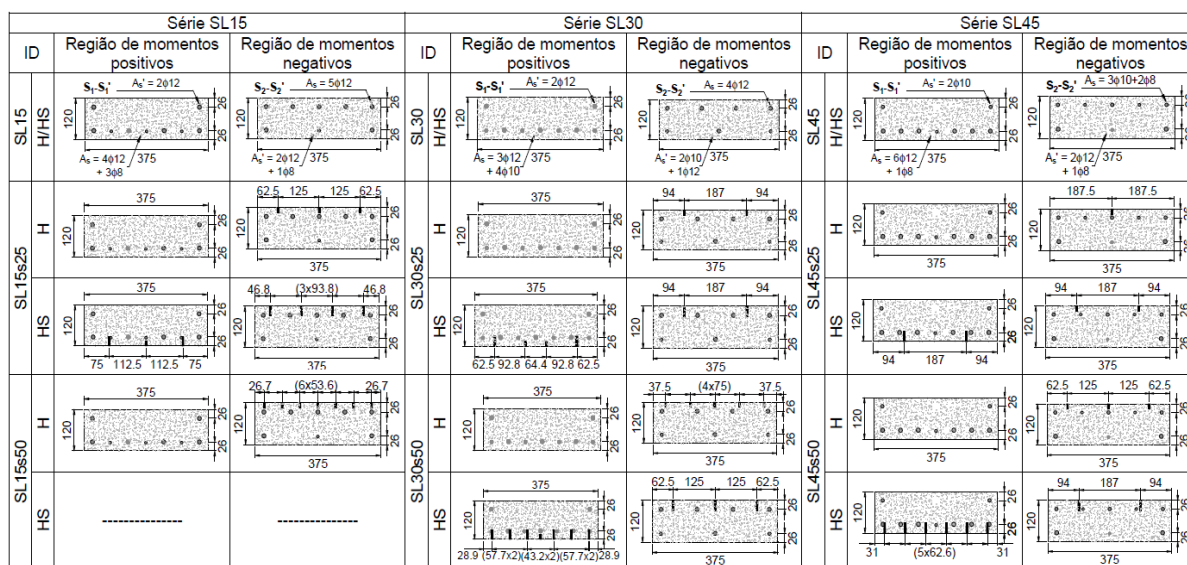


Figura 2.15 - Detalhes das séries SL15-H/HS, SL30H/HS e SL45H/HS (Dalfré e Barros, 2012).

Tabela 2.11 - Informações gerais das faixas de laje ensaiadas por Dalfré e Barros (2012).

| Faixas de laje  | $f_{cm}$ (MPa)   | Secção transversal S1-S1'   | Nº de laminados em S1-S1'   | $\rho_{l,eq}^S$ (%) <sup>a</sup>   | Secção transversal S2-S2'  | Nº de laminados em S2-S2'   | $\rho_{l,eq}^H$ (%) <sup>a</sup> |
|---|--|---|---|--|--|---|----------------------------------|
| Grupo H   | 40.1   | $A'_s = 2\phi 12\text{mm}$<br>$A_s = 4\phi 12\text{mm} + 3\phi 8\text{mm}$  | 0   | 1.71   | $A_s = 5\phi 12\text{mm}$<br>$A'_s = 2\phi 12\text{mm} + 1\phi 8\text{mm}$           | 0   | 1.60                             |
|   |  |   | 0   | 1.71   |  | $3 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2$                           | 1.68                             |
|   |  |   | 0   | 1.71   |  | $7 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2$                           | 1.80                             |
|   | 36.0   | $A'_s = 2\phi 12\text{mm}$<br>$A_s = 3\phi 12\text{mm} + 4\phi 10\text{mm}$ | 0   | 1.85   | $A_s = 4\phi 12\text{mm}$<br>$A'_s = 2\phi 10\text{mm} + 1\phi 12\text{mm}$          | 0   | 1.28                             |
|   |  |   | 0   | 1.85   |  | $2 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2$                           | 1.34                             |
|   |  |   | 0   | 1.85   |  | $5 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2$                           | 1.42                             |
| 41.4  | $A'_s = 2\phi 10\text{mm}$<br>$A_s = 6\phi 12\text{mm} + 1\phi 8\text{mm}$ | 0   | 2.07  | $A_s = 3\phi 10 + 2\phi 8\text{mm}$<br>$A'_s = 2\phi 12\text{mm} + 1\phi 8\text{mm}$ | 0  | 0.95  |                                  |
|   |  | 0   | 2.07  |  | $1 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2$  | 0.98  |                                  |
|   |  | 0   | 2.07  |  | $3 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2$  | 1.03  |                                  |
| Grupo HS  | 26.4   | $A'_s = 2\phi 12\text{mm}$<br>$A_s = 4\phi 12\text{mm} + 3\phi 8\text{mm}$  | 0   | 1.71   | $A_s = 5\phi 12\text{mm}$<br>$A'_s = 2\phi 12\text{mm} + 1\phi 8\text{mm}$           | 0   | 1.60                             |
|   |  |   | $1 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2 + 2 \times (1.4 \times 20) \text{ mm}^2$<br>(1600 mm) <sup>b</sup> | 1.85   |  | $3 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2$<br>(1400 mm) <sup>c</sup> | 1.83                             |
|   | 28.4   | $A'_s = 2\phi 12\text{mm}$<br>$A_s = 4\phi 12\text{mm} + 3\phi 8\text{mm}$  | 0   | 1.85   | $A_s = 4\phi 12\text{mm}$<br>$A'_s = 2\phi 10\text{mm} + 1\phi 12\text{mm}$          | 0   | 1.28                             |
|   |  |   | $2 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2 + 2 \times (1.4 \times 20) \text{ mm}^2$<br>(1500 mm) <sup>b</sup> | 2.02   |  | $3 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2$<br>(1300 mm) <sup>c</sup> | 1.39                             |
|   |  |   | $1 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2 + 6 \times (1.4 \times 20) \text{ mm}^2$<br>(1800 mm) <sup>b</sup> | 2.22   |  | $3 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2$<br>(1440 mm) <sup>c</sup> | 1.45                             |
|   | 42.4   | $A'_s = 2\phi 12\text{mm}$<br>$A_s = 4\phi 12\text{mm} + 3\phi 8\text{mm}$  | 0   | 2.07   | $A_s = 3\phi 10 + 2\phi 8\text{mm}$<br>$A'_s = 2\phi 12\text{mm} + 1\phi 8\text{mm}$ | 0   | 0.95                             |
| $2 \times (1.4 \times 20) \text{ mm}^2$<br>(1505 mm) <sup>b</sup> |  |   | 2.20  | $2 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2$<br>(1240 mm) <sup>c</sup>                    |  | 1.00  |                                  |
| $6 \times (1.4 \times 20) \text{ mm}^2$<br>(1850 mm) <sup>b</sup> |  |   | 2.43  | $2 \times (1.4 \times 10) \text{ mm}^2$<br>(1400 mm) <sup>c</sup>                    |  | 1.06  |                                  |

Nota: <sup>a</sup>  $\rho_{l,eq}^S = A_{sl}/(bd_s) + (A_f E_f / E_s) / (bd_f)$ ; <sup>b</sup> Comprimento do laminado de CFRP, com centro na secção de solicitação (secção S1-S1'); <sup>c</sup> Comprimento do laminado de CFRP, com centro no apoio central (secção S2-S2').

No programa experimental de Dalfré e Barros (2012), foram realizados dois tipos de ensaio à flexão sob cinco pontos de carga. Numa primeira fase, todos os modelos do grupo H e as lajes de referência do grupo HS foram solicitados até à rotura. As restantes faixas de laje do grupo HS (SL15s25-HS, SL30s25-HS, SL45s25-HS, SL30s50-HS e SL45s50-HS) foram submetidas a um carregamento previamente à aplicação do reforço, de modo a atingirem um deslocamento vertical correspondente a 50% do deslocamento obtido aquando da cedência da armadura longitudinal na faixa de laje de referência correspondente. Após a imposição deste nível de deformação na laje, foi colocado um suporte temporário de modo a manter essa deformação durante a aplicação do reforço de CFRP. Posteriormente, estas faixas de laje foram solicitadas até à rotura. Na Figura 2.16 apresentam-se as curvas força média vs deslocamento das faixas de laje ensaiadas.

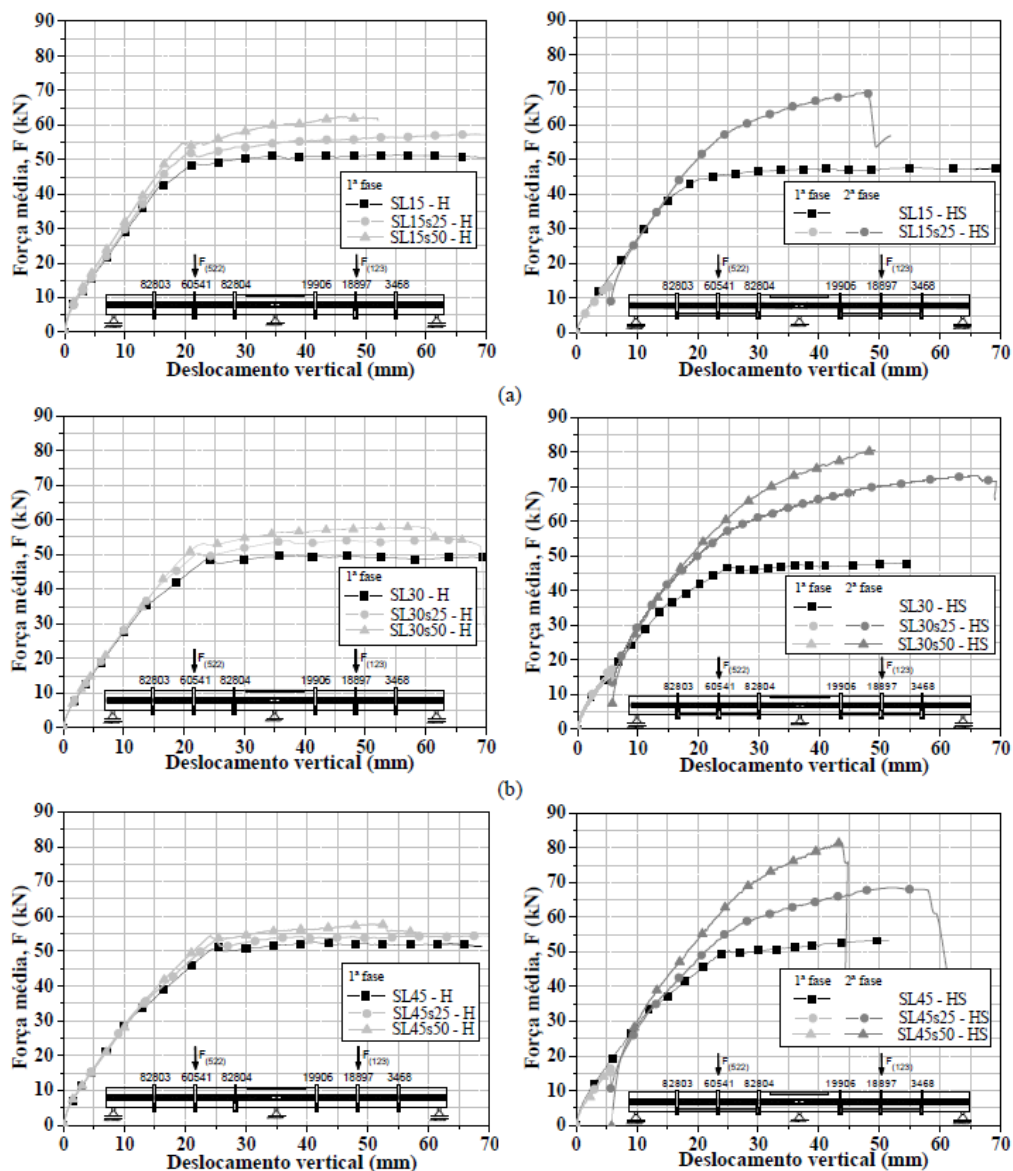


Figura 2.16 - Curvas força média vs deslocamento vertical das faixas de laje ensaiadas por Dalfré e Barros (2012).

A Tabela 2.12 apresenta os resultados obtidos, em termos médios, nos ensaios realizados por Dalfré e Barros (2012) no momento da rotura. Os resultados são apresentados em termos de força ( $F_{máx}$ ), deslocamento vertical máximo a meio vão ( $u_{Fmáx}$ ), extensões máximas no CFRP na zona de momentos negativos e positivos ( $\varepsilon_{fu}^H$  e  $\varepsilon_{fu}^S$ , respetivamente), percentagem de redistribuição de momentos ( $\eta$ ), aumento da capacidade de carga fornecido pelo reforço de CFRP ( $IR$ ) e modos de rotura observados.

Tabela 2.12 - Resultados obtidos nos ensaios realizados por Dalfré e Barros (2012).

| Faixas de laje |            | $F_{máx}$<br>(kN) | $u_{Fmáx}$<br>(mm) | $\varepsilon_{fu}^H$<br>(‰) | $\varepsilon_{fu}^S$<br>(‰) | $\eta$<br>(%) | $IR$<br>(%) | Modo de rotura |
|----------------|------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|-------------|----------------|
| Grupo H        | SL15-H     | 51.36             | 55.04              | -                           | -                           | 7.85          | -           | CL             |
|                | SL15s25-H  | 57.60             | 81.01              | 16.61                       | -                           | -20.40        | 12.15       | F              |
|                | SL15H50    | 62.36             | 46.25              | 10.27                       | -                           | -27.64        | 21.42       | C              |
|                | SL30-H     | 49.84             | 38.63              | -                           | -                           | 27.71         | -           | CL             |
|                | SL30s25-H  | 54.87             | 70.27              | 15.19                       | -                           | 6.36          | 10.09       | F              |
|                | SL30H50    | 58.09             | 57.62              | 13.30                       | -                           | -2.42         | 16.55       | C              |
|                | SL45-H     | 52.55             | 41.29              | -                           | -                           | 43.62         | -           | CL             |
|                | SL45s25-H  | 54.49             | 71.12              | 13.31                       | -                           | 32.58         | 3.69        | F              |
|                | SL45s50-H  | 57.79             | 51.55              | 12.59                       | -                           | 16.73         | 9.97        | C              |
| Grupo HS       | SL15-HS    | 47.61             | 54.45              | -                           | -                           | n.a.          | -           | CL             |
|                | SL15s25-HS | 69.24             | 47.73              | 7.64                        | 8.24                        | 8.85          | 45.43       | D              |
|                | SL30-HS    | 47.85             | 53.00              | -                           | -                           | 19.69         | -           | CL             |
|                | SL30s25-HS | 72.96             | 65.18              | 12.75                       | 11.48                       | 26.58         | 52.48       | D              |
|                | SL30s50-HS | 80.42             | 49.19              | 9.85                        | 7.60                        | 31.67         | 68.07       | D              |
|                | SL45-HS    | 53.27             | 51.52              | -                           | -                           | 38.93         | -           | CL             |
|                | SL45s25-HS | 68.48             | 52.33              | 14.73                       | 10.44                       | 37.66         | 28.55       | C,F            |
|                | SL45s50-HS | 81.57             | 43.64              | 11.62                       | 7.49                        | 47.04         | 53.13       | C,F            |

Modos de rotura: CL - cedência da armadura longitudinal seguida de comportamento perfeitamente plástico; F - rotura do CFRP; C - rotura por corte; C,F - rotura por corte seguida de rotura do CFRP; D - destacamento da camada de betão de recobrimento.

De acordo com a Tabela 2.12, quando a extensão de compressão no betão atingiu 3.5‰, o aumento em termos de capacidade máxima de carga das faixas de laje do grupo H variou entre 2.86% e 19.76%. Deste modo, Dalfré e Barros (2012) concluíram que não foram atingidos os objetivos em termos de aumento de capacidade de carga. Nas faixas de laje do grupo HS, para uma extensão de 3.5‰ do betão comprimido, o aumento médio da capacidade de carga variou entre 27.13% e 49.44%. Tendo em conta estes valores, os autores concluíram que a aplicação de reforço com laminados de CFRP nas regiões de momentos positivos e negativos permite atingir o aumento de capacidade máxima de carga pretendido. Em termos de redistribuição de momentos, aquando da rotura, existiu uma variação entre 2.42% e 43.62% nas lajes do grupo H, pelo que não foram atingidos os valores pretendidos. Também se observou que a percentagem de redistribuição de momentos diminuiu com o aumento da percentagem de reforço de CFRP. No entanto, nas faixas de laje do grupo HS foram verificadas percentagens de redistribuição de momento fletor próxima dos valores pretendidos (variação entre 8.85% e

47.04%). Face a estes valores, os autores concluíram que a capacidade de redistribuição de momentos fletores é bastante superior quando o reforço com laminados de CFRP é realizado nas regiões de momento positivo e negativo (grupo HS) do que apenas na região de momentos negativos (grupo H). Relativamente às extensões no CFRP, quando foi atingida uma extensão no betão comprimido de 3.5‰, foram registados valores entre 4.03‰ e 9.66‰, o que corresponde a uma capacidade de aproveitamento dos laminados de 23% a 67%.

## **2.5. REFORÇO À FLEXÃO COM COMPÓSITOS DE CFRP DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO PRÉ-FENDILHADAS**

A necessidade de reabilitar ou reforçar estruturas existentes está relacionada, habitualmente, com a presença de betões em estado fendilhado (Dias *et al.*, 2004). Neste sentido, torna-se necessário avaliar o reforço com compósitos de CFRP de elementos de betão armado que apresentam um determinado padrão de fendilhação, previamente à aplicação do reforço.

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 unidireccionais. O programa experimental consistiu numa campanha de ensaios à flexão de dez faixas de laje divididas em três séries: série MIN, que continha duas lajes sem reforço de CFRP (lajes de referência); série M, composta por quatro faixas de laje reforçadas com a manta flexível curada “in situ” Replark 20; e série L, composta por quatro faixas de laje reforçadas com o laminado pré-fabricado CarboDur S512. Nas séries compostas por modelos reforçados (M e L), duas faixas de laje foram, previamente à aplicação do reforço, solicitadas até atingirem um determinado estado de fendilhação.

Na Figura 2.17 é apresentada a geometria da secção transversal das lajes de cada série, enquanto na Tabela 2.13 encontram-se informações gerais sobre os modelos ensaiados por Dias *et al.* (2004). A geometria do reforço de CFRP adotado para os modelos das séries M e L foi determinado de modo a que os modelos destas séries tivessem aproximadamente o dobro da capacidade resistente dos modelos da série MIN. Deste modo, o reforço de CFRP adotado consistiu, para o caso da manta flexível (modelos da série M), em duas faixas constituídas por sobreposição de duas camadas de manta com 7.5 cm e 6.5 cm e, para o caso dos laminados (modelos da série L), foram colocadas duas tiras com 1.6 cm de largura. A espessura das mantas (por camada) e dos laminados usados era de 0.111 mm e 1.2 mm, respetivamente.

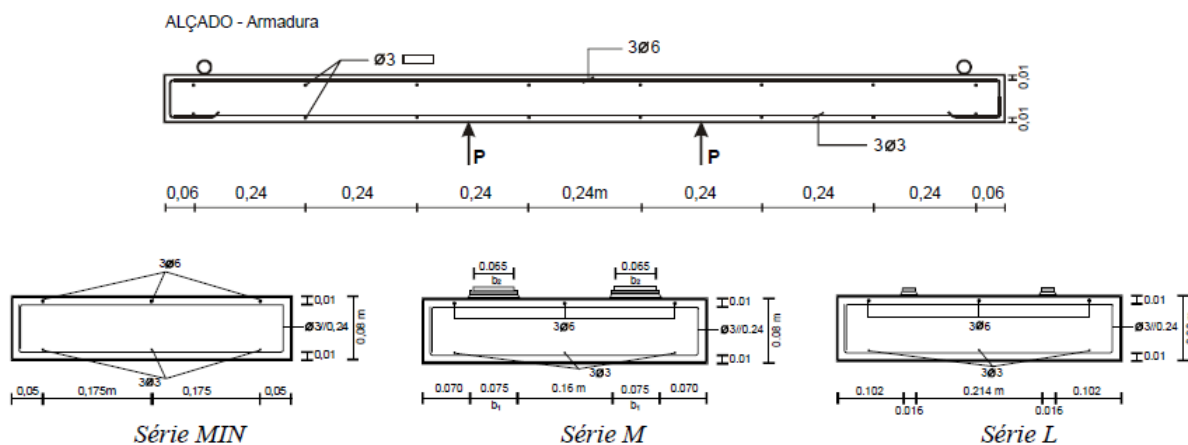


Figura 2.17 - Geometria das faixas de laje de cada série ensaiadas por Dias *et al.* (2004).

Tabela 2.13 - Informações gerais sobre as faixas de laje ensaiadas por Dias *et al.* (2004)

| Faixas de laje  |        | Betão<br>$f_{cm}$<br>(MPa) | Armadura longitudinal |                    | Pré-fendilhação | Reforço de CFRP |   |                 |
|-----------------|--------|----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|-----------------|---|-----------------|
| Série           | Modelo |                            | Quantidade            | $\rho_{st}$<br>(%) |                 | Tipo            | Quantidade  | $\rho_f$<br>(%) |
| MIN             | LA1M   | 59.5                       | 3 $\phi$ 6            | 0.25               | Não             | -               | -   | -               |
|                 | LA2M   | 59.5                       |                       |                    |                 |                 |   |                 |
| M<br>(Manta)    | LA3R   | 60.2                       | 3 $\phi$ 6            | 0.25               | Sim             | Replark 20      | 2 faixas com 2 camadas de manta (ver Figura 2.17) | 0.09            |
|                 | LB1R   | 61.6                       |                       |                    | Não             |                 |   |                 |
|                 | LC3R   | 65.8                       |                       |                    |                 |                 |   |                 |
|                 | LC4R   | 65.5                       |                       |                    |                 |                 |   |                 |
| L<br>(Laminado) | LA4S   | 60.3                       | 3 $\phi$ 6            | 0.25               | Sim             | CarboDur S512   | 2 tiras com 1.6 cm de largura (ver Figura 2.17)   | 0.11            |
|                 | LB2S   | 61.8                       |                       |                    | Não             |                 |   |                 |
|                 | LC1S   | 65.6                       |                       |                    |                 |                 |   |                 |
|                 | LC2S   | 65.7                       |                       |                    |                 |                 |   |                 |

No programa experimental realizado por Dias *et al.* (2004) foram efetuados dois tipos de ensaios à flexão em quatro pontos: ensaio tipo I, correspondente ao carregamento dos modelos LA3R, LB1R, LA4S e LB2S previamente à aplicação do reforço, de modo a atingirem um determinado padrão de fendilhação; e ensaio tipo II, em que todos os modelos foram solicitados até à rotura. No primeiro ensaio (tipo I) estabeleceu-se como critério de paragem, tendo como base a curva força *vs* deslocamento a meio vão da laje LA1M, o momento em que o deslocamento a meio vão estivesse compreendido entre 6.0 e 6.5 mm. Este carregamento provocou, essencialmente, o aparecimento de fendas de flexão pura na zona central das faixas de laje (Figura 2.18).

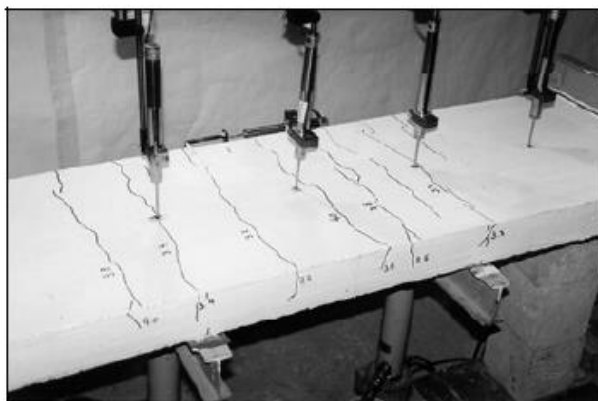


Figura 2.18 - Padrão de pré-fendilhação imposto aos modelos ensaiados por Dias *et al.* (2004).

Na Figura 2.19 encontram-se representadas as curvas médias carga total vs deslocamento central das séries de modelos ensaiados por Dias *et al.* (2004).

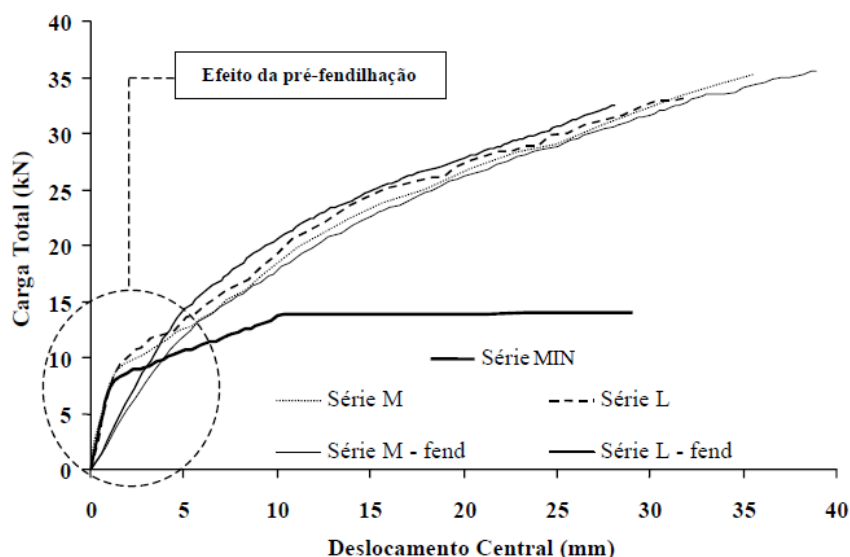


Figura 2.19 - Curvas médias carga total vs deslocamento central das faixas de laje ensaiadas por Dias *et al.* (2004).

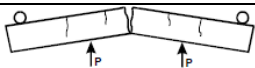
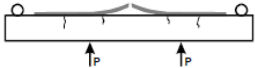
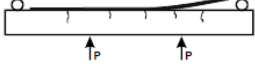
Verifica-se que os modelos reforçados com CFRP sem pré-fendilhação apresentam três estados principais de comportamento: 1) betão não fendilhado; 2) betão fendilhado com aço não plastificado; 3) betão fendilhado com aço em cedência. Após cedência da armadura, verifica-se que apenas o compósito contribui para o aumento da resistência, o que justifica o aparecimento de um troço reto ascendente na parte final das curvas dos modelos reforçados, pelo facto do CFRP apresentar comportamento linear elástico. Este comportamento não se verifica nos modelos da série MIN, que apresentam comportamento típico de um elemento de betão simplesmente armado, isto é, comportamento perfeitamente plástico após cedência das armaduras longitudinais. Através da análise da Figura 2.19 é possível concluir que, comparando as séries MIN, M e L, o reforço permitiu um aumento da capacidade de carga máxima, assim como da carga de início de fendilhação (nos modelos reforçados sem pré-fendilhação) e permitiu ganhos significativos de rigidez e de flecha na rotura. Além disso, também é possível



verificar que os modelos pré-fendilhados apresentaram uma menor rigidez na fase inicial dos ensaios relativamente aos modelos sem pré-fendilhação. No entanto após ser atingido este patamar, as curvas dos modelos pré-fendilhados vão, progressivamente, para níveis próximos dos registados nos modelos sem pré-fendilhação.

Na Tabela 2.14 apresentam-se os parâmetros utilizados para quantificar os ganhos em termos médios nos modelos reforçados em relação às faixas de laje da série MIN, isto é, os valores da carga máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) e da flecha máxima ( $\delta_{m\acute{a}x}$ ), assim como os valores da relação entre a carga máxima resistente das lajes reforçadas e a carga máxima das lajes da série MIN ( $F_{m\acute{a}x}/F_{m\acute{a}x,MIN}$ ). Além disso, na mesma tabela são apresentados os valores que permitem avaliar o desempenho dos compósitos de CFRP (séries M e L) em termos de valores médios das extensões ( $\varepsilon_{CFRP}^{max}$ ).

Tabela 2.14 - Resultados obtidos por Dias *et al.* (2004).

| Séries         | $F_{m\acute{a}x}$<br>(kN) | $F_{m\acute{a}x}/F_{m\acute{a}x,MIN}$ | $\delta_{m\acute{a}x}$ (mm) | $\varepsilon_{CFRP}^{max}$<br>(‰) | Modo de rotura   |
|----------------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| MIN            | 14.2                      | 1.00                                  | 29.7                        | -                                 | <br>Ruína da armadura (aço) |
| M<br>M - fend. | 34.5<br>35.5              | 2.43<br>2.50                          | 35.8<br>37.8                | 10.23<br>11.57                    | <br>Rotura do CFRP        |
| L<br>L - fend. | 33.4<br>32.0              | 2.35<br>2.25                          | 31.3<br>27.2                | 10.82<br>9.43                     | <br>Destacamento do CFRP  |

Comparativamente com os modelos da série MIN, as faixas de laje reforçadas com CFRP apresentaram, em termos médios, uma carga máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) 2.38 vezes superior. Quanto aos modos de ruína, verificou-se que nos modelos reforçados com laminados de CFRP (série L) ocorreu rotura por destacamento precoce do CFRP, que está relacionado com o esgotamento da capacidade de aderência do betão. Tal facto levou a um baixo rendimento do laminado de CFRP, que foi em média de 52%. Nos modelos reforçados com a manta de CFRP observou-se rotura do compósito, o que levou a um nível médio de rendimento elevado (superior a 74%). Além disso, os autores concluíram que o espaçamento médio entre fendas foi semelhante nos modelos reforçados (com e sem pré-fendilhação) e bastante inferior ao registado nos modelos da série MIN. Em termos de desempenho do reforço, verificou-se que os níveis foram idênticos independentemente de o betão se encontrar ou não pré-fendilhado.

Na Tabela 2.15 encontra-se um resumo de resultados obtidos noutros programas experimentais realizados no âmbito do reforço de vigas de betão armado com compósitos de CFRP e que apresentavam um determinado nível de dano. Nesta tabela, para cada programa experimental,

são indicadas as dimensões da secção transversal de cada viga ( $b \times h$ ) assim como o respetivo comprimento ( $L$ ), o valor médio da resistência à compressão do betão ( $f_{cm}$ ), a armadura longitudinal de tração adotada e a correspondente percentagem. Em termos de reforço de CFRP, é apresentada a quantidade utilizada, a sua secção transversal e resistência à tração ( $f_{fu}$ ). Por fim, é indicado o nível de pré-fendilhação introduzido nas vigas de betão armado e são apresentados os resultados obtidos em termos de capacidade máxima de carga, bem como o incremento relativamente à respetiva viga de referência sem reforço de CFRP.

Tabela 2.15 - Programas experimentais com o reforço à flexão com CFRP de estruturas aplicado em betão armado pré-fendilhadas.

| Autor     | Viga                    |   | Betão<br>$f_{cm}$<br>(MPa)   | Armadura<br>de tração        | Reforço de CFRP        |                |                              | Pré-<br>fendilhação    | Rotura        |         |
|-----------|-------------------------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------|----------------|------------------------------|------------------------|---------------|---------|
|           | Designação              | $b \times h \times L$<br>(mm <sup>3</sup> ) |                              |                              | Quantidade             | $f_{fu}$ (MPa) | Secção transversal           |                        | Carga<br>(kN) | Aumento |
| [1]       | S1                      | 320×160<br>×1500                            | 36                           | 4φ12<br>(0.88%) <sup>1</sup> | -                      | -              | -                            | 30% <sup>5</sup>       | 100           | -       |
|           | SM2                     |   |                              |                              | 1 Camada               | 3510           | Largura: 300 mm              |                        | 134           | 34%     |
|           | SM3                     |   |                              |                              | 1 Camada               | 3510           | Largura: 300 mm              |                        | 112           | 12%     |
|           | SM4                     |   |                              |                              | 1 Camada               | 3510           | Largura: 300 mm              |                        | 158           | 58%     |
|           | SM5                     |   |                              |                              | 1 Camada               | 3510           | Largura: 140 mm              |                        | 142           | 42%     |
|           | SM6                     |   |                              |                              | 2 Camadas              | 3510           | Largura: 300 mm              |                        | 144           | 44%     |
|           | ST2                     |   |                              |                              | 1 Camada               | 3480           | Largura: 300 mm              |                        | 128           | 28%     |
|           | ST3                     |   |                              |                              | 1 Camada               | 3480           | Largura: 300 mm              |                        | 154           | 54%     |
|           | ST4                     | 1 Camada                                    |                              | 2940                         | Largura: 300 mm        | 154            | 54%                          |                        |               |         |
|           | M1                      | 160×320<br>×1500                            |                              | 4φ16<br>(1.57%) <sup>1</sup> | -                      | -              | -                            | 30% <sup>6</sup>       | 125           | -       |
|           | MM2                     |   |                              |                              | 1 camada               | 3510           | Largura: 150 mm              |                        | 155           | 24%     |
|           | MM3                     |   |                              |                              | 1 camada               | 3510           | Largura: 150 mm              |                        | 140           | 12%     |
|           | MM4                     |   |                              |                              | 1 camada               | 3510           | Largura: 150 mm              |                        | 175           | 40%     |
|           | MM5                     |   |                              |                              | 2 camadas <sup>2</sup> | 3510           | Largura: 150 mm              |                        | 260           | 108%    |
| MT2       | 1 camada                |   | 3480                         |                              | Largura: 150 mm        | 150            | 20%                          |                        |               |         |
| MT3       | 1 camada                |   | 3480                         |                              | Largura: 150 mm        | 160            | 28%                          |                        |               |         |
| MT4       | 1 camada <sup>3</sup>   |   | 3480                         |                              | Largura: 150 mm        | 140            | 12%                          |                        |               |         |
| MT5       | 1 camada <sup>3,4</sup> | 3480  | Largura: 150 mm              | 150                          | 20%                    |                |                              |                        |               |         |
| [2]       | CL30                    | 150×250<br>×2700                            | 40.3                         | 3φ14<br>(1.23%) <sup>1</sup> | -                      | -              | -                            | -                      | 102           | -       |
|           | CFC30                   |   |                              |                              | 2 laminados            | 3350           | 150×0.111 (mm <sup>2</sup> ) | -                      | 140           | 37%     |
|           | DBL30-1                 |   |                              |                              | 2 laminados            | 3350           | 150×0.111 (mm <sup>2</sup> ) | 25-25 kN <sup>7</sup>  | 135           | 32%     |
|           | DBL30-2                 |   |                              |                              | 2 laminados            | 3350           | 150×0.111 (mm <sup>2</sup> ) | 70-70 kN <sup>8</sup>  | 125           | 23%     |
|           | RDBL30-1A               |   |                              |                              | 2 laminados            | 3350           | 150×0.111 (mm <sup>2</sup> ) | 70-25 kN <sup>9</sup>  | 125           | 23%     |
|           | DBL30-3                 |   |                              |                              | 2 laminados            | 3350           | 150×0.111 (mm <sup>2</sup> ) | 90-90 kN <sup>10</sup> | 145           | 42%     |
| RDBL30-1B | 2 laminados             | 3350  | 150×0.111 (mm <sup>2</sup> ) | 90-25 kN <sup>11</sup>       | 128                    | 25%            |                              |                        |               |         |
| [3]       | CB1                     | 120×150<br>×2000                            | 21                           | 2φ10<br>(0.87%) <sup>1</sup> | -                      | -              | -                            | -                      | 21.41         | -       |
|           | CB2                     |   | 38                           |                              | -                      | -              | -                            | -                      | 23.92         | -       |
|           | RB1                     |   | 21                           |                              | 1 laminado             | 2800           | 100×1.2 (mm <sup>2</sup> )   | 0% <sup>12</sup>       | 40.11         | 87%     |
|           | RB2                     |   | 21                           |                              | 1 laminado             | 2800           | 100×1.2 (mm <sup>2</sup> )   | 80% <sup>12</sup>      | 37.66         | 76%     |
|           | RB3                     |   | 21                           |                              | 1 laminado             | 2800           | 100×1.2 (mm <sup>2</sup> )   | 90% <sup>12</sup>      | 32.10         | 50%     |
|           | RB4                     |   | 21                           |                              | 1 laminado             | 2800           | 100×1.2 (mm <sup>2</sup> )   | 100% <sup>12</sup>     | 30.75         | 44%     |
|           | RB5                     |   | 21                           |                              | 1 laminado             | 2800           | 50×1.2 (mm <sup>2</sup> )    | 90% <sup>12</sup>      | 30.10         | 40%     |
| RB6       | 38                      | 1 laminado                                  | 2800                         | 100×1.2 (mm <sup>2</sup> )   | 90% <sup>13</sup>      | 37.37          | 56%                          |                        |               |         |

[1] Arduini e Nanni (1997); [2] Wenwei e Guo (2005); [3] Benjeddou et al. (2006). <sup>1</sup> Percentagem de armadura longitudinal de tração, dada por:  $\rho_{sl} = A_{sl}/(bd)$ , em que  $A_{sl}$  é a área da armadura,  $b$  é a base da viga e  $d$  é a altura útil das armaduras de tração; <sup>2</sup>Viga reforçada com uma camada adicional de CFRP nas faces laterais; <sup>3</sup>Viga reforçada sob carregamento constante igual à carga de pré-fendilhação; <sup>4</sup>Viga pré-esforçada de modo a eliminar a flecha provocada pela pré-fendilhação; <sup>5</sup>Percentagem da capacidade máxima de carga da viga de referência S1; <sup>6</sup>Percentagem da capacidade máxima de carga da viga M1; <sup>7</sup>Viga pré-fendilhada sob carregamento de 25 kN e reforçada sob carregamento constante de 25 kN; <sup>8</sup>Viga pré-fendilhada sob carregamento de 70 kN e posteriormente reforçada sob carregamento constante de 70 kN; <sup>9</sup>Viga pré-fendilhada sob carregamento de 70 kN e posteriormente reforçada sob carregamento constante de 25 kN; <sup>10</sup>Viga pré-fendilhada sob carregamento de 90 kN e posteriormente reforçada sob carregamento constante de 90 kN; <sup>11</sup>Viga pré-fendilhada sob carregamento de 90 kN e posteriormente reforçada sob carregamento constante de 25 kN; <sup>12</sup>Percentagem da capacidade de carga máxima da viga de referência CB1; <sup>13</sup>Percentagem da capacidade de carga máxima da viga de referência CB2.

Arduini e Nanni (1997) concluíram, com o programa experimental desenvolvido, que as vigas pré-fendilhadas apresentaram uma menor rigidez inicial assim como uma inferior capacidade de carga relativamente às vigas reforçadas sem qualquer nível de dano introduzido. Wenwei e Guo (2005) concluíram que o parâmetro que mais afeta a capacidade máxima de carga de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP que continham um determinado nível de dano é o nível de pré-fendilhação introduzida previamente à aplicação do reforço.

## **2.6. REFORÇO À FLEXÃO COM COMPÓSITOS DE CFRP DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO SUJEITAS A CARREGAMENTO CÍCLICO**

Existem determinadas estruturas de betão, como é o caso de pontes e viadutos, que ao longo do seu período de vida são solicitadas por um elevado número de carregamentos cíclicos. Como muitas destas estruturas podem ou poderão vir a ter necessidade de ser reforçadas (eventualmente com compósitos de CFRP), torna-se necessário avaliar o comportamento dos reforços de CFRP quando aplicados a estruturas submetidas a carregamentos cíclicos.

Considerando a necessidade de estudar o comportamento dos compósitos de CFRP quando submetidos à ação da fadiga, torna-se primeiramente importante conhecer o comportamento dos materiais de um modo geral quando sujeitos a este tipo de carregamento. Deste modo, quando solicitados a um elevado número de carregamentos cíclicos, os materiais podem exibir menor capacidade de carga do que quando solicitados monotonicamente (devido ao efeito de fadiga), sendo possível observar uma redução da sua resistência, função da frequência, da amplitude, da tensão máxima e do número de ciclos do carregamento aplicado.

### **2.6.1. Comportamento à fadiga do betão e do aço**

Na Figura 2.20 encontra-se representado, em termos gerais, o comportamento à fadiga do betão e do aço em função do número de ciclos aplicados. Verifica-se que, no caso do aço, a curva se torna paralela do eixo horizontal a partir de um determinado número de ciclos. Esta tensão limite (designada de “Endurance limit” na língua inglesa) representa o valor de tensão abaixo do qual o material tem resistência infinita à fadiga. No caso do betão, observa-se que a curva é sempre descendente, sendo possível determinar a resistência à fadiga do betão para um determinado ciclo.

A rotura do varão de aço submetido a carregamento cíclico acontece quando as tensões se acumulam na superfície do varão, o que leva à abertura de fendas na superfície do elemento. Com o incremento do número de ciclos, as fendas aumentam de dimensões, levando à

diminuição da secção transversal ativa da armadura e consequente aumento da tensão acumulada, até que a armadura de aço atinge a rotura (Oudah e El-Hacha, 2013).

O comportamento do aço quando solicitado à fadiga depende essencialmente de dois fatores: amplitude do carregamento cíclico e tensão máxima aplicada (Oudah e El-Hacha, 2013). No entanto, aspetos como a corrosão das armaduras, o tipo de aço e a forma da secção transversal também influenciam a resistência à fadiga das armaduras. A corrosão das armaduras de aço conduz a uma redução da secção transversal ativa e, conseqüentemente, leva ao incremento das tensões que atuam na estrutura. Este fenómeno leva a uma rotura prematura relativamente ao caso das armaduras não apresentarem qualquer corrosão (Heffernan, 1997).

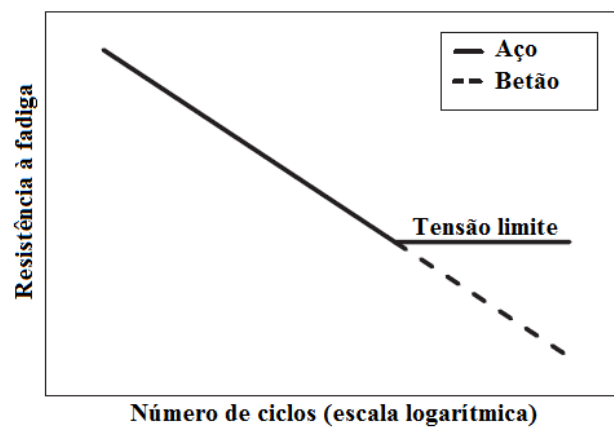


Figura 2.20 - Comportamento do aço e betão sob carregamento cíclico (Oudah e El-Hacha, 2013)

### 2.6.2. Comportamento à fadiga do material composto de CFRP

O comportamento dos FRP sujeitos a carregamento cíclico depende de diversos fatores. Estes fatores estão relacionados com as propriedades do material composto (tipo e quantidade de fibras e tipo de resina) e parâmetros do ensaio à fadiga (frequência, número de ciclos e amplitude do carregamento).

A Figura 2.21 representa as tensões máximas no material composto de CFRP em função do número de ciclos aplicados no carregamento. Verifica-se que a resistência do CFRP após aplicação de um elevado número de carregamentos cíclicos é semelhante à sua resistência quando solicitado monotonicamente, resultando numa reta próxima da horizontal. Esta constatação permite concluir que, contrariamente à maioria dos materiais, a resistência à fadiga do CFRP é praticamente igual à sua resistência a carregamentos monotónicos (Heffernan, 1997). No entanto, o comportamento à fadiga de um elemento de betão armado reforçado com CFRP não é apenas função do somatório da resistência de cada material que o constitui. A ligação entre cada um dos seus componentes é fundamental no comportamento à fadiga do

elemento. Deste modo, caso a ligação entre os materiais seja afetada devido ao efeito de fadiga, a resistência do elemento será significativamente reduzida (Heffernan, 1997).

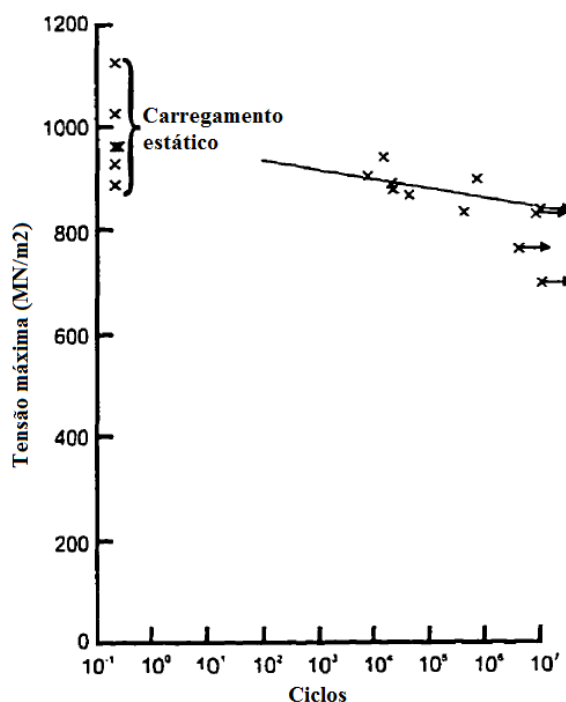


Figura 2.21 - Comportamento do material de CFRP sujeito a carregamento cíclico (Heffernan, 1997).

### 2.6.3. Comportamento à flexão de vigas de betão armado reforçadas com compósitos de CFRP sujeitas a carregamento cíclico

Quando uma viga reforçada com compósitos de CFRP é submetida a carregamento monotónico ocorre redistribuição de tensões entre a armadura longitudinal e o CFRP, o que leva a um melhor comportamento do elemento de betão armado em serviço e na rotura. O mesmo se passa quando as vigas reforçadas com CFRP são submetidas a carregamento cíclico. Com efeito, com a redução das tensões acumuladas na armadura, a rotura ocorre para um número de ciclos superior ao que seria esperado no caso da viga não se encontrar reforçada (Kim e Heffernan, 2008).

A resistência à fadiga de uma viga de betão armado é função de diversos parâmetros. No entanto, aquele que apresenta maior influência no seu desempenho é a amplitude do carregamento cíclico. A Figura 2.22 representa a relação entre o número de ciclos necessários para ocorrer a rotura e a amplitude de carregamento. Verifica-se que a um aumento da amplitude (ou aumento das tensões na armadura) está associada uma redução do número de ciclos na rotura, logo um decréscimo da resistência à fadiga. Além disso, é possível observar que, independentemente da amplitude de carregamento aplicado, a resistência à fadiga de uma viga reforçada com materiais compósitos é sempre superior à resistência de uma viga não reforçada.

Na Tabela 2.16 são apresentados resultados de ensaios experimentais realizados por diversos autores que compararam a resistência à fadiga de vigas não reforçadas e reforçadas com CFRP.

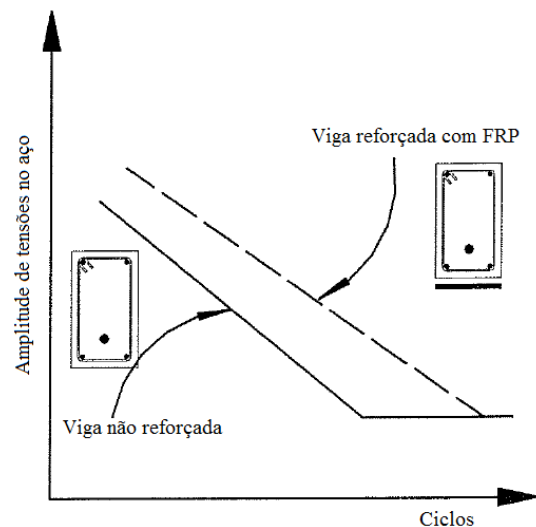


Figura 2.22 - Amplitude de tensões na armadura longitudinal vs número de carregamentos cíclicos em vigas reforçadas e não reforçadas com FRP (Kim e Heffernan, 2008).

Tabela 2.16 - Incremento da resistência à fadiga de vigas de betão armado reforçadas com CFRP (adaptado de Kim e Heffernan, 2008).

| Referência                            | Viga   | Reforço | Carga máxima de fadiga |                  | Rotura por fadiga   |                    |
|---------------------------------------|--------|---------|------------------------|------------------|---------------------|--------------------|
|                                       |        |         | Carga máxima (kN)      | Nível (%)        | Número de ciclos    | Incremento (rácio) |
| Barnes e Mays (1999)                  | Nº.1   | –       | 40 kN                  | 53% <sup>1</sup> | 20×10 <sup>3</sup>  | 95                 |
|                                       | Nº.4   | CFRP    | 40 kN                  | 53% <sup>1</sup> | 1.9×10 <sup>6</sup> |                    |
| Papakonstantinou <i>et al.</i> (2001) | N-8    | –       | 40 kN                  | 68% <sup>2</sup> | 650×10 <sup>3</sup> | 9.2                |
|                                       | S-11   | CFRP    | 40 kN                  | 68% <sup>2</sup> | 6×10 <sup>6</sup>   |                    |
| Heffernan e Erki (2004)               | NFa-M  | –       | 98 kN                  | 70% <sup>3</sup> | 290×10 <sup>3</sup> | 3.1                |
|                                       | CFa-M  | CFRP    | 98 kN                  | 70% <sup>3</sup> | 900×10 <sup>3</sup> |                    |
| Masoud <i>et al.</i> (2005)           | 11-U   | –       | 54 kN                  | 83% <sup>2</sup> | 109×10 <sup>3</sup> | 2.1                |
|                                       | 11-RII | CFRP    | 54 kN                  | 83% <sup>2</sup> | 232×10 <sup>3</sup> |                    |

<sup>1</sup>Percentagem da capacidade máxima de carga; <sup>2</sup>Percentagem da tensão de cedência da armadura longitudinal; <sup>3</sup>Percentagem da força que leva à cedência da armadura longitudinal.

Durante um carregamento cíclico, verifica-se que grande parte do dano acumulado nas vigas de betão armado reforçadas com materiais de CFRP acontece nos ciclos iniciais do carregamento. Após estes ciclos, a estrutura sofre pouco dano devido ao carregamento imposto (ciclos intermédios), registando-se novamente acumulação de dano na estrutura imediatamente antes de ocorrer a rotura (Kim e Heffernan, 2008). A Figura 2.23 demonstra a evolução de diversos parâmetros numa viga de betão armado (dano, extensões, deformações e abertura de fendas) ao longo de um carregamento cíclico.

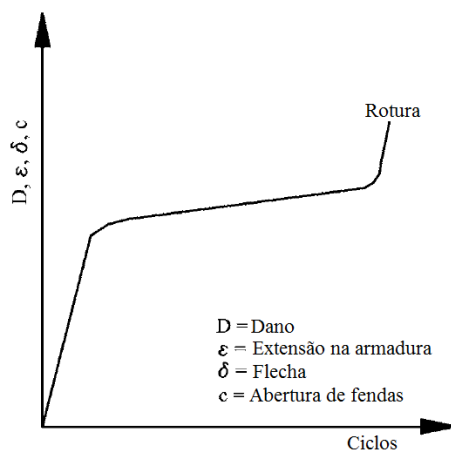


Figura 2.23 - Evolução dos parâmetros referentes a vigas de betão reforçadas à flexão com CFRP em termos de fadiga (Kim e Heffernan, 2008).

**2.6.4. Modos de rotura**

O modo de rotura observado com maior frequência em vigas de betão armado reforçadas com compósitos de CFRP submetidas a carregamento cíclico é a rotura da armadura longitudinal seguida de rotura do FRP. Deste modo, a resistência à fadiga destas estruturas é essencialmente controlada pelo comportamento à fadiga da armadura e não pela resistência dos materiais compósitos ou do betão ao carregamento cíclico. No entanto, o reforço de FRP torna-se importante no retardamento da rotura pelo facto de diminuir as tensões na armadura. A ocorrência da rotura da armadura previamente à rotura do CFRP deve-se ao facto da rotura por fadiga das armaduras ocorrer para valores mais baixos do que acontece nos FRP. Posteriormente, para níveis de tensão superiores, ocorre rotura do material compósito de FRP. No entanto, outros modos de rotura podem ocorrer, tal como o esmagamento do betão, o descolamento da camada de betão de recobrimento (que pode ou não incluir o reforço de CFRP) ou rotura devido a propagação de fendas de corte para elevadas amplitudes do carregamento cíclico. A Figura 2.24 apresenta a sequência de rotura de uma viga de betão armado sujeita a carregamento cíclico reforçada com compósitos de FRP.

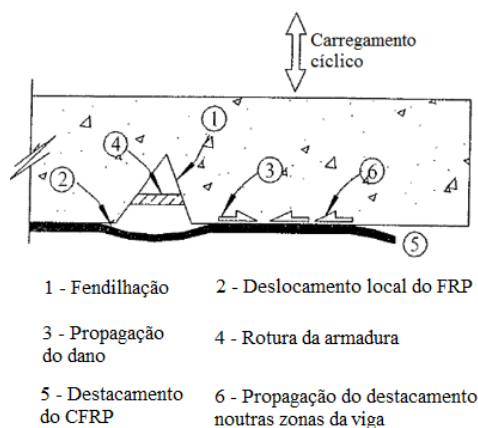


Figura 2.24 - Sequência de rotura de uma viga de betão armado reforçada com FRP sujeita a carregamento cíclico (Kim e Heffernan, 2008).

A Tabela 2.17 apresenta uma compilação de resultados obtidos em programas experimentais desenvolvidos por diversos autores que estudaram o comportamento à fadiga de vigas de betão armado reforçadas com compósitos de CFRP. Nesta tabela, para cada programa experimental, é especificada a secção transversal das vigas ensaiadas ( $b \times h$ ), assim como o respetivo comprimento ( $L$ ). Além disso, é apresentada a percentagem de armadura longitudinal ( $\rho_s$ ) e a percentagem de reforço de CFRP ( $\rho_f$ ). Relativamente ao carregamento cíclico imposto, é indicado o valor da frequência, o valor mínimo e máximo do carregamento ( $S_{min}$  e  $S_{max}$ , respetivamente) e o número de ciclos para o qual as vigas atingiram a rotura.

Tabela 2.17 - Resistência à fadiga de vigas de betão armado reforçadas com CFRP (adaptado de Kim e Heffernan, 2008).

| Autor            | Viga    |  | Armadura de tração | Reforço de CFRP | Carregamento cíclico |                              |                           | Modo de rotura |
|------------------|---------|--|--------------------|-----------------|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------------|
|                  | ID      | $b \times h \times L$<br>(mm <sup>3</sup> )  | $\rho_s$<br>(%)    | $\rho_f$<br>(%) | Freq.<br>(Hz)        | $S_{min}$ - $S_{max}$<br>(%) | Nº de ciclos até à rotura |                |
| [1]              | 3       | 130×230× 2300  | 1.3                | 0.37            | 1                    | 4-43 <sup>b</sup>            | 508×10 <sup>3</sup>       | RA-RC          |
|                  | 4       |  |                    |                 | 1                    | 4-35 <sup>b</sup>            | 1.9×10 <sup>6</sup>       | RA-RC          |
|                  | 5       |  |                    |                 | 1                    | 3-28 <sup>b</sup>            | >12×10 <sup>6</sup>       | Sem rotura     |
| [2] <sup>a</sup> | F-2L5-A | $\left( \begin{array}{l} b_f = 584 \\ h_f = 89 \\ b_w = 120 \\ h_w = 356 \end{array} \right) \times 5800$  | 2.76               | 0.24            | 1                    | 25-50 <sup>b</sup>           | 1.8×10 <sup>6</sup>       | RA             |
|                  | F-3L5-A |  |                    | 0.36            | 1                    | 25-50 <sup>b</sup>           | 3.0×10 <sup>6</sup>       | RA             |
| [3]              | TIF     | 120×175× 2000  | 0.9                | 4.03            | 3                    | 10-80 <sup>b</sup>           | 217×10 <sup>3</sup>       | RA             |
|                  | TIIF    |  |                    | 4.35            | 3                    | 10-80 <sup>b</sup>           | 517×10 <sup>3</sup>       | RA             |
|                  | SIF     |  |                    | 4.03            | 3                    | 10-80 <sup>b</sup>           | 326×10 <sup>3</sup>       | RA             |
| [4] <sup>a</sup> | RS1     | $\left( \begin{array}{l} b_f = 559 \\ h_f = 102 \\ b_w = 209 \\ h_w = 406 \end{array} \right) \times 6100$ | 0.25               | 0.18            | 1                    | 14-80 <sup>d</sup>           | 309×10 <sup>3</sup>       | RA-RC          |
|                  | RS2     |  |                    | 0.18            | 1                    | 10-63 <sup>d</sup>           | 1.3×10 <sup>6</sup>       | RA-RC          |
|                  | RF1     |  |                    | 0.4             | 1                    | 14-80 <sup>d</sup>           | 193×10 <sup>3</sup>       | RA-RC          |
|                  | RF2     |  |                    | 0.4             | 1                    | 3-63 <sup>d</sup>            | 960×10 <sup>3</sup>       | RA-RC          |
| [5]              | CFa-L   | 150×300×3000   | 1.8                | 0.23            | 3                    | 20-60 <sup>c</sup>           | 4.9×10 <sup>6</sup>       | RA-RC          |
|                  | CFa-M   | 150×300×3000   | 1.8                | 0.23            | 3                    | 20-70 <sup>c</sup>           | 900×10 <sup>3</sup>       | RA-RC          |
|                  | CFa-H   | 150×300×3000   | 1.8                | 0.23            | 3                    | 20-80 <sup>c</sup>           | 340×10 <sup>3</sup>       | RA-RC          |
|                  | CF-2    | 300×574× 5000  | 1                  | 0.17            | 1.5                  | 20-70 <sup>c</sup>           | 312×10 <sup>3</sup>       | RA-RC          |
|                  | CF-4    | 300×574× 5000  | 1                  | 0.34            | 1.5                  | 20-70 <sup>c</sup>           | 627×10 <sup>3</sup>       | RA-RC          |
|                  | CF-6    | 300×574× 5000  | 1                  | 0.51            | 1.5                  | 20-70 <sup>c</sup>           | 1.0×10 <sup>6</sup>       | RA-RC          |
| [6]              | C1      | 100×150×1215   | 0.6                | 0.4             | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>           | >0.4×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|                  | CW      |  |                    | 0.4             | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>           | >0.4×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|                  | CW-S    |  |                    | 0.4             | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>           | >0.4×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|                  | CI      |  |                    | 0.4             | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>           | >0.4×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|                  | CI-S    |  |                    | 0.4             | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>           | >0.4×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|                  | R1      |  |                    | 0.04            | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>           | >0.4×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|                  | RW      |  |                    | 0.04            | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>           | >0.4×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|                  | RW-S    |  |                    | 0.04            | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>           | >0.4×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|                  | RI      |  |                    | 0.04            | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>           | >0.4×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|                  | RI-S    |  |                    | 0.04            | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>           | >0.4×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
| [7]              | AF-1    | 203×356×2896   | 0.6                | 0.08            | 2                    | 35 <sup>d</sup>              | >10×10 <sup>3</sup>       | F-M            |
|                  | AF-4    | 203×356×2896   |                    | 0.08            | 2                    | 87 <sup>d</sup>              | 155×10 <sup>3</sup>       | RA             |
|                  | BF-1    | 203×406×3200   |                    | 0.16            | 2                    | 40 <sup>d</sup>              | >1×10 <sup>6</sup>        | F-M            |
|                  | BF-2    | 203×406×3200   |                    | 0.16            | 2                    | 56 <sup>d</sup>              | >1×10 <sup>6</sup>        | F-M            |
|                  | BF-3    | 203×406×3200   |                    | 0.16            | 2                    | 92 <sup>d</sup>              | 55×10 <sup>3</sup>        | RC             |
|                  | BF-4    | 203×406×3200   |                    | 0.16            | 2                    | 106 <sup>d</sup>             | 9×10 <sup>3</sup>         | RC             |



Tabela 2.17 (cont.) - Resistência à fadiga de vigas de betão armado reforçadas com CFRP (adaptado de Kim e Heffernan, 2008).

| Autor  | Viga              |   | Armadura de tração | Reforço de CFRP    | Carregamento cíclico |   |                           | Modo de rotura |
|--------|-------------------|---|--------------------|--------------------|----------------------|---|---------------------------|----------------|
|        | ID                | $b \times h \times L$<br>(mm <sup>3</sup> ) | $\rho_s$<br>(%)    | $\rho_f$<br>(%)    | Freq.<br>(Hz)        | $S_{min}-S_{max}$<br>(%)  | Nº de ciclos até à rotura |                |
| [8]    | A1-4-80           | 102×102×914                                 | 1.86               | 0.86               | 4                    | 8-80 <sup>d</sup>   | 132×10 <sup>3</sup>       | RC             |
|        | A1-4-70           |   |                    | 0.86               | 4                    | 8-70 <sup>d</sup>   | 288×10 <sup>3</sup>       | RA-RC          |
|        | A1-4-60           |   |                    | 0.86               | 4                    | 8-60 <sup>d</sup>   | 778×10 <sup>3</sup>       | RA-RC          |
|        | B2-2-70           |   |                    | 0.98               | 4                    | 8-70 <sup>d</sup>   | 150×10 <sup>3</sup>       | RC             |
|        | C1-2-80U          |   |                    | 0.86               | 4                    | 8-80 <sup>d</sup>   | >0.5×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|        | C1-2-70U          |   |                    | 0.86               | 4                    | 8-70 <sup>d</sup>   | >0.5×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|        | C1-2-60U          |   |                    | 0.86               | 4                    | 8-60 <sup>d</sup>   | >0.5×10 <sup>6</sup>      | F-M            |
|        | C1-2-80S          |   |                    | 0.86               | 4                    | 8-80 <sup>d</sup>   | 327×10 <sup>3</sup>       | RA-RC          |
|        | C1-2-70S          |   |                    | 0.86               | 4                    | 8-70 <sup>d</sup>   | 440×10 <sup>6</sup>       | RA-RC          |
|        | C1-2-60S          |   |                    | 0.86               | 4                    | 8-60 <sup>d</sup>   | >4×10 <sup>6</sup>        | F-M            |
| [9]    | L400A             | 100×150×1215                                | 0.6                | 0.4                | 3                    | 15-35 <sup>d</sup>  | 400×10 <sup>3</sup>       | F-M            |
|        | L400B             |   |                    |                    | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>  | 400×10 <sup>3</sup>       | F-M            |
|        | L800A             |   |                    |                    | 3                    | 15-35 <sup>d</sup>  | 800×10 <sup>3</sup>       | F-M            |
|        | L800B             |   |                    |                    | 3                    | 15-35 <sup>d</sup>  | 800×10 <sup>3</sup>       | F-M            |
|        | L800C             |   |                    |                    | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>  | 800×10 <sup>3</sup>       | F-M            |
|        | L2000A            |   |                    |                    | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>  | 2×10 <sup>6</sup>         | F-M            |
|        | L2000B            |   |                    |                    | 2                    | 15-35 <sup>d</sup>  | 2×10 <sup>6</sup>         | F-M            |
|        | H400A             |   |                    |                    | 2                    | 35-75 <sup>d</sup>  | 400×10 <sup>3</sup>       | F-M            |
|        | H400B             |   |                    |                    | 2                    | 35-75 <sup>d</sup>  | 400×10 <sup>3</sup>       | DC             |
|        | H800A             |   |                    |                    | 2                    | 35-75 <sup>d</sup>  | 800×10 <sup>3</sup>       | F-M            |
|        | H800B             |   |                    |                    | 2                    | 35-75 <sup>d</sup>  | 800×10 <sup>3</sup>       | DC             |
|        | H2000A            |   |                    |                    | 2                    | 35-75 <sup>d</sup>  | 2×10 <sup>6</sup>         | DC             |
|        | H2000B            |   |                    |                    | 2                    | 35-75 <sup>d</sup>  | 2×10 <sup>6</sup>         | F-M            |
|        | [10] <sup>a</sup> |   |                    |                    | Viga 3               | $\left( \begin{matrix} b_f = 457 \\ h_f = 102 \\ b_w = 178 \\ h_w = 356 \end{matrix} \right) \times 5000$ | 0.21                      | 0.06           |
| Viga 5 |                   | 3   | 2-30 <sup>b</sup>  | >3×10 <sup>6</sup> | F-M                  |   |                           |                |
| [11]   | S-1               | 254×165×1956                                | 0.7                | 0.08               | 2                    | 33-63 <sup>b</sup>  | >2×10 <sup>6</sup>        | F-M            |
|        | S-2               |   |                    | 0.08               | 2                    | 33-63 <sup>b</sup>  | >2×10 <sup>6</sup>        | F-M            |
|        | S-3               |   |                    | 0.77               | 2                    | 33-63 <sup>b</sup>  | >2×10 <sup>6</sup>        | F-M            |
|        | S-4               |   |                    | 0.77               | 2                    | 33-63 <sup>b</sup>  | >2×10 <sup>6</sup>        | F-M            |
| [12]   | 3FI-5             | 108×158×1828                                | 1                  | 0.33               | 2                    | 11-50 <sup>b</sup>  | >2×10 <sup>6</sup>        | Sem rotura     |
|        | 3FI-9             |   |                    | 0.33               | 2                    | 11-60 <sup>b</sup>  | 259×10 <sup>3</sup>       | F-M            |
|        | 3FI-12            |   |                    | 0.33               | 2                    | 11-70 <sup>b</sup>  | 74×10 <sup>3</sup>        | F-M            |
|        | 3FI-14            |   |                    | 0.33               | 2                    | 11-80 <sup>b</sup>  | 2×10 <sup>3</sup>         | F-M            |
| [13]   | SF 7-45           | 152×254×3500                                | 1.11               | 0.19               | 1.5                  | 7-45 <sup>b</sup>   | >1×10 <sup>6</sup>        | RA             |
|        | SF 7-50           |   |                    | 0.19               | 1.5                  | 7-50 <sup>b</sup>   | 630×10 <sup>3</sup>       | RA             |
|        | SF 7-60           |   |                    | 0.19               | 1.5                  | 7-60 <sup>b</sup>   | 210×10 <sup>3</sup>       | RA             |
|        | SF 7-65           |   |                    | 0.19               | 1.5                  | 7-65 <sup>b</sup>   | 130×10 <sup>3</sup>       | RA             |
| [14]   | REF               | 200×300×900                                 | 0.439              | -                  | 2                    | 25-55   | >1×10 <sup>6</sup>        | F-M            |
|        | EBR               |   | 0.550              | 0.14               | 2                    | 25-55   | >1×10 <sup>6</sup>        | F-M            |
|        | NSM               |   | 0.561              | 0.14               | 2                    | 25-55   | >1×10 <sup>6</sup>        | F-M            |

[1] Barnes e Mays (1999); [2] Shahawy e Beitelman (1999); [3] Masoud *et al.* (2001); [4] Aidoo *et al.* (2004,b); [5] Heffernan e Erki (2004); [6] Gheorghiu *et al.* (2004a,b); [7] Brena *et al.* (2005); [8] Rosenboom e Rizkalla (2005); [9] Gheorghiu *et al.* (2005); [10] Larson *et al.* (2005); [11] Ekenel *et al.* (2005); [12] Toutanji *et al.* (2006); [13] Badawi e Soudki (2009); [14] Sena-Cruz *et al.* (2012). <sup>a</sup> Viga em T, em que  $b_f$  e  $h_f$  representam, respetivamente, a largura e altura do banço e  $b_w$  e  $h_w$  representam, respetivamente, a largura e altura da alma; <sup>b</sup> Percentagem da capacidade de carga última estática da viga de referência; <sup>c</sup> Percentagem da tensão de cedência da armadura longitudinal; <sup>d</sup> Percentagem da carga de cedência da armadura. Modos de rotura: RA: rotura da armadura longitudinal; RC: rotura do CFRP; DC: descolamento do CFRP; F-M: ensaio à fadiga seguido de ensaio monotónico.

De um modo geral, os autores concluíram que o reforço de vigas sujeitas a carregamento cíclico com compósitos de CFRP é eficaz no aumento da resistência à fadiga das vigas. O modo de rotura observado com maior frequência foi a cedência da armadura longitudinal seguido de rotura do CFRP (Barnes e Mays, 1999; Masoud *et al.*, 2001; Heffernan e Erki, 2004; Gussenhoven e Brena, 2005; Larson *et al.*, 2005 e Toutanji *et al.*, 2006). No entanto, foram observados outros modos de rotura: destacamento da camada de betão de recobrimento (Shahawy e Beitelman, 1999); descolamento do CFRP (Gheorghiu *et al.*, 2004a,b) e esmagamento do betão (Rosenboom e Rizkalla, 2005; Ekenel *et al.*, 2005).

Badawi e Soudki (2009) desenvolveram um programa experimental que incluiu onze vigas, divididas em dois grupos: seis vigas de referência (sem reforço de CFRP) e cinco vigas reforçadas com CFRP segundo a técnica NSM. Uma viga de cada grupo foi ensaiada monotonicamente até à rotura, enquanto as restantes foram ensaiadas com carregamento cíclico (frequência de 1.5 Hz) com diferentes níveis de carregamento. A Tabela 2.18 apresenta detalhes sobre o programa experimental. Nesta tabela encontra-se, para cada viga ensaiada, a sua designação e a informação relativa ao tipo de carregamento (monotónico ou cíclico). Em termos de carregamento cíclico, é indicado o valor mínimo e máximo aplicado (relativamente à capacidade de carga de uma viga semelhante) e a amplitude do carregamento aplicado. Por fim, é indicado o número de ciclos necessário para as vigas atingirem a rotura.

Na Tabela 2.18 verifica-se que, independentemente do facto das vigas serem ou não reforçadas com compósitos de CFRP, o número de ciclos necessários para que as vigas atinjam a rotura diminui com o aumento da amplitude do carregamento cíclico. Além disso, os autores observaram o mesmo modo de rotura em todas as vigas submetidas a carregamento cíclico, que foi a rotura das armaduras longitudinais.

Tabela 2.18 - Programa experimental realizado por Badawi e Soudki (2009).

| Viga                | <sup>1</sup> Designação | Tipo de carregamento | Nível de carregamento    |                            | Número de ciclos até à rotura |
|---------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------------|
|                     |                         |                      | Mín-Máx (%) <sup>2</sup> | Amplitude (%) <sup>2</sup> |                               |
| Vigas de referência | CS                      | Monotónico           | -                        | -                          | -                             |
|                     | CF 10-55                | Cíclico              | 10-55                    | 45                         | 1003000                       |
|                     | CF10-65                 | Cíclico              | 10-65                    | 55                         | 340000                        |
|                     | CF 10-75                | Cíclico              | 10-75                    | 65                         | 170000                        |
|                     | CF 10-80                | Cíclico              | 10-80                    | 70                         | 90000                         |
|                     | CF 10-87                | Cíclico              | 10-85                    | 75                         | 38300                         |
| Vigas reforçadas    | SS                      | Monotónico           | -                        | -                          | -                             |
|                     | SF 7-45                 | Cíclico              | 7-45                     | 38                         | 1005000                       |
|                     | SF 7-50                 | Cíclico              | 7-50                     | 43                         | 630000                        |
|                     | SF 7-60                 | Cíclico              | 7-60                     | 53                         | 210000                        |
|                     | SF 7-65                 | Cíclico              | 7-65                     | 58                         | 130000                        |

<sup>1</sup>CS: Viga de referência submetida a carregamento estático; CF: Viga de referência submetida a carregamento cíclico; SS: Viga reforçada submetida a carregamento estático; SF: Viga reforçada submetida a carregamento cíclico. <sup>2</sup>Percentagem da capacidade de carga última de uma viga semelhante solicitada à rotura com carregamento monotónico (Vigas de referência: 64 kN; Vigas reforçadas: 96 kN).

Na Figura 2.25 encontram-se representadas as secções transversais da viga de referência e da viga reforçada, bem como o detalhe relacionado com o reforço de CFRP inserido (dimensões do entalhe e geometria do reforço). O betão das vigas tinha uma resistência à compressão de 40 MPa.

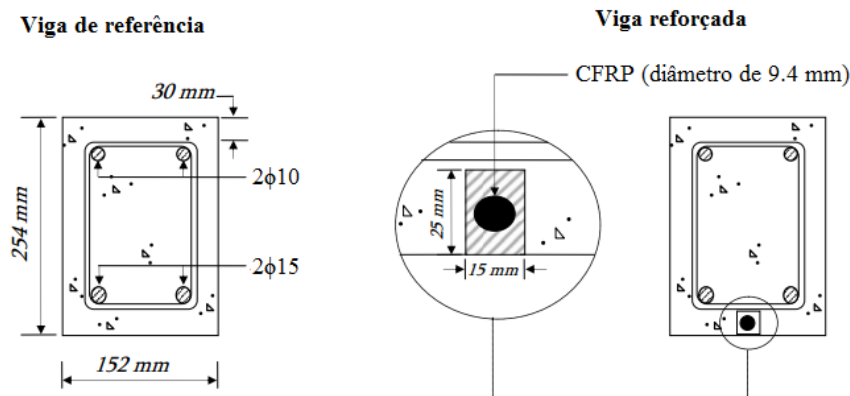


Figura 2.25 - Secção transversal das vigas de referência e reforçada de acordo com a técnica NSM (Badawi e Soudki, 2009).

A Figura 2.26 apresenta a relação entre a amplitude do carregamento cíclico e o número de ciclos suportado pelas vigas antes de terem rotura por fadiga. Em termos de resistência à fadiga, as vigas reforçadas com CFRP atingiram a rotura para um número de ciclos superior às vigas de referência sem CFRP. Por exemplo, para uma amplitude de carregamento cíclico de 50 kN, verifica-se que a viga de referência atingiu a rotura no ciclo 40000, enquanto na viga reforçada a rotura apenas ocorreu após 200000 ciclos. Deste modo, para esta gama de carregamentos, o reforço com CFRP permitiu um aumento da resistência à fadiga de cinco vezes. Por outro lado, a Figura 2.26 demonstra que o reforço com CFRP permite às vigas atingir um mesmo número de ciclos (1000000) para carregamentos bastante superiores aos suportados pelas vigas não reforçadas.

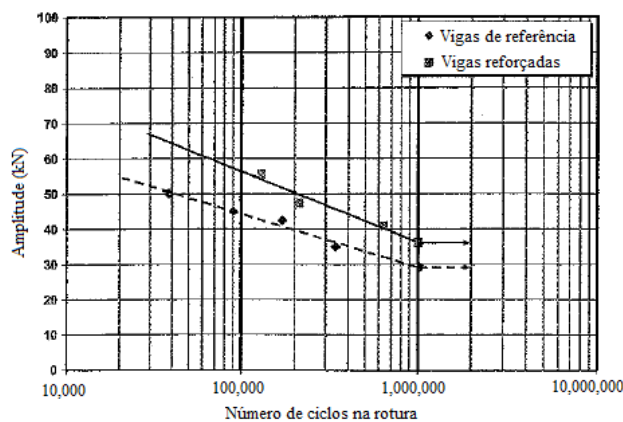


Figura 2.26 – Nível de carregamento vs número de ciclos suportados pelas vigas (Badawi e Soudki, 2009).

Fernandes *et al.* (2014) desenvolveram um programa experimental composto por ensaios à flexão em quatro pontos de carga de seis lajes de betão armado reforçadas à flexão com a técnica NSM usando laminados de CFRP, sob ação de carregamentos cíclicos. As lajes ensaiadas foram divididas em duas séries: duas lajes ensaiadas monotonicamente (série S4) e quatro lajes ensaiadas sob carregamento cíclico (série S5). A Tabela 2.19 apresenta informações sobre o programa experimental desenvolvido. As lajes, cujo betão à data dos ensaios tinha uma resistência à compressão de  $f_{cm}=48.2$  MPa, diferenciavam-se pelo facto de serem ou não reforçadas (STR ou UN, respetivamente) e serem ensaiadas sob carregamento monotónico ou cíclico (M ou F, respetivamente).

Tabela 2.19 - Programa experimental realizado por Fernandes *et al.* (2014).

| Série | Designação | Ensaio monotónico | Ensaio cíclico    |                   |                  |                  |
|-------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
|       |            | $F_p$<br>(kN)     | $F_{min}$<br>(kN) | $F_{máx}$<br>(kN) | $S_{min}$<br>(%) | $S_{máx}$<br>(%) |
| S4    | SL_UN_M    | 12.03             | -                 | -                 | -                | -                |
|       | SL_STR_M   | 31.63             | -                 | -                 | -                | -                |
| S5    | SL_UN_F75  | -                 | 5.1               | 9.0               | 42               | 75               |
|       | SL_STR_F50 | -                 | 8.3               | 15.1              | 26               | 48               |
|       | SL_STR_F70 | -                 | 16.2              | 22.5              | 51               | 71               |
|       | SL_STR_F80 | -                 | 19.6              | 26.3              | 62               | 83               |

Nota:  $F_{min}$  e  $F_{máx}$  referem-se, respetivamente, à força mínima e máxima aplicada nos carregamentos cíclicos;  $S_{min} = F_{min}/F_p$ ;  $S_{máx} = F_{máx}/F_p$ ;  $F_p$  é a capacidade de carga máxima resultante do ensaio monotónico até à rotura das lajes SL\_UN\_M e SL\_STR\_M.

Na Figura 2.27 apresenta-se a geometria das lajes em estudo bem como a configuração dos ensaios de fadiga realizados por Fernandes *et al.* (2014). As lajes tinham uma percentagem de armadura longitudinal de  $\rho_{sl} = 0.47\%$  e em termos de reforço de CFRP, a solução adotada tinha uma percentagem de  $\rho_f = 0.062\%$ .

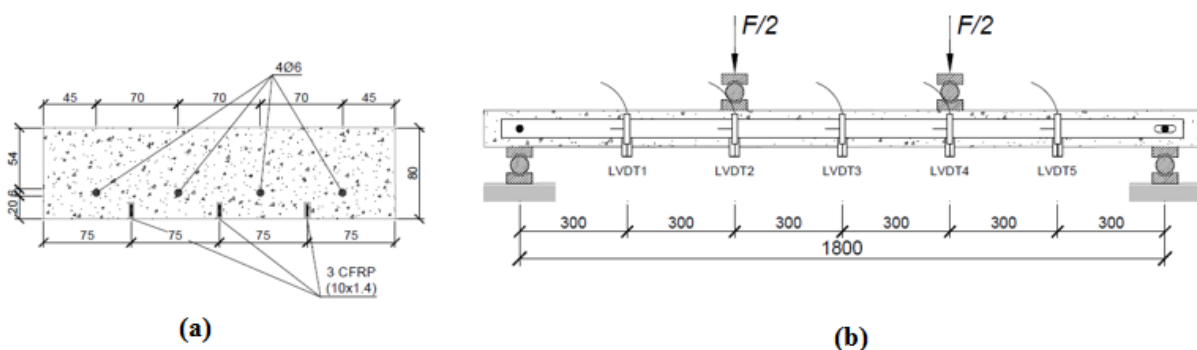


Figura 2.27 - (a) Geometria das lajes; (b) Configuração dos ensaios realizados por Fernandes *et al.* (2014).

Os ensaios realizados por Fernandes *et al.* (2014) foram constituídos por três fases: 1) carregamento das lajes até um valor da força igual ao valor médio entre  $F_{máx}$  e  $F_{min}$ ; 2) aplicação

de 2 milhões de ciclos entre  $F_{m\acute{a}x}$  e  $F_{m\acute{m}n}$  a uma frequência de 2 Hz; 3) as lajes que não atingiram rotura durante ensaio de fadiga foram submetidas a ensaio monotónico até à rotura.

Após a aplicação de 2 milhões de ciclos, nenhuma laje atingiu a rotura. Na Figura 2.28 apresentam-se os resultados dos ensaios monotónicos pós-fadiga. Os autores verificaram que as lajes submetidas ao ensaio cíclico obtiveram um melhor comportamento em termos da capacidade máxima de carga e da rigidez na fase de fendilhação estabilizada (fase II -  $K_{II}$ ). Os autores explicam este aumento de rigidez das lajes submetidas a fadiga pelo endurecimento do aço durante o ensaio com carregamento cíclico. O modo de rotura das lajes nos ensaios monotónicos pós-fadiga foi o esmagamento do betão a meio vão das lajes (o mesmo que ocorreu nas lajes SL\_UN\_M e SL\_STR\_M). Os autores concluíram que o dano acumulado durante o carregamento cíclico não afetou a capacidade de carga máxima das lajes reforçadas com CFRP.

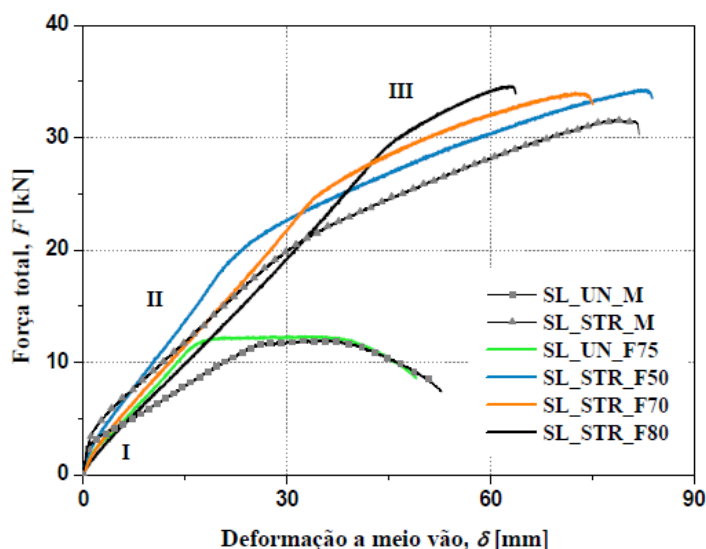


Figura 2.28 - Curvas força vs deslocamento dos ensaios monotónicos pós-fadiga (Fernandes *et al.*, 2014).

Na Tabela 2.20 apresentam-se os resultados dos ensaios realizados por Fernandes *et al.* (2014). Os resultados obtidos demonstraram que as lajes reforçadas apresentaram uma ligeira perda de rigidez durante a realização do ensaio à fadiga, enquanto a laje não reforçada (SL\_UN\_F75) apresentou uma maior perda de rigidez (aproximadamente 14%).

Tabela 2.20 - Resultados das lajes submetidas a ensaio cíclico (Fernandes *et al.*, 2014).

| Laje       | Ensaio de fadiga                        |                          | Ensaio monotónico pós-fadiga |              |
|------------|---|--------------------------|------------------------------|--------------|
|            | $(\delta_f - \delta_i)/\delta_i$<br>(%) | $(K_f - K_1)/K_1$<br>(%) | $F_{m\acute{a}x}$<br>(kN)    | $K_{II}/K_M$ |
| SL_UN_F75  | 7.93                                    | 13.7                     | 12.41                        | 1.74         |
| SL_STR_F50 | 6.58                                    | 2.0                      | 34.32                        | 1.42         |
| SL_STR_F70 | 6.37                                    | 3.6                      | 34.06                        | 1.22         |
| SL_STR_F80 | 6.05                                    | 7.2                      | 34.64                        | 1.11         |

Nota:  $\delta_i$ : deslocamento máximo registado no primeiro ciclo;  $\delta_f$ : deslocamento máximo registado no último ciclo;  $K_1$ : rigidez no primeiro ciclo;  $K_f$ : rigidez no último ciclo;  $K_{II}$ : rigidez no ensaio monotónico pós-fadiga;  $K_M$ : rigidez no ensaio monotónico das lajes não ensaiadas à fadiga.



# Capítulo 3

---

## Programa Experimental

Neste capítulo é apresentado o programa experimental desenvolvido no âmbito da presente dissertação, onde foi avaliado o efeito da pré-fendilhação do betão e do carregamento cíclico no comportamento à rotura de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM). Assim, ao longo deste capítulo serão apresentados os modelos de laje ensaiados, as características dos materiais utilizados, os tipos de ensaios realizados e a aplicação do reforço de CFRP adotado. O capítulo termina com a apresentação e análise dos resultados obtidos.

O programa experimental desenvolvido consistiu no ensaio à flexão, em quatro pontos de carga, de quatro lajes de betão armado (S2L-PC1, S2L-PC2, S2L-F1 e S2L-F2). Duas destas lajes (S2L-PC1 e S2L-PC2) foram inicialmente pré-fendilhadas e de seguida reforçadas à flexão com dois laminados de CFRP inseridos. Foram testados dois níveis de pré-fendilhação, PC1 e PC2 correspondentes à aplicação dos níveis de dano 1 e 2, respetivamente. Após o ensaio de pré-fendilhação e reforço das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2, procedeu-se ao seu ensaio até à rotura com carregamento monotónico. As restantes duas lajes (S2L-F1 e S2L-F2) foram inicialmente reforçadas com dois laminados de CFRP inseridos e, posteriormente, submetidas a dois níveis de carregamento cíclico. As lajes não atingiram a rotura durante o ensaio cíclico e foram, posteriormente, submetidas a um ensaio monotónico até à rotura. As siglas F1 e F2 indicam que as lajes foram submetidas a dois níveis distintos de carregamento cíclico, respetivamente níveis 1 e 2.

De forma a serem atingidos os objetivos da presente dissertação, os resultados experimentais obtidos foram comparados com os que foram alcançados, em ensaios previamente realizados na Universidade do Minho, numa laje semelhante à testada no presente programa experimental, com a diferença de não ter sido pré-fendilhada nem lhe ter sido imposto um carregamento cíclico, e numa laje de referência sem reforço de CFRP.

### 3.1. CONCEÇÃO DOS MODELOS

No presente programa experimental foram ensaiadas à flexão quatro lajes de betão armado (S2L-PC1, S2L-PC2, S2L-F1 e S2L-F2) com uma secção transversal de  $600 \times 120 \text{ mm}^2$ , com um comprimento total de 2600 mm e um vão de 2400 mm. Todas as lajes foram armadas

longitudinalmente na face tracionada com quatro varões de aço de 8 mm de diâmetro ( $4\phi 8$ ) e na face comprimida com três varões de 6 mm de diâmetro ( $3\phi 6$ ). Para armadura transversal foram colocados varões de 6 mm de diâmetro espaçados de 300 mm ( $\phi 6@300$ ).

A percentagem de armadura longitudinal ( $\rho_{sl}$ ) foi determinada por intermédio da equação (1):

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

Na equação anterior,  $A_{sl}$  corresponde à área da armadura longitudinal de tração ( $4\phi 8 \Rightarrow A_{sl}=201.1 \text{ mm}^2$ ),  $b_w$  refere-se à largura da secção transversal ( $b_w = 600 \text{ mm}$ ) e  $d$  é a altura útil, ou seja, é a distância desde a fibra mais comprimida do betão ao baricentro dos varões de aço da armadura longitudinal de tração. Considerando o facto do betão de recobrimento das armaduras longitudinais ter uma espessura de 31 mm e a armadura longitudinal de tração ter um diâmetro de 8 mm, o valor de  $d$  era de 85 mm. Deste modo, o valor da percentagem de armadura longitudinal de tração ( $\rho_{sl}$ ) era de 0.39%.

Na Figura 3.1 é apresentada a geometria das lajes ensaiadas, as armaduras adotadas e o tipo de ensaio realizado.

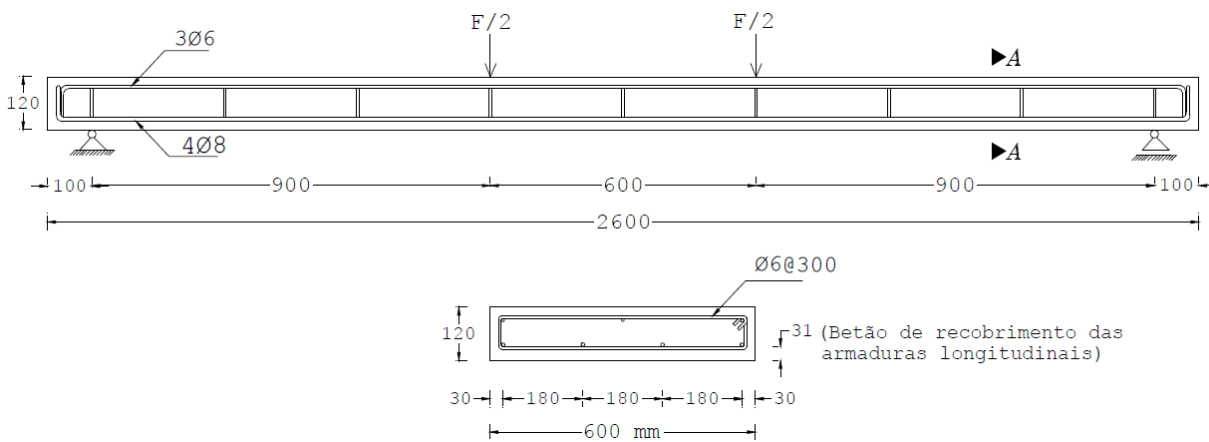


Figura 3.1 - Geometria e armaduras das lajes ensaiadas e tipo de ensaio (dimensões em mm).

Nas Figuras 3.2 a 3.4 apresentam-se alguns detalhes relativos à execução das lajes de betão armado. Assim, após a montagem das armaduras, estas foram devidamente colocadas na cofragem (Figura 3.2). Numa fase seguinte procedeu-se à betonagem das lajes (Figura 3.3-a), assim como à betonagem de provetes cilíndricos para posterior caracterização das propriedades mecânicas do betão (Figura 3.3-b). Nas Figura 3.4-a e Figura 3.4-b é possível observar as lajes de betão armado após a betonagem e o seu aspeto final após a descofragem, respetivamente.





Figura 3.2 - Aspeto das armaduras após montagem e colocação na cofragem.



a)



b)

Figura 3.3 - Betonagem: a) das lajes; b) dos provetes cilíndricos para caracterização do betão.



a)



b)

Figura 3.4 - Aspeto das lajes: a) após betonagem; b) final após a descofagem.

Em termos de reforço de CFRP, todas as lajes ensaiadas foram reforçadas à flexão com dois laminados inseridos em entalhes efetuados no betão de recobrimento de acordo com a técnica NSM. Os laminados de CFRP tinham uma secção transversal de  $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$  e um comprimento de 2300 mm (Figura 3.5). A percentagem de reforço de CFRP ( $\rho_f$ ) adotada, calculada por intermédio da equação (2), era de 0.08%.

$$\rho_f = \frac{A_f}{A_c} \times 100 \tag{2}$$

Na equação (2),  $A_f$  é a área de reforço de CFRP ( $A_f = 2 \times 1.4 \times 20 = 56 \text{ mm}^2$ ) e  $A_c$  é a área da secção transversal das faixas de laje de betão armado ( $A_c = 600 \times 120 = 72000 \text{ mm}^2$ ).

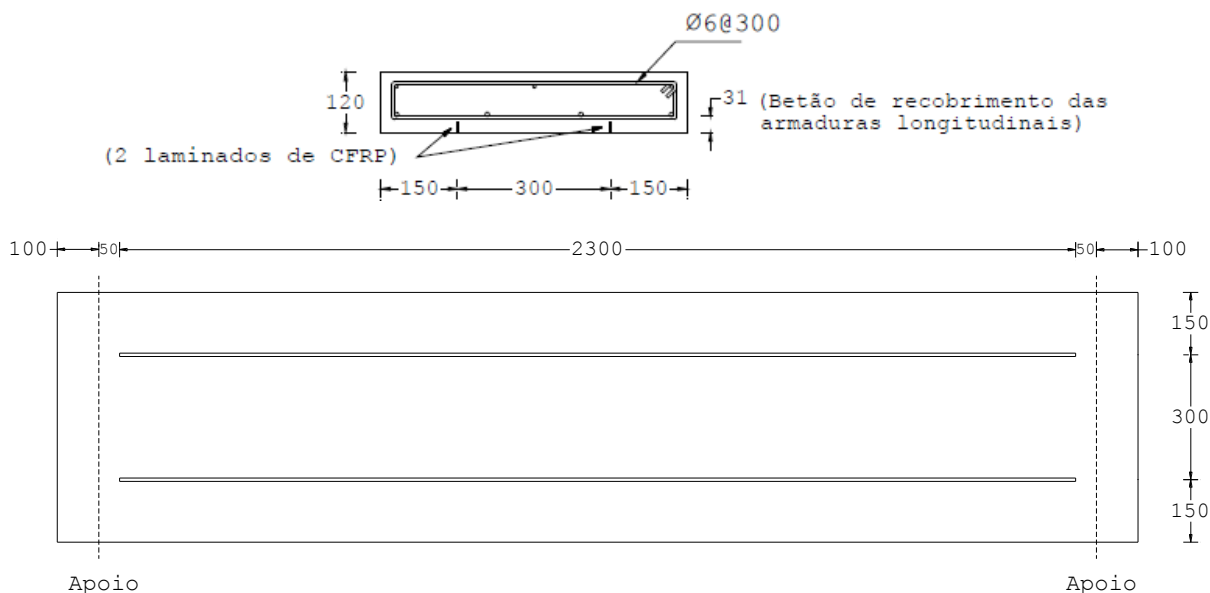


Figura 3.5 - Solução de reforço com laminados de CFRP inseridos adotada (dimensões em mm).

De acordo com o que foi referido anteriormente, o programa experimental era constituído por quatro lajes de betão armado (lajes S2L-PC1, S2L-PC2, S2L-F1 e S2L-F2). Na designação das lajes, a sigla S2L quer dizer que a laje foi reforçada à flexão com dois laminados de CFRP inseridos (Figura 3.5), as siglas PC1 e PC2 referem-se ao nível de dano (pré-fendilhação) instalado nas lajes antes da aplicação do reforço (PC1 - Nível de dano 1 e PC2 - Nível de dano 2) e as siglas F1 e F2 referem-se ao nível de carregamento cíclico instalado nas lajes (F1 - Nível de carregamento cíclico 1 e F2 - Nível de carregamento cíclico 2). Assim, no total, no presente programa experimental foram estudados dois níveis de dano (pré-fendilhação) e dois níveis de carregamento cíclico.

Na Tabela 3.1 apresentam-se as principais informações relativas às lajes ensaiadas no presente programa experimental.

Tabela 3.1 - Informações gerais das lajes ensaiadas.

| Laje    | $\rho_{st}$<br>(%) | Reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos                                      |                 | Nível de dano | Nível de carregamento cíclico |
|---------|--------------------|---|-----------------|---------------|-------------------------------|
|         |                    | Quantidade  | $\rho_f$<br>(%) |               |                               |
| S2L-PC1 | 0.39               | 2 laminados com secção de $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$<br>( $A_f = 56 \text{ mm}^2$ ) | 0.08            | 1             | -                             |
| S2L-PC2 |                    |   |                 | 2             | -                             |
| S2L-F1  |                    |   |                 | -             | 1                             |
| S2L-F2  |                    |   |                 | -             | 2                             |

## 3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados no presente programa experimental (o betão, as armaduras de aço, o reforço de CFRP e o adesivo epoxídico) foram caracterizados com recurso a ensaios experimentais. No âmbito da presente dissertação apenas foi realizada a caracterização do betão à data da realização dos ensaios das lajes. A caracterização do aço das armaduras das lajes e dos laminados de CFRP foi feita por Dias *et al.* (2014) e a caracterização do adesivo epoxídico foi efetuada por Costa e Barros (2013).

### 3.2.1. Betão

A caracterização do betão em termos do módulo de elasticidade e da resistência à compressão, à data da realização dos ensaios das lajes, foi realizada por intermédio de ensaios à compressão uniaxial em dois provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (Figura 3.6), de acordo com as normas LNEC E397-1993 (1993) e NP EN 12390-3 (2011), respetivamente. Na Figura 3.7 encontra-se representada a realização dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do betão. Na Figura 3.8 é ilustrado o modo de rotura observado nos provetes cilíndricos ensaiados.



Figura 3.6 - Provetes cilíndricos antes da realização do ensaio de compressão uniaxial.

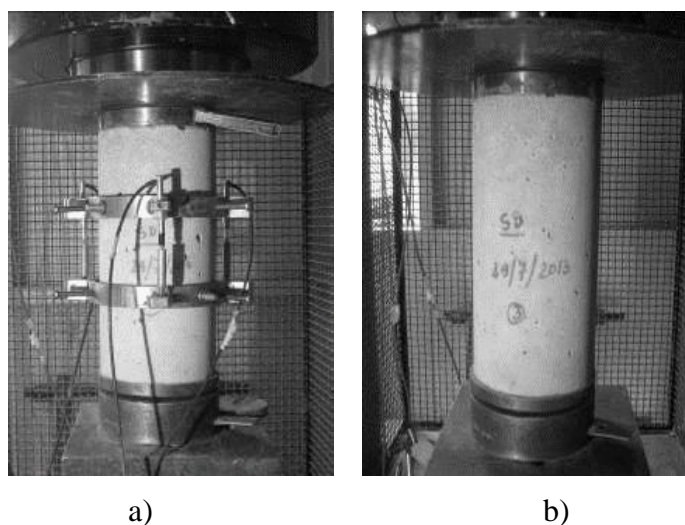


Figura 3.7 - Caracterização das propriedades mecânicas do betão à data da realização dos ensaios das lajes: a) módulo de elasticidade; b) resistência média à compressão.

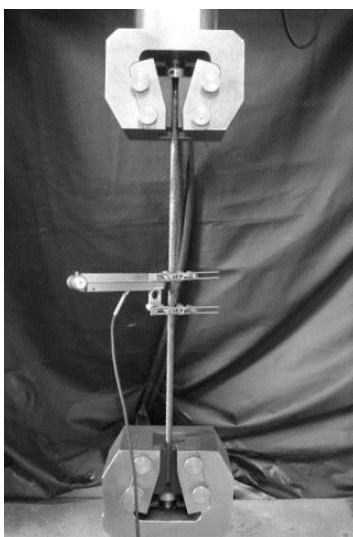


Figura 3.8 - Modo de rotura dos provetes de betão.

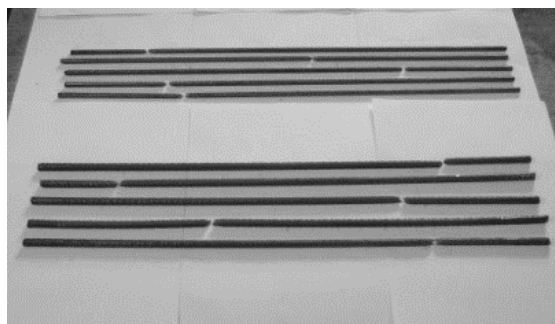
O resultado obtido na caracterização experimental do betão, em termos de valores médios, para o módulo de elasticidade foi de 33.4 GPa ( $E_{cm} = 33.4$  GPa) e para a resistência à compressão foi de 39.9 MPa ( $f_{cm} = 39.9$  MPa).

### 3.2.2. Aço

Nas lajes ensaiadas foram utilizados varões de aço nervurado de 6 e 8 mm de diâmetro, cujas propriedades foram avaliadas por intermédio de ensaios à tração uniaxial de acordo com o estipulado na norma EN 10002-1 (1990). Na Figura 3.9 apresenta-se o ensaio de tração uniaxial de um provete de aço e o modo de rotura ocorrido nos provetes ensaiados. Os resultados dos ensaios realizados, em termos do valor médio da tensão de cedência e da tensão máxima dos varões de aço testados, encontram-se na Tabela 3.2.



a)



b)

Figura 3.9 - Caracterização do aço utilizado nas armaduras das lajes: a) ensaio de tração uniaxial; b) modo de rotura dos provetes.

Tabela 3.2 - Valores das propriedades do aço das armaduras das lajes.

| Diâmetro (mm) | Tensão de cedência (MPa) | Tensão máxima (MPa) |
|---------------|--------------------------|---------------------|
| 6             | 527.6                    | 651.4               |
| 8             | 556.4                    | 679.9               |

### 3.2.3. Laminados de CFRP

A caracterização dos laminados de CFRP (S&P Laminates CFK 150/2000) utilizados no reforço das lajes de betão armado foi efetuada através da realização de ensaios à tração uniaxial de acordo com a ISO 527-5 (1997). Na Figura 3.10 apresenta-se o ensaio de tração uniaxial de um provete de laminado de CFRP e o modo de rotura típico ocorrido nos provetes ensaiados. Os valores médios obtidos para a resistência à tração, para o módulo de elasticidade e para a extensão máxima foram 2770.0 MPa, 175.5 GPa e 15.8%, respetivamente.

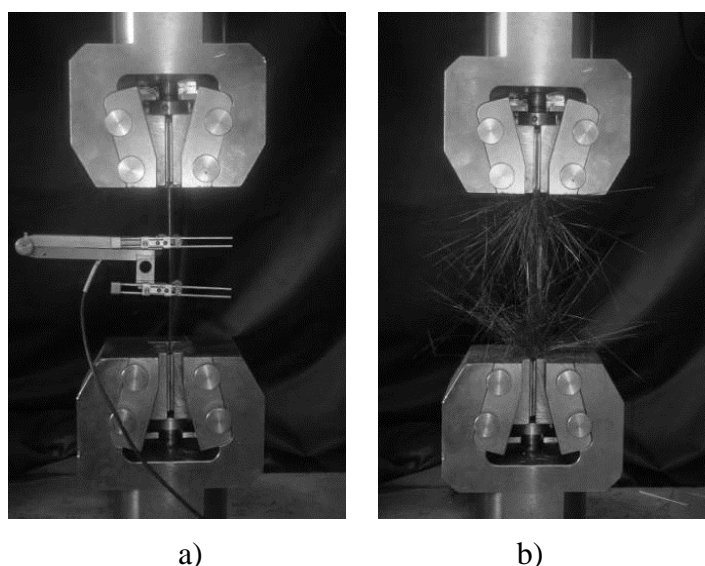


Figura 3.10 - Caracterização das propriedades mecânicas do laminado de CFRP: a) ensaio à tração uniaxial; b) modo de rotura do laminado.

### 3.2.4. Adesivo

O adesivo epoxídico, com a designação comercial “S&P Resin 220 epoxy adhesive”, foi utilizado como elemento de ligação dos laminados de CFRP ao betão. Este material é constituído por duas componentes: a componente A (a resina) e a componente B (o endurecedor), que foram misturadas numa razão de 4 (componente A) por 1 (componente B). Costa e Barros (2013) avaliaram experimentalmente as propriedades deste adesivo, tendo obtido para o módulo de elasticidade e para a resistência à tração os valores médios de 7 GPa e 20 MPa, respetivamente.

### 3.3. APLICAÇÃO DO REFORÇO DE CFRP

O reforço à flexão das lajes de betão armado, testadas no âmbito da presente dissertação, foi executado com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados no betão de recobrimento de acordo com a técnica NSM. Os procedimentos para a aplicação do referido reforço foram os seguintes:

- Na face tracionada de cada uma das lajes foram executados, recorrendo a uma máquina de corte, dois entalhes, cada um com cerca de 5 mm de largura e 25 mm de profundidade, de acordo com a disposição representada na Figura 3.5.
- De seguida, de forma a proporcionar uma boa aderência na ligação betão-adesivo, e tal como representado na Figura 3.11-a, procedeu-se à limpeza dos entalhes por intermédio da aplicação de ar comprimido.
- Os laminados de CFRP com a secção transversal de  $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ , fornecidos em rolo pelo fabricante, foram cortados transversalmente ao eixo das fibras com o comprimento desejado. Posteriormente, com vista a eliminar eventuais sujidades que os laminados contivessem e proporcionar uma boa aderência entre o laminado de CFRP e o adesivo, procedeu-se à sua limpeza com acetona (Figura 3.11-b).
- Posteriormente à limpeza do reforço de CFRP, colocou-se o número exato de laminados a aplicar junto do elemento estrutural a reforçar (Figura 3.11-c). De seguida, o adesivo epoxídico foi produzido de acordo com as recomendações do fabricante (Figura 3.11-d e Figura 3.11-e), quer em termos das dosagens dos dois componentes, bem como no modo e tempo de mistura.
- Os entalhes foram posteriormente preenchidos com adesivo com o auxílio de uma espátula, tal como representado na Figura 3.11-f.
- O adesivo foi aplicado em ambas as faces dos laminados (Figura 3.11-g).
- Os laminados foram introduzidos nos entalhes (Figura 3.11-h) e o adesivo em excesso foi retirado (Figura 3.11-i). Esta fase da aplicação do reforço foi feita com o cuidado necessário por forma a evitar a formação de bolhas de ar que pudessem impedir a melhor ligação na interface betão-adesivo-CFRP.

Na Figura 3.11-j apresenta-se o aspeto final de uma laje de betão armado pré-fendilhada e, posteriormente, reforçada à flexão com dois laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM.

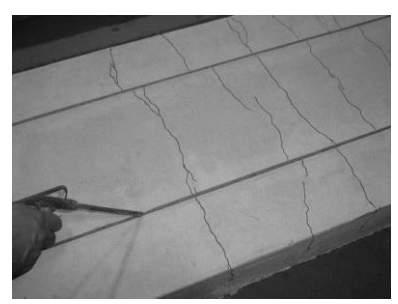

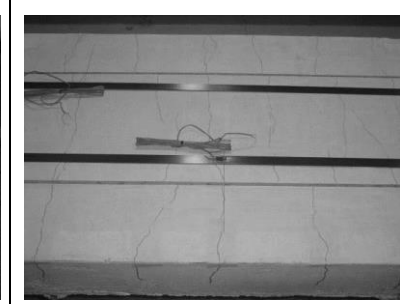

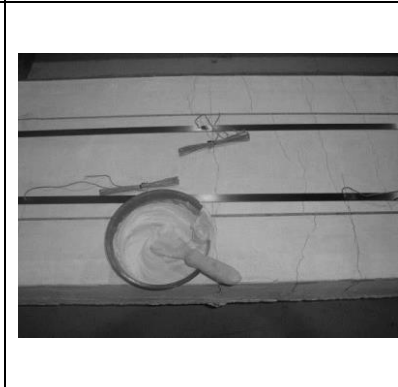



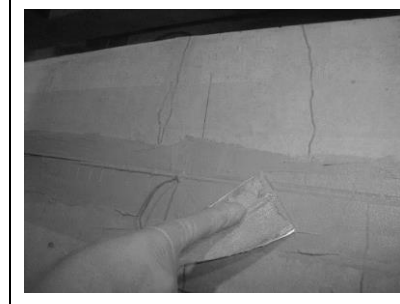
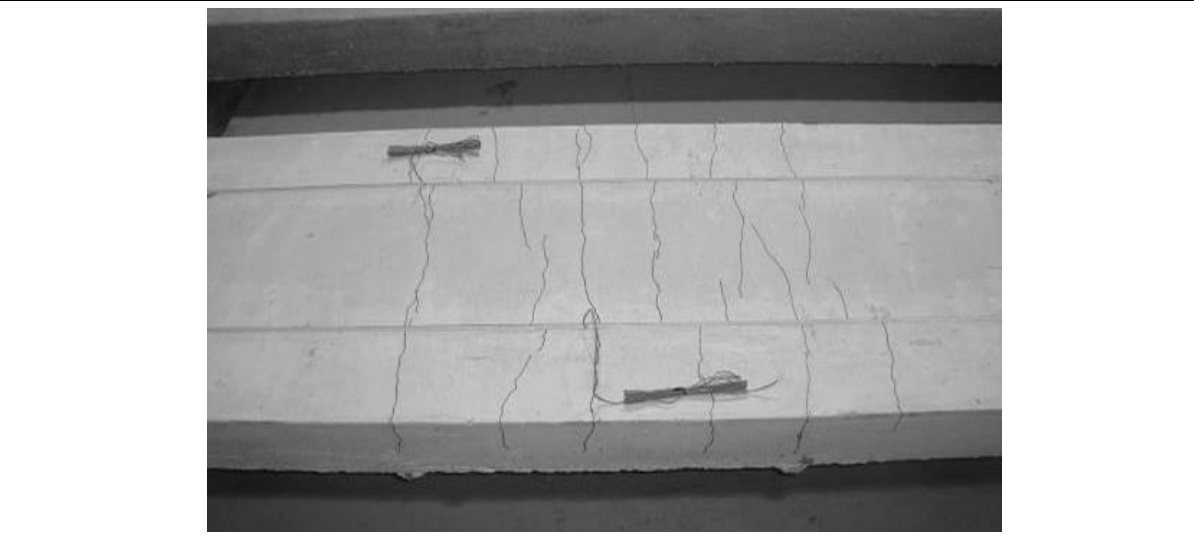
|  |  |   |
|--|--|---|
|   |    |    |
| <p>a) Após a execução dos entalhes procedeu-se à sua limpeza</p>   | <p>b) Limpeza dos laminados de CFRP</p>  | <p>c) Laminados de CFRP a aplicar</p>   |
|   |    |    |
| <p>d) Produção do adesivo: doseamento das componentes A e B</p>  | <p>e) Aspeto final do adesivo após a mistura das componentes A e B</p>               | <p>f) Aplicação de adesivo no entalhe</p>   |
|                                       |  |  |
| <p>g) Aplicação de adesivo nas faces do laminado</p>   | <p>h) Inserção do laminado no entalhe</p>  | <p>i) Remoção do adesivo em excesso</p>   |
|                                      |  |   |
| <p>j) Aspeto final de uma laje pré-fendilhada e reforçada à flexão com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM</p> |  |   |

Figura 3.11 - Sequência de aplicação do reforço à flexão de uma laje pré-fendilhada usando a técnica NSM com laminados de CFRP.

### 3.4. SISTEMA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO DAS LAJES

As quatro lajes de betão armado (S2L-PC1, S2L-PC2, S2L-F1 e S2L-F2) do presente programa experimental foram submetidas a ensaios à flexão em quatro pontos de carga de acordo com o representado na Figura 3.12 e na Figura 3.13.

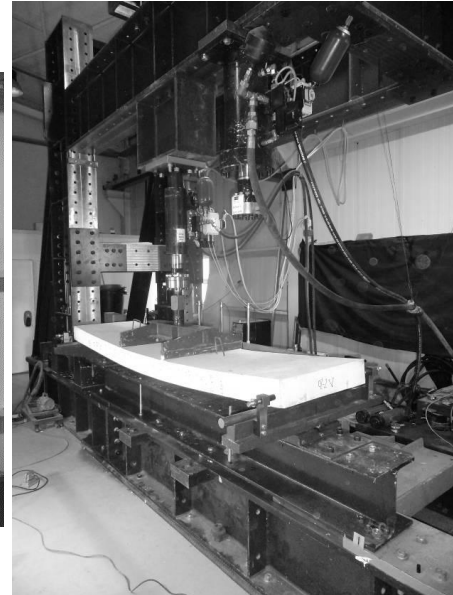
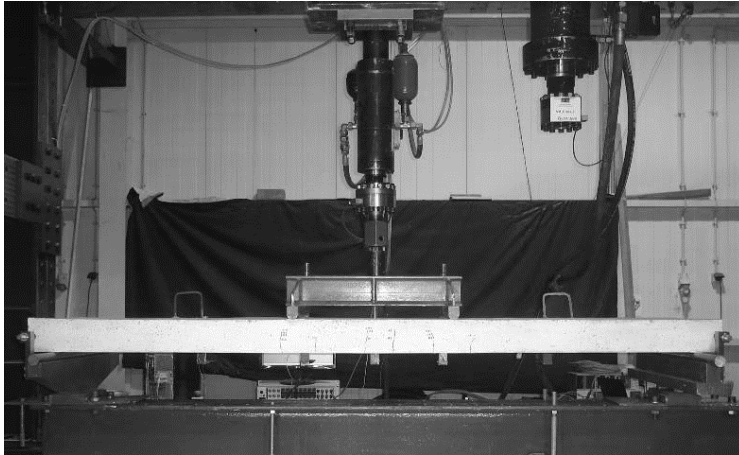


Figura 3.12 - Esquema geral do ensaio à flexão das lajes de betão armado.

As lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 foram inicialmente submetidas a um ensaio à flexão em quatro pontos de carga (ensaio de pré-fendilhação), com carregamento monotónico até atingirem um determinado valor da flecha a meio-vão. Tal como referido anteriormente, de modo a avaliar o efeito da pré-fendilhação na eficácia da técnica de reforço em estudo, foram analisados dois níveis de dano que se distinguiam pelo valor máximo da flecha a meio-vão imposto no ensaio de pré-fendilhação. Os critérios que serviram de base para a escolha dos níveis de dano serão apresentados na secção 3.5.1.1 deste capítulo. Após o ensaio de pré-fendilhação, as lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 foram reforçadas e, posteriormente, foram sujeitas a um ensaio monotónico até à rotura (ensaio à rotura).

As lajes S2L-F1 e S2L-F2 foram inicialmente reforçadas com dois laminados de CFRP e, posteriormente, foram submetidas a um carregamento cíclico, durante o qual foram aplicados 1 milhão de ciclos com uma frequência de 1 Hz (ensaio com carregamento cíclico). Tal como referido anteriormente, de modo a avaliar o efeito do carregamento cíclico na eficácia da técnica de reforço em estudo, foram analisados dois níveis de carregamento cíclico. Os critérios que serviram de base para escolha dos níveis de carregamento cíclico serão apresentados na secção 3.5.2.1 deste capítulo. Após a aplicação do carregamento cíclico, as lajes foram submetidas a um ensaio monotónico até à rotura (ensaio à rotura).



Em todos os ensaios realizados (pré-fendilhação, carregamento cíclico e rotura) foi utilizado o mesmo pórtico, que se encontra representado na Figura 3.12. Em termos de instrumentação nas lajes, recorreu-se a uma célula de carga que permitiu controlar a força aplicada ao longo dos ensaios. Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamentos a uma velocidade de deformação de 0.02 mm/s.

Os deslocamentos verticais em determinadas secções das lajes foram registados com recurso a transdutores de deslocamentos (LVDT's - "*Linear Variable Differential Transformer*"), que ficaram suportados num sistema ("Japanese Yoke"), evitando-se desse modo o registo de deslocamentos parasitas. Na Figura 3.13 é possível observar a localização das secções nas quais foram efetuados os registos dos deslocamentos verticais por intermédio de LVDT's (secção a meio-vão, nas duas secções de aplicação da carga e nas duas secções a meio dos vãos de corte).

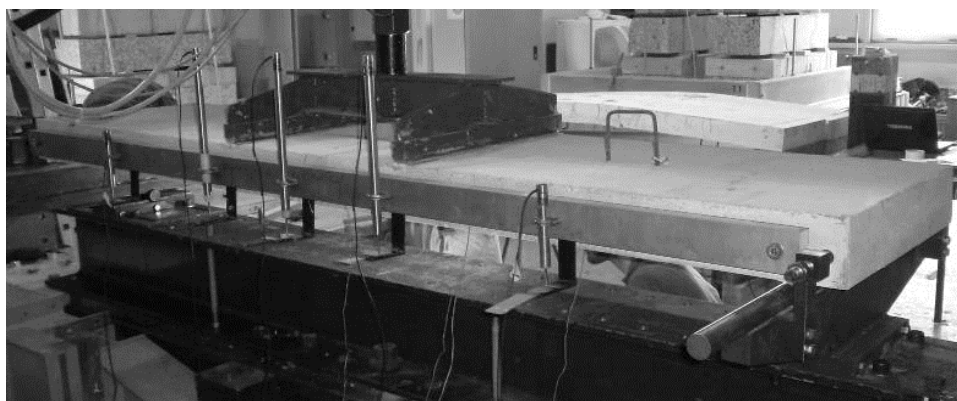
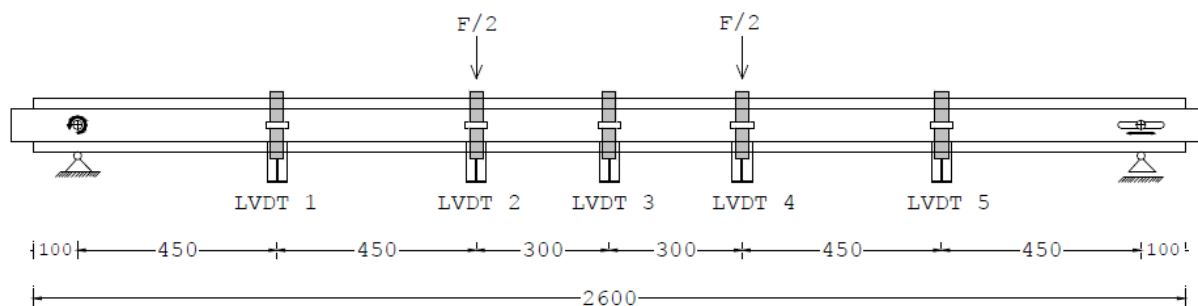


Figura 3.13 - Posição dos LVDT's nas lajes ensaiadas (dimensões em mm).

As extensões nos varões de aço longitudinais tracionados foram registadas por intermédio da instalação de dois extensómetros (SG-S1 e SG-S2) colocados de acordo com o esquema representado na Figura 3.14.

As extensões nos laminados de CFRP foram obtidas por intermédio da colocação de três extensómetros elétricos (SG-L1, SG-L2 e SG-L3) colados nas faces dos laminados, de acordo com a disposição representada na Figura 3.15.

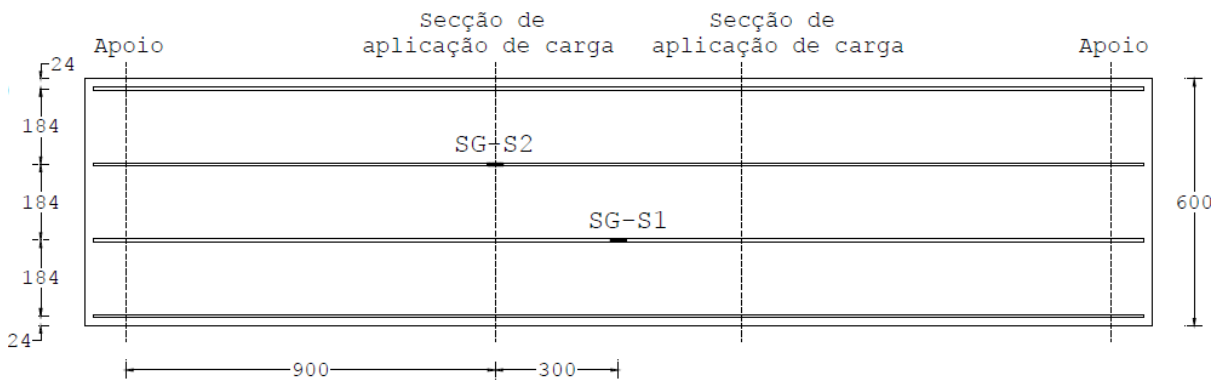
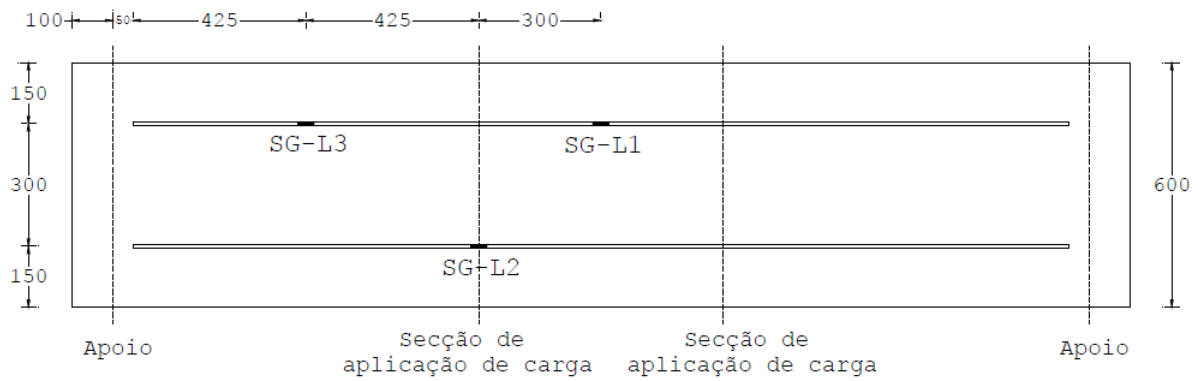
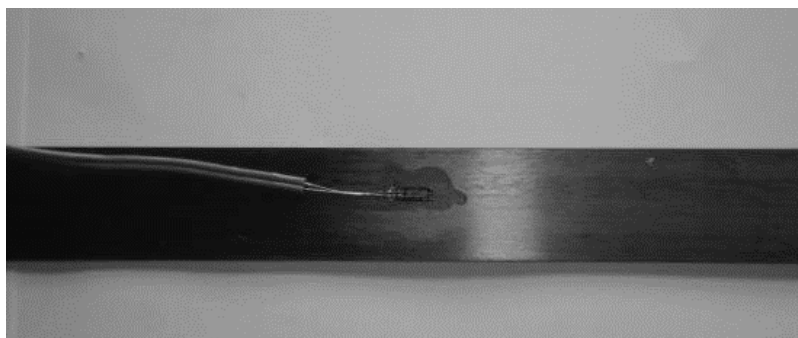


Figura 3.14 - Posição dos extensómetros nas armaduras de aço (dimensões em mm).



a)



b)

Figura 3.15 - Extensómetros colocados nos laminados de CFRP: a) posição dos extensómetros; b) pormenor da colagem de um extensómetro no laminado (dimensões em mm).

### 3.5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.5.1. Lajes pré-fendilhadas e posteriormente reforçadas à flexão (S2L-PC1 e S2L-PC2)

##### 3.5.1.1. Critérios para escolha dos níveis de pré-fendilhação

Tal como referido anteriormente, as lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 foram submetidas a um ensaio de pré-fendilhação. Com efeito, foram analisados dois níveis de dano (Tabela 3.3), que se distinguem essencialmente pelo valor máximo da flecha a meio-vão imposto no ensaio de pré-fendilhação. Assim, os critérios adotados para a escolha dos níveis de dano a aplicar em cada uma das lajes foram:

- Para o primeiro nível de pré-fendilhação (laje S2L-PC1) solicitar a laje até ser atingida a meio-vão a flecha máxima regulamentar para Estados Limites de Serviço, que de acordo com o Eurocódigo 2 (2010) é igual a  $L/250$ , em que  $L$  é o vão livre da laje ( $L = 2400$  mm). Deste modo, considerou-se para a flecha máxima a meio-vão a impor no ensaio de pré-fendilhação da laje S2L-PC1 o valor de cerca de 9.6 mm.
- Para o segundo nível de pré-fendilhação (laje S2L-PC2) solicitar a laje até ser atingida a meio-vão uma flecha de cerca de 15 mm. Este valor da flecha foi o registado na secção a meio-vão numa laje semelhante à laje S2L-PC2 antes da aplicação do reforço de CFRP (laje REF da Figura 3.24), testada à rotura por Dias *et al.* (2014), para um valor da carga correspondente a 80% da carga de cedência da armadura longitudinal.

Tabela 3.3 - Dados referentes ao ensaio de pré-fendilhação.

| Laje    | Nível de dano | Flecha a meio-vão a impor no ensaio de pré-fendilhação (mm) |
|---------|---------------|---|
| S2L-PC1 | 1             | 9.6   |
| S2L-PC2 | 2             | 15.0  |

Por motivos que se desconhecem, antes de se proceder ao ensaio de pré-fendilhação da laje S2L-PC2, verificou-se a existência de uma fenda em toda a secção nas imediações do meio-vão da laje, tal como é possível verificar na Figura 3.16.

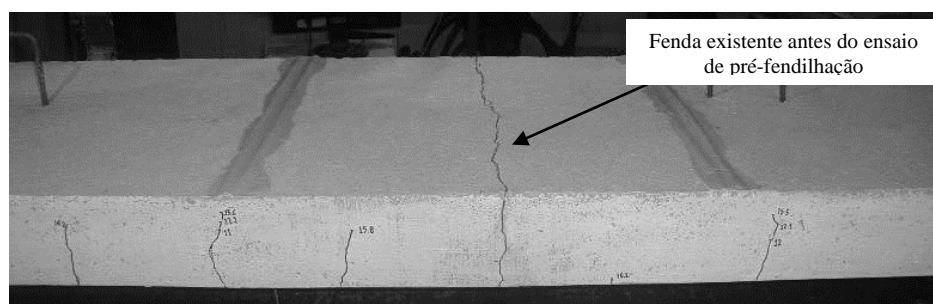
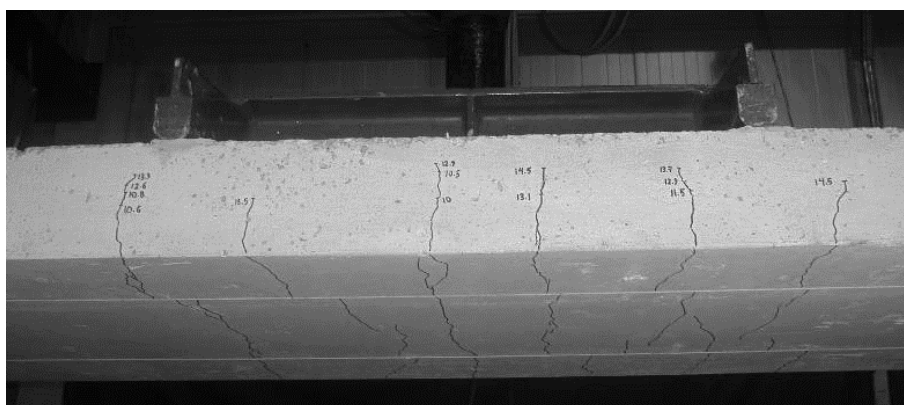


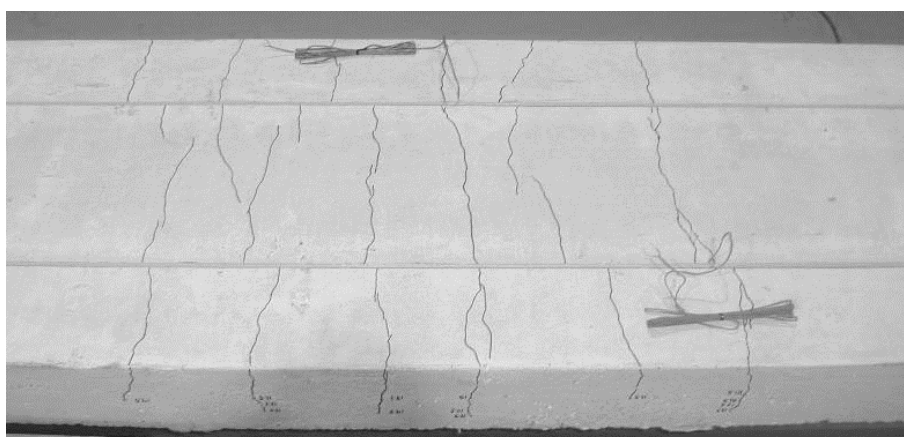
Figura 3.16 - Identificação da fenda existente na laje S2L-PC2 antes do ensaio de pré-fendilhação.

### 3.5.1.2. Ensaio de pré-fendilhação das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2

Na Figura 3.17-a e na Figura 3.18-a encontram-se representados os padrões de fendilhação obtidos, respetivamente nas lajes S2L-PC1 (nível de dano 1) e S2L-PC2 (nível de dano 2), após a realização do ensaio de pré-fendilhação. No decorrer do ensaio de pré-fendilhação verificou-se que as primeiras fendas foram de flexão pura e surgiram entre os pontos de aplicação da carga. Para carga superiores verificou-se ainda a ocorrência de fendas na zona do vão de corte. No entanto, a análise da Figura 3.17-a e da Figura 3.18-a permite verificar que as fendas que se formaram no ensaio de pré-fendilhação foram, quase na sua totalidade, registadas entre os pontos de carga. Além disso, verifica-se que, apesar das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 terem sido submetidas a diferentes níveis de dano (a flecha máxima imposta na laje S2L-PC2 era mais do que 1.5 vezes superior à flecha máxima imposta na laje S2L-PC1), os padrões de fendilhação registados após o ensaio de pré-fendilhação foram idênticos em ambas as lajes, o que leva a concluir que a fenda existente antes do ensaio de pré-fendilhação da laje S2L-PC2 (assinalada na Figura 3.16) condicionou o comportamento desta laje.

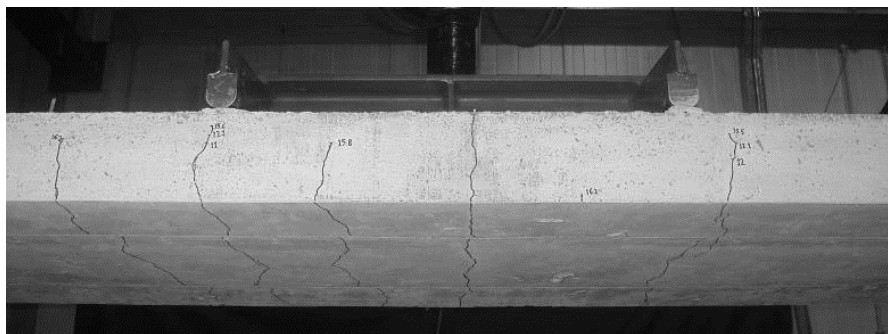


a)

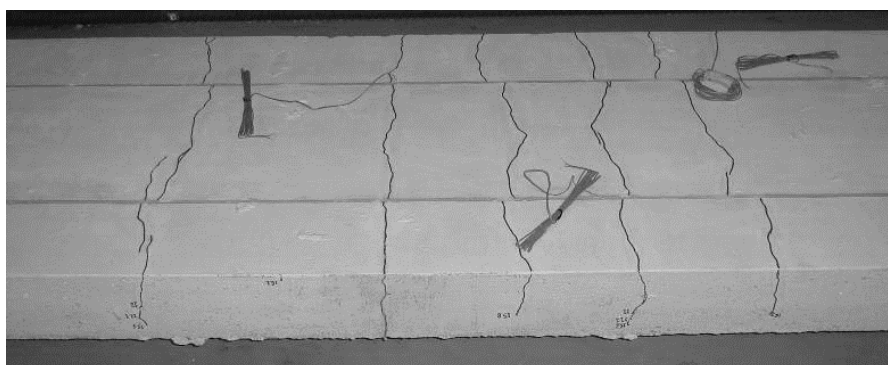


b)

Figura 3.17 - Laje S2L-PC1: a) padrão de pré-fendilhação após a realização do ensaio de pré-fendilhação, b) após a aplicação do reforço de CFRP.



a)



b)

Figura 3.18 - Laje S2L-PC2: a) padrão de pré-fendilhação após a realização do ensaio de pré-fendilhação, b) após a aplicação do reforço de CFRP.

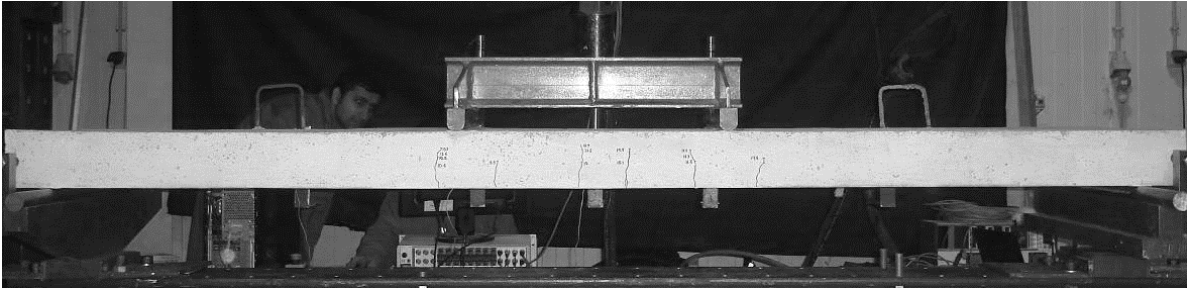
Posteriormente à realização do ensaio de pré-fendilhação, procedeu-se ao reforço das lajes à flexão com dois laminados de CFRP inseridos de acordo com os procedimentos descritos na secção 3.3 deste capítulo. Na Figura 3.17-b e na Figura 3.18-b apresenta-se o aspeto final das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2, respetivamente, após a execução do reforço de CFRP.

### 3.5.1.3. Ensaio de rotura das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2

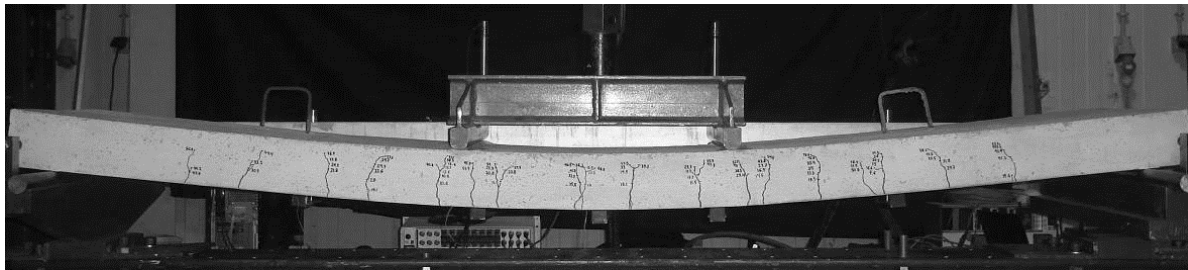
Após a execução do reforço à flexão com dois laminados de CFRP inseridos, as lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 foram sujeitas a um carregamento monotónico até à rotura (ensaio de rotura) de acordo com o descrito na secção 3.4.

Na Figura 3.19 encontra-se representada a laje S2L-PC1 nos seguintes instantes: imediatamente antes do início do ensaio à rotura (Figura 3.19-a) e no momento em que a laje atingiu a sua capacidade de carga máxima (Figura 3.19-b). Nesta figura é também possível comparar a diferença do nível de deformação da laje S2L-PC1 entre o início do ensaio à rotura e quando a laje atingiu a sua capacidade de carga máxima. De um modo idêntico, na Figura 3.20 encontra-se representada a laje S2L-PC2 nos seguintes instantes: imediatamente antes do início do ensaio à rotura (Figura 3.20-a) e no momento em que a laje atingiu a sua capacidade de carga máxima (Figura 3.20-b). Nesta figura é também possível comparar a diferença do nível de deformação da laje S2L-PC2 entre o início do ensaio à rotura e quando a laje atingiu a sua capacidade de

carga máxima. Após o início do ensaio à rotura das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2, as fendas existentes nas lajes após a realização do ensaio de pré-fendilhação começaram a abrir. Durante o ensaio à rotura desenvolveram-se novas fendas, alargando o seu aparecimento à medida que o carregamento ia aumentando para zonas mais afastadas dos pontos de aplicação da carga. Estas novas fendas surgiram apenas para cargas superiores à atingida no ensaio de pré-fendilhação.

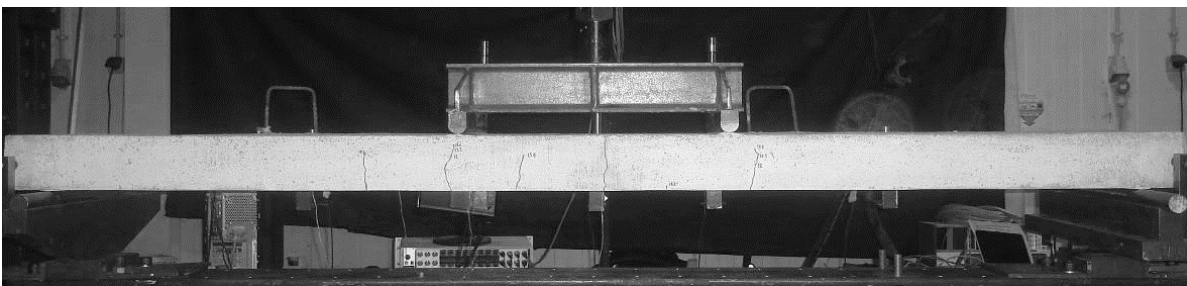


a)

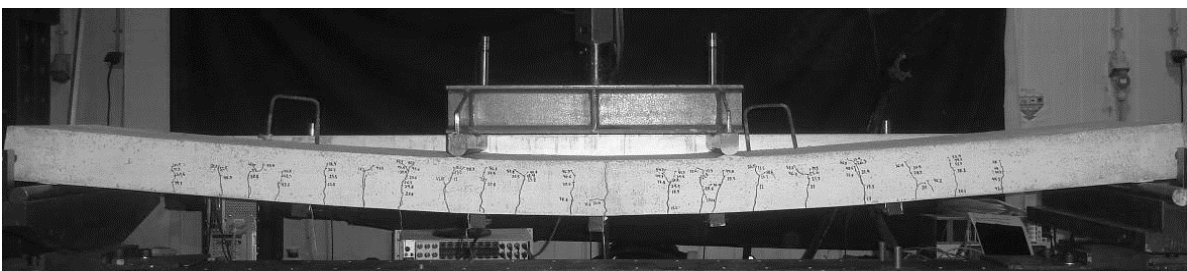


b)

Figura 3.19 - Laje S2L-PC1 nas seguintes fases: a) imediatamente antes do ensaio à rotura; b) no momento em que a laje atinge a sua capacidade de carga máxima.



a)



b)

Figura 3.20 - Laje S2L-PC2 nas seguintes fases: a) imediatamente antes do ensaio à rotura; b) no momento em que a laje atinge a sua capacidade de carga máxima.

Na Figura 3.21 apresenta-se o aspeto geral da laje S2L-PC1 após o ensaio à rotura e o detalhe da zona onde ocorreu o modo de rotura da laje. Na Figura 3.22 apresenta-se o aspeto geral da laje S2L-PC2 após o ensaio à rotura e o detalhe da zona onde ocorreu o modo de rotura da laje. Independentemente do nível de pré-fendilhação instalado, o modo de rotura observado nas lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 foi a rotura dos laminados de CFRP com as armaduras longitudinais de tração em cedência. Deste modo, verifica-se que existiu um aproveitamento total do material de reforço utilizado.

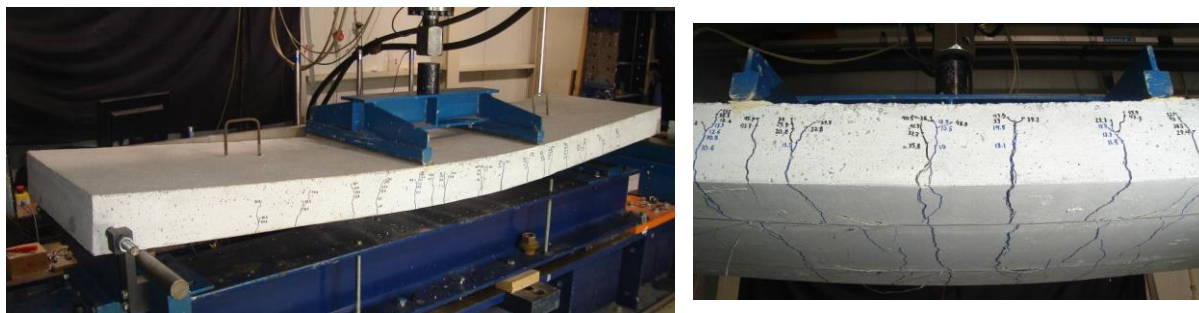


Figura 3.21 - Laje S2L-PC1 após o ensaio à rotura e pormenor do modo de rotura.

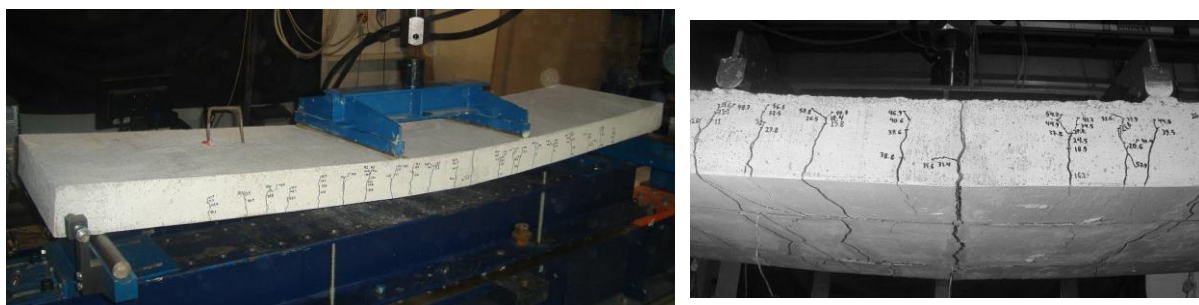


Figura 3.22 - Laje S2L-PC2 após o ensaio à rotura e pormenor do modo de rotura.

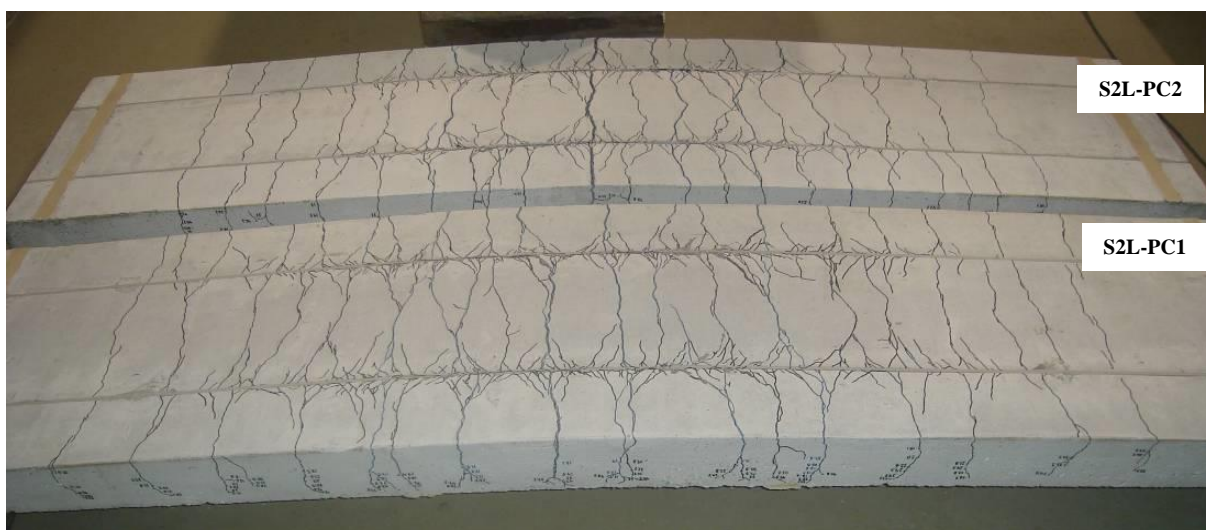


Figura 3.23 - Padrão de fendilhação final das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2.

Na Figura 3.23 é possível observar o padrão de fendilhação final das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 após o ensaio até à rotura. As lajes pré-fendilhadas e submetidas ao ensaio monotónico até à rotura (S2L-PC1 e S2L-PC2) exibiram um padrão de fendilhação semelhante. As larguras da banda de fendilhação registadas nas lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 foram praticamente iguais.

Na Figura 3.24 é apresentada a relação força ( $F$ ) vs flecha a meio-vão ( $\delta$ ) das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2, diferenciadas apenas pelo nível de pré-fendilhação aplicado. Nesta figura, para cada uma das lajes estão assinalados os pontos correspondentes à carga de serviço  $F_{serv}$  (carga correspondente a uma flecha a meio vão de  $9.6 \text{ mm} = L/250$ ), à carga de cedência das armaduras  $F_{sy}$  e à carga máxima  $F_{max}$ .

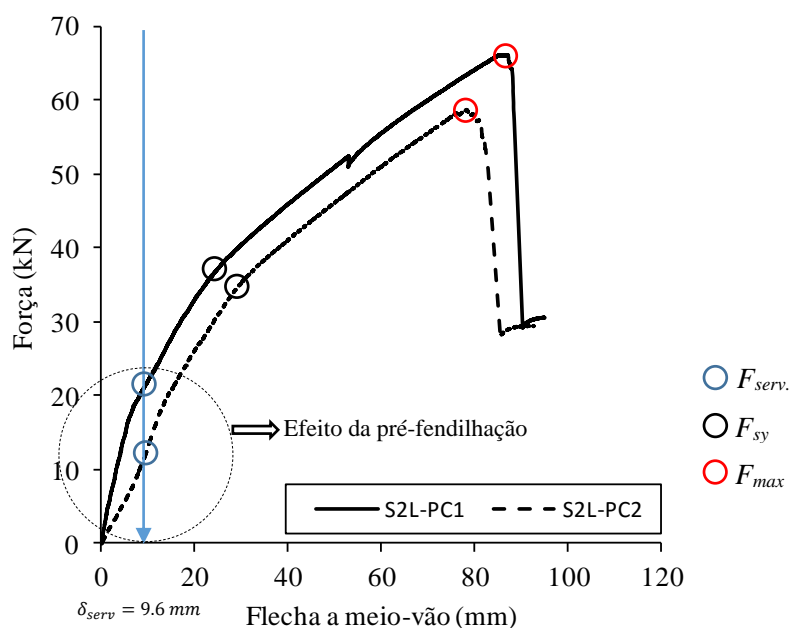


Figura 3.24 - Curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2.

De acordo com a Figura 3.24, as lajes ensaiadas apresentaram duas fases distintas: 1) betão fendilhado com armadura em regime elástico até à carga correspondente à cedência das armaduras; 2) betão fendilhado com cedência das armaduras longitudinais de tração.

Nas curvas de comportamento da Figura 3.24 é possível verificar que, após a cedência da armadura longitudinal, existe um troço praticamente linear até as lajes atingirem a sua capacidade de carga máxima. Isto é explicado pelo facto de, após a plastificação da armadura, apenas o compósito de CFRP, que tem comportamento linear elástico até à rotura, contribuir para o aumento da capacidade resistente das lajes.

A análise da Figura 3.24 permite verificar que a laje S2L-PC2, que foi submetida a um maior nível de dano (segundo nível de pré-fendilhação), apresentou uma menor rigidez inicial que a laje S2L-PC1, à qual foi imposta o primeiro nível de pré-fendilhação. Além das condições de



carregamento da laje S2L-PC2 terem sido mais severas em termos de ensaio de pré-fendilhação, a fenda inicialmente existente nesta laje (identificada na Figura 3.16) previamente ao ensaio de pré-fendilhação também contribuiu para a menor rigidez apresentada pela laje S2L-PC2 quando comparada com a da laje S2L-PC1.

Adicionalmente às constatações anteriormente referidas, a Figura 3.24 demonstra que o nível de dano teve influência no comportamento estrutural das lajes, na medida em que se verificou que a um maior nível de dano introduzido esteve associado um decréscimo da carga de serviço ( $F_{serv}$ ), da carga de cedência das armaduras ( $F_{sy}$ ) e da capacidade de carga máxima ( $F_{max}$ ). Com efeito, os valores das cargas  $F_{serv}$ ,  $F_{sy}$  e  $F_{max}$  para a laje S2L-PC1 foram, respetivamente, 21.6 kN, 38 kN e 66 kN, enquanto para a laje S2L-PC2 foram, respetivamente, 12.5 kN, 36 kN e 58.7 kN.

Na Figura 3.25 apresenta-se, para as lajes S2L-PC1 (Figura 3.25-a) e S2L-PC2 (Figura 3.25-b), a relação entre a carga aplicada ao longo do ensaio à rotura, até as lajes atingirem a sua capacidade de carga máxima, e a variação das extensões registada nos extensómetros colados nos laminados de CFRP.

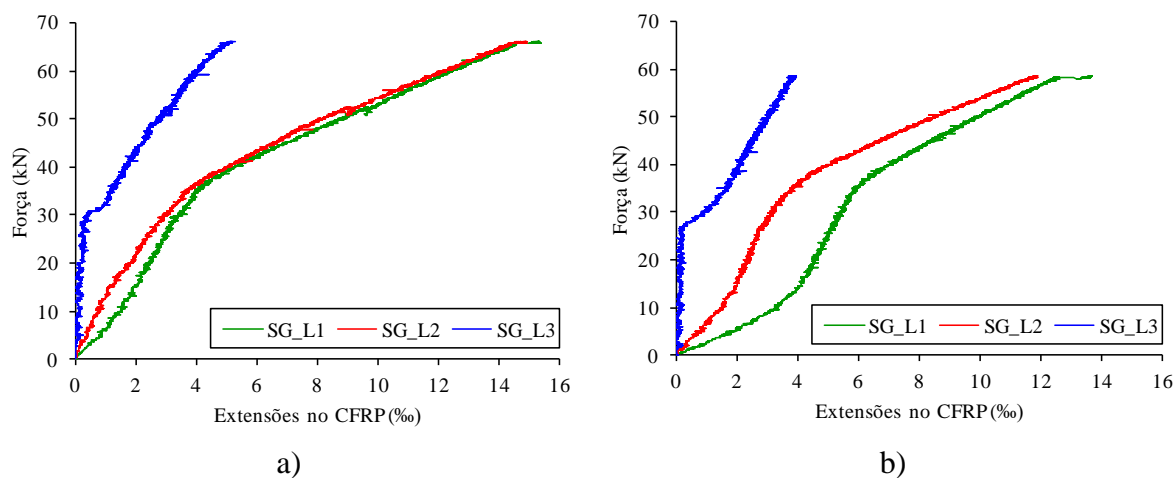


Figura 3.25 - Variação das extensões registadas nos laminados de CFRP no ensaio à rotura da laje: a) S2L-PC1; b) S2L-PC2.

A análise da Figura 3.25 permite constatar que numa fase inicial do ensaio à rotura das lajes as maiores extensões foram registadas na laje S2L-PC2 (Figura 3.25-b), mais concretamente no extensómetro SG\_L1, que foi colocado na secção a meio-vão da laje (ver Figura 3.15). Esta ocorrência pode ser explicada pela presença da fenda que surgiu antes do ensaio de pré-fendilhação nas imediações onde foi colado o extensómetro SG\_L1 (ver Figura 3.16).

A solicitação dos extensómetros SG\_L1 e SG\_L2 ocorreu desde o início do ensaio à rotura ao contrário do sucedido no extensómetro SG\_L3. Esta ocorrência deve-se ao facto das fendas

instaladas resultantes dos ensaios de pré-fendilhação se concentrarem entre as secções de aplicação da carga ou nas proximidades das secções de aplicação da carga, ou seja, próximas dos extensómetros SG\_L1 e SG\_L2. Na proximidade do extensómetro SG\_L3 as fendas só apareceram no decorrer do ensaio à rotura e para cargas significativamente altas (Figura 3.25). Nos extensómetros SG\_L1 e SG\_L2, quer na laje S2L-PC1 como na laje S2L-PC2, é evidente que a partir de uma certa zona se verifica um acréscimo mais acentuado das extensões com o aumento da carga e que é devido à ocorrência da cedência das armaduras.

Na Tabela 3.4 apresentam-se os valores das extensões máximas registadas nos laminados de CFRP até ao momento em que as lajes atingiram a sua capacidade de carga máxima, assim como o grau de mobilização do reforço de CFRP (razão percentual entre o valor da extensão máxima registada nos laminados de CFRP,  $\varepsilon_{CFRP}^{máx}$ , e o valor médio da extensão máxima registada nos ensaios de tração uniaxial dos laminados de CFRP, 15.8‰) e o modo de rotura observado em cada laje. A análise desta tabela permite constatar que as extensões máximas registadas nos laminados de CFRP foram bastante próximas do seu valor máximo da extensão de rotura (15.8‰), o que por um lado justifica o modo de rotura obtido (rotura do CFRP) e por outro demonstra a elevada eficácia do reforço à flexão, com laminados de CFRP inseridos, de lajes de betão armado com um determinado padrão de fendilhação.

Tabela 3.4 - Valores máximos da extensão registados no CFRP (lajes S2L-PC1 e S2L-PC2).

| Laje    | $\varepsilon_{CFRP}^{máx}$<br>(‰) | Grau de mobilização do reforço<br>(%) | Modo de rotura |
|---------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| S2L-PC1 | 15.4                              | 97.5                                  | Rotura do CFRP |
| S2L-PC2 | 13.7                              | 86.7                                  | Rotura do CFRP |

#### 3.5.1.4. Efeito da pré-fendilhação

Por forma a se poder avaliar o efeito do nível de dano (nível de pré-fendilhação) na eficácia do reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de CFRP inseridos, os resultados experimentais obtidos no presente programa experimental serão comparados com os que foram alcançados por Dias *et al.* (2014), quando testaram as duas seguintes lajes: uma laje de referência sem CFRP (Laje REF) e uma laje semelhante às lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 (que no âmbito da presente análise será designada de laje S2L-PC0), com a diferença de não ter sido pré-fendilhada antes da execução do reforço de CFRP. Neste contexto, refira-se que o modo de rotura da laje S2L-PC0 foi a rotura do reforço de CFRP tal como o que ocorreu nas lajes S2L-PC1 e S2L-PC2. Assim, verifica-se que os níveis de dano que as lajes apresentavam antes da

execução do reforço de CFRP não influenciaram o modo de rotura (independentemente da existência ou não de dano, o modo de rotura das lajes foi a rotura do CFRP).

Na Figura 3.26 encontra-se a resposta força ( $F$ ) vs flecha a meio vão ( $\delta$ ) das lajes REF (laje de referência sem reforço de CFRP), S2L-PC0 (laje reforçada sem pré-fendilhação), S2L-PC1 (laje reforçada com pré-fendilhação: nível de dano 1) e S2L-PC2 (laje reforçada com pré-fendilhação: nível de dano 2), todas elas ensaiadas com carregamento monotónico até à rotura.

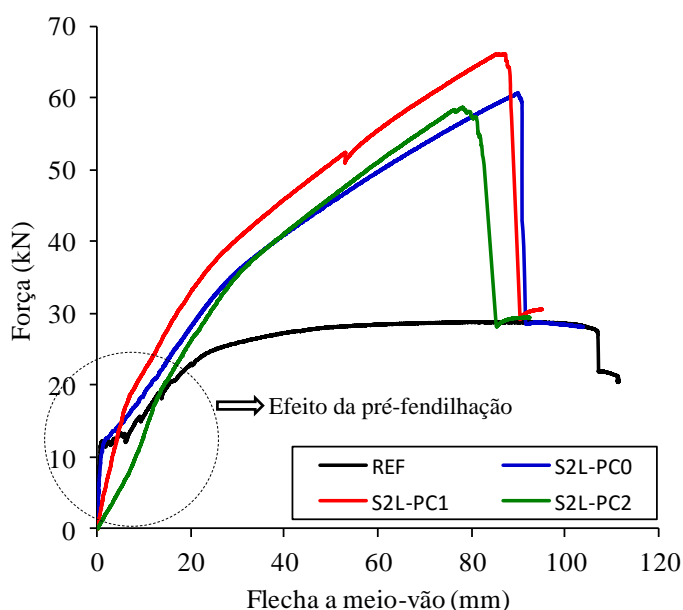


Figura 3.26 - Curva de comportamento força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas com e sem pré-fendilhação.

Tal como referido anteriormente, as lajes submetidas ao ensaio de pré-fendilhação (S2L-PC1 e S2L-PC2) apresentaram dois estados principais de comportamento até atingirem a rotura: 1) betão fendilhado com o aço não plastificado; 2) betão fendilhado após cedência da armadura longitudinal. No entanto, as lajes não submetidas ao ensaio de pré-fendilhação (REF e S2LPC0) tiveram três estados de comportamento, nomeadamente: 1) betão não fendilhado; 2) betão fendilhado com aço não plastificado; 3) betão fendilhado com armadura em cedência. Na fase de betão fendilhado com armadura em cedência, a laje REF apresenta um comportamento plástico. As lajes reforçadas com CFRP (S2L-PC0, S2L-PC1 e S2L-PC2) apresentaram, após a cedência da armadura longitudinal, um comportamento praticamente linear, devido ao facto de nesta fase apenas o compósito de CFRP contribuir para o aumento da capacidade resistente das lajes.

A análise da Figura 3.26 permitiu constatar que as lajes submetidas ao ensaio de pré-fendilhação (S2L-PC1 e S2L-PC2) apresentaram uma menor rigidez inicial que as lajes não submetidas ao mesmo ensaio (REF e S2L-PC0). Esta diminuição de rigidez inicial foi mais acentuada na laje

S2L-PC2 do que na laje S2L-PC1, como já foi constatado anteriormente. Após a cedência das armaduras verificou-se que as curvas das lajes reforçadas com (S2L-PC1 e S2L-PC2) e sem pré-fendilhação (S2L-PC0) são praticamente paralelas.

Na Tabela 3.5 encontram-se os resultados obtidos nas lajes REF, S2LPC0, S2L-PC1 e S2L-PC2 em termos da carga de cedência das armaduras ( $F_{sy}$ ), da carga máxima ( $F_{max}$ ), das respetivas flechas a meio-vão ( $\delta_{sy}$  associada a  $F_{sy}$  e  $\delta_{max}$  associada a  $F_{max}$ ) e do índice de ductilidade ( $\delta_{max}/\delta_{sy}$ ).

Na Tabela 3.5 são ainda apresentados, entre parêntesis, os valores das variações percentuais da carga de cedência das armaduras, da carga máxima e do índice de ductilidade para os seguintes cenários: 1) de modo a avaliar o efeito do reforço de CFRP são apresentados os incrementos percentuais, relativos aos parâmetros anteriormente indicados, da laje reforçada S2L-PC0 (sem pré-fendilhação) relativamente à laje de referência REF (sem pré-fendilhação); 2) com o objetivo de avaliar o efeito da pré-fendilhação instalada nas lajes na eficácia da técnica de reforço NSM com laminados de CFRP inseridos, são apresentadas as variações percentuais das lajes submetidas a diferentes níveis de pré-fendilhação (S2L-PC1 e S2L-PC2) relativamente à laje S2L-PC0 que não foi sujeita ao ensaio de pré-fendilhação; 3) por forma a comparar os níveis de pré-fendilhação testados, são apresentadas as variações percentuais da laje S2L-PC2 relativamente à laje S2L-PC1.

Tabela 3.5 - Resultados do ensaio à rotura da laje de referência sem CFRP e das lajes reforçadas com e sem pré-fendilhação.

| Laje    | Cedência da armadura  |  | Rotura                 |   | Índice de ductilidade                                 |
|---------|-----------------------|--|------------------------|---|---|
|         | $\delta_{sy}$<br>(mm) | $F_{sy}$<br>(kN)                                     | $\delta_{max}$<br>(mm) | $F_{max}$<br>(kN)                                     | $\delta_{max}/\delta_{sy}$                            |
| REF     | 23.5                  | 24.5   | 81.1                   | 28.9  | 3.5   |
| S2L-PC0 | 29.3                  | 35.5<br>(+44.9%) <sup>1</sup>                        | 89.8                   | 60.7<br>(+110%) <sup>1</sup>                          | 3.1<br>(-11.4%) <sup>1</sup>                          |
| S2L-PC1 | 26.1                  | 38.0<br>(+7%) <sup>2</sup>                           | 87.1                   | 66.0<br>(+8.7%) <sup>2</sup>                          | 3.3<br>(+6.5%) <sup>2</sup>                           |
| S2L-PC2 | 30.9                  | 36.0<br>(+1.4%) <sup>2</sup><br>(-5.3%) <sup>3</sup> | 78.1                   | 58.7<br>(-3.3%) <sup>2</sup><br>(-11.1%) <sup>3</sup> | 2.5<br>(-19.4%) <sup>2</sup><br>(-24.2%) <sup>3</sup> |

<sup>1</sup>Varição percentual relativamente à laje SREF; <sup>2</sup>Varição percentual relativamente laje S2L-PC0; <sup>3</sup>Varição percentual relativamente à laje S2L-PC1.

De acordo com a Tabela 3.5, considerando os resultados da laje não reforçada (REF), a solução de reforço de CFRP da laje S2L-PC0 proporcionou um aumento do valor da carga de cedência das armaduras ( $F_{sy}$ ) e da carga máxima ( $F_{max}$ ). Com efeito, os valores de  $F_{sy}$  registados nas lajes REF e S2L-PC0 foram de 24.5 kN e 35.5 kN, respetivamente. Em termos de carga máxima, os

valores registados nas lajes REF e S2L-PC0 foram de 28.9 kN e 60.7 kN, respetivamente. Deste modo, verificou-se que o reforço de CFRP proporcionou aumentos significativos em termos da carga de cedência das armaduras (44.9%) e da capacidade de carga máxima (110%).

Em termos do efeito da pré-fendilhação verifica-se que a carga de cedência das armaduras ( $F_{sy}$ ) nas lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 foi de 38 kN e 36 kN, respetivamente, o que representou um aumento de  $F_{sy}$  de 7% e 1.4%, respetivamente, relativamente à laje reforçada sem pré-fendilhação (S2L-PC0). Em termos de carga máxima ( $F_{max}$ ), os valores obtidos nas lajes S2LPC1e S2L-PC2 foram de, respetivamente, 66.0 kN e 58.7 kN, o que correspondeu a um aumento de 8.7% da laje S2L-PC1 relativamente à laje S2L-PC0 e uma diminuição de 3.3% da laje S2L-PC2 relativamente à laje S2L-PC0.

Os dados da Tabela 3.5 permitem também fazer uma comparação direta entre as lajes S2L-PC1 e S2LPC2 por forma a avaliar o efeito do nível de pré-fendilhação. Em termos da carga de cedência das armaduras ( $F_{sy}$ ), verificou-se que a laje S2L-PC2 apresentou um valor 5.3% mais baixo que o da laje S2L-PC1. Quanto à carga máxima ( $F_{max}$ ), a laje S2L-PC2 apresentou um valor 11.1% mais baixo que o da laje S2L-PC1. Deste modo, constatou-se que o nível de dano da laje S2L-PC2 foi mais penalizador que o nível de dano da laje S2L-PC1 quer em termos da carga de cedência das armaduras como em termos da carga máxima.

Na Tabela 3.5 é possível observar que o reforço à flexão da laje S2L-PC0 com laminados de CFRP inseridos levou à diminuição do índice de ductilidade relativamente ao da laje REF. O valor do índice de ductilidade registado na laje de referência REF foi de 3.5 enquanto na laje S2L-PC0 foi de 3.1, o que correspondeu a uma diminuição de 11.4%. Relativamente às lajes S2L-PC1 e S2L-PC2, foram registados os valores referentes ao índice de ductilidade de 3.3 e 2.5, respetivamente, o que representou um incremento de 6.5% da laje S2L-PC1 relativamente à laje S2L-PC0 e um decréscimo de 19.4% da laje S2L-PC2 relativamente à laje S2L-PC0. Comparando as duas lajes pré-fendilhadas, verifica-se que a laje submetida ao segundo nível de dano (S2L-PC2) apresentou um índice de ductilidade 24.2% inferior ao da laje S2L-PC1. Deste modo, verifica-se que o nível mais elevado de dano presente na laje S2L-PC2 fez com que esta laje tivesse uma rotura menos dúctil que a da laje S2L-PC1.

### **3.5.2. Lajes submetidas a carregamento cíclico (S2L-F1 e S2L-F2)**

#### **3.5.2.1. Critérios para escolha dos níveis de carregamento cíclico**

Tal como referido anteriormente, as lajes S2L-F1 e S2L-F2, ambas reforçadas à flexão com dois laminados de CFRP inseridos, foram submetidas a um carregamento cíclico, no qual foram

aplicados 1 milhão de ciclos com uma frequência de 1 Hz. O nível de carregamento cíclico imposto em cada uma das lajes foi escolhido tendo por base os resultados do ensaio à rotura de uma laje semelhante às lajes S2L-F1 e S2L-F2 (que no âmbito da presente análise será designada por S2L-F0) previamente ensaiada por Dias *et al.* (2014), com a diferença de não ter sido submetida a um carregamento cíclico.

Os critérios adotados para escolha dos níveis de carregamento cíclico (Tabela 3.6) a aplicar em cada laje ensaiada foram:

- O primeiro nível de carregamento cíclico (aplicado à laje S2L-F1) esteve diretamente relacionado com o valor da carga, registado no ensaio à rotura da laje S2L-F0, quando a meio-vão foi atingida uma flecha de 9.6 mm (flecha correspondente a  $L/250$  que é a flecha máxima regulamentar para Estados Limites de Serviço de acordo com o Eurocódigo 2 (2010)). O valor da referida carga era de 19 kN. Deste modo, o procedimento que conduziu ao ensaio cíclico da laje S2L-F1 foi o seguinte: i) solicitação da laje com um carregamento monotónico até um valor de carga de 28 kN, tendo-se de seguida procedido ao seu descarregamento; ii) solicitação da laje com um carregamento monotónico até aos 19 kN, a partir do qual foi iniciada a aplicação do carregamento cíclico com uma amplitude de  $\pm 6$  kN. Assim, a força mínima e máxima aplicada no carregamento cíclico foi de 13 kN e 25 kN, respetivamente. Estes valores correspondem, respetivamente a 21% e a 41% da capacidade de carga máxima da laje S2L-F0 (60.7 kN).
- O segundo nível de carregamento cíclico (aplicado à laje S2L-F2) esteve diretamente relacionado com o valor da carga de cedência das armaduras obtida no ensaio à rotura da laje S2L-F0. O valor da referida carga de cedência das armaduras era de 35.5 kN. Deste modo, o procedimento que conduziu ao ensaio cíclico da laje S2L-F2 foi o seguinte: i) solicitação da laje com um carregamento monotónico até um valor de carga de 45 kN, tendo-se de seguida procedido ao seu descarregamento; ii) solicitação da laje com um carregamento monotónico até aos 36 kN, a partir do qual foi iniciada a aplicação do carregamento cíclico com uma amplitude de  $\pm 6$  kN. Assim, a força mínima e máxima aplicada no carregamento cíclico foi de 30 kN e 42 kN, respetivamente. Estes valores correspondem, respetivamente a 49% e a 69% da capacidade de carga máxima da laje S2LF0 (60.7 kN).

Tabela 3.6 - Dados referentes ao carregamento cíclico.

| Laje   | Nível de carregamento cíclico | Carregamento cíclico |                   |                               |                               |
|--------|-------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|        |                               | $F_{min}$<br>(kN)    | $F_{max}$<br>(kN) | $S_{min}$<br>(%) <sup>1</sup> | $S_{max}$<br>(%) <sup>2</sup> |
| S2L-F1 | 1                             | 13                   | 25                | 21                            | 41                            |
| S2L-F2 | 2                             | 30                   | 42                | 49                            | 69                            |

Nota:  $F_{min}$  e  $F_{max}$  representam a força mínima e máxima aplicada no carregamento cíclico, respetivamente; <sup>1</sup>Percentagem da carga máxima da laje S2L-F0 ( $F_{max}^{S2L-F0}$ ) associada a  $F_{min}$ :  $S_{min} = F_{min}/F_{max}^{S2L-F0}$ ; <sup>2</sup>Percentagem da carga máxima da laje S2L-F0 ( $F_{max}^{S2L-F0}$ ) associada a  $F_{max}$ :  $S_{max} = F_{max}/F_{max}^{S2L-F0}$ .

### 3.5.2.2. Ensaio monotónico até à rotura das lajes submetidas a carregamento cíclico

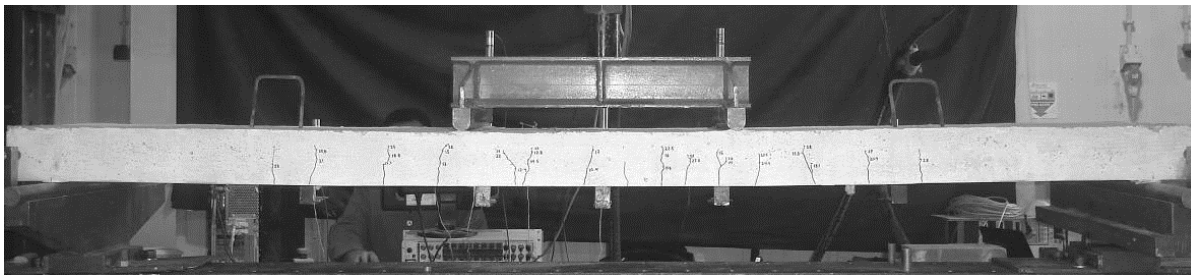
Após a execução do reforço à flexão com dois laminados de CFRP inseridos de acordo com os procedimentos descritos na secção 3.3 deste capítulo, as lajes S2L-F1 e S2L-F2 foram sujeitas a um carregamento cíclico de acordo com os critérios anteriormente apresentados. As lajes S2L-F1 (solicitada com o nível de carregamento cíclico 1) e S2L-F2 (solicitada com o nível de carregamento cíclico 2) não atingiram a rotura durante o ensaio cíclico e foram, posteriormente, submetidas a um ensaio monotónico até à rotura.

Na Figura 3.27 encontra-se representada a laje S2L-F1 nos seguintes instantes: imediatamente antes do início do ensaio à rotura (Figura 3.27-a) e no momento em que a laje atingiu a sua capacidade de carga máxima (Figura 3.27-b). Nesta figura é também possível comparar a diferença do nível de deformação da laje S2L-F1 entre o início do ensaio à rotura e quando a laje atingiu a sua capacidade de carga máxima. De um modo idêntico, na Figura 3.28 encontra-se representada a laje S2L-F2 nos seguintes instantes: imediatamente antes do início do ensaio à rotura (Figura 3.28-a) e no momento em que a laje atingiu a sua capacidade de carga máxima (Figura 3.28-b). Nesta figura é também possível comparar a diferença do nível de deformação da laje S2L-F2 entre o início do ensaio à rotura e quando a laje atingiu a sua capacidade de carga máxima.

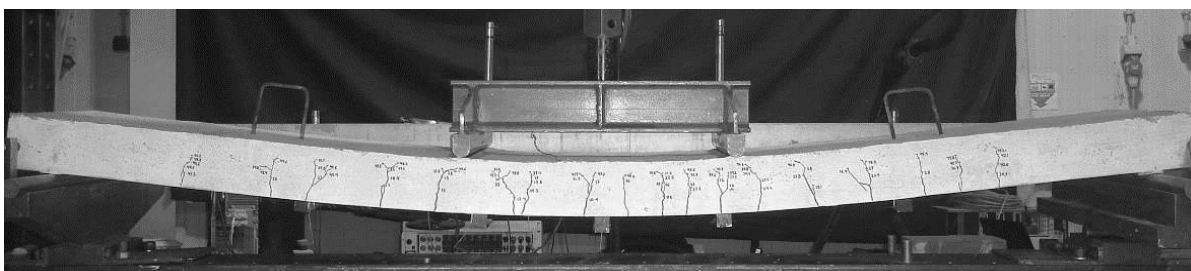
Da análise da Figura 3.27-a e da Figura 3.28-a é possível verificar que, no instante em que se deu o início do ensaio à rotura das lajes, o padrão de fendilhação existente na laje S2L-F2 era mais extenso do que o da laje S2L-F1, o que é justificado pelo nível de carregamento superior a que a laje S2L-F2 foi sujeita até chegar ao ensaio à rotura.

Após o início do ensaio à rotura das lajes S2L-F1 e S2L-F2, as fendas existentes nas lajes após a realização do ensaio cíclico começaram a abrir. Durante o ensaio à rotura desenvolveram-se novas fendas na laje S2L-F1, tal como se pode verificar ao comparar a Figura 3.27-a e a Figura 3.27-b. Comparando a Figura 3.28-a e a Figura 3.28-b verifica-se que houve poucas alterações ao nível do padrão de fendilhação da laje S2L-F2 com o decorrer do ensaio à rotura. Para tal

contribuiu o facto de previamente ao ensaio à rotura da laje S2L-F2, esta ter sido solicitada por cargas superiores à carga de cedência das armaduras.

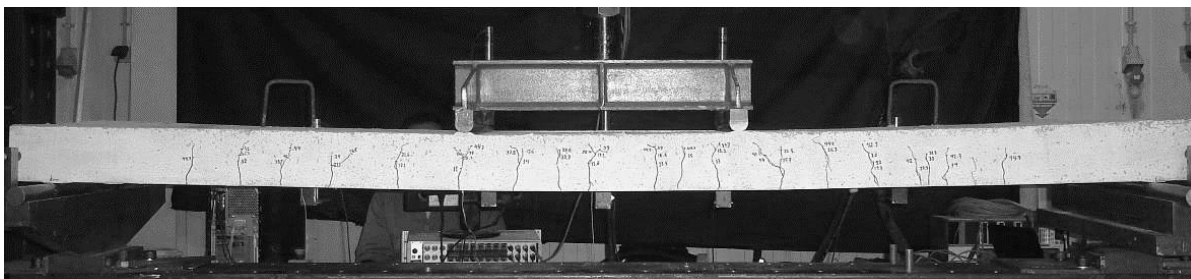


a)

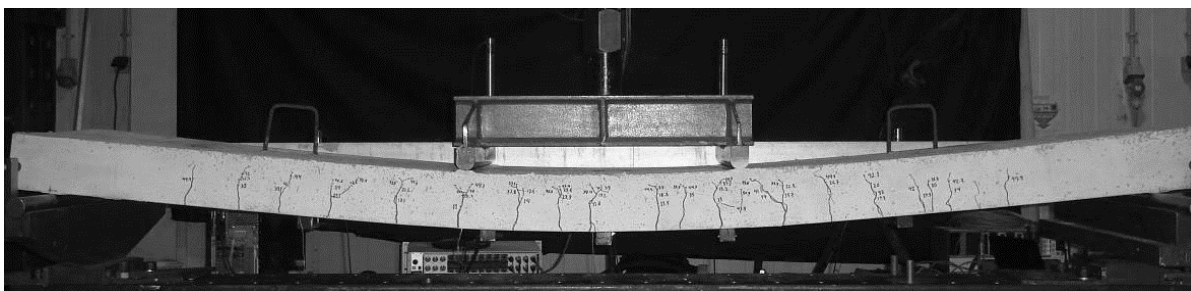


b)

Figura 3.27 - Laje S2L-F1 nas seguintes fases: a) imediatamente antes do ensaio à rotura; b) no momento em que a laje atinge a sua capacidade de carga máxima.



a)



b)

Figura 3.28 - Laje S2L-F2 nas seguintes fases: a) imediatamente antes do ensaio à rotura; b) no momento em que a laje atinge a sua capacidade de carga máxima.

Na Figura 3.29 apresenta-se o aspeto geral da laje S2L-F1 após o ensaio à rotura e o detalhe da zona onde ocorreu o modo de rotura da laje. Na Figura 3.30 apresenta-se o aspeto geral da laje S2L-F2 após o ensaio à rotura e o detalhe da zona onde ocorreu o modo de rotura da laje. Independentemente do nível de carregamento cíclico, o modo de rotura observado nas lajes



S2L-F1 e S2L-F2 foi a rotura dos laminados de CFRP com as armaduras longitudinais de tração em cedência. Deste modo, verifica-se que existiu um aproveitamento total do material de reforço utilizado.

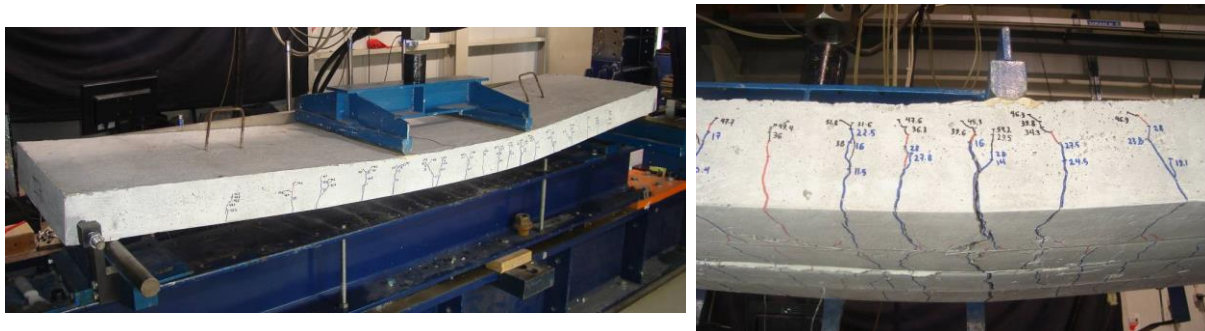


Figura 3.29 - Laje S2L-F1 após o ensaio à rotura e pormenor do modo de rotura.

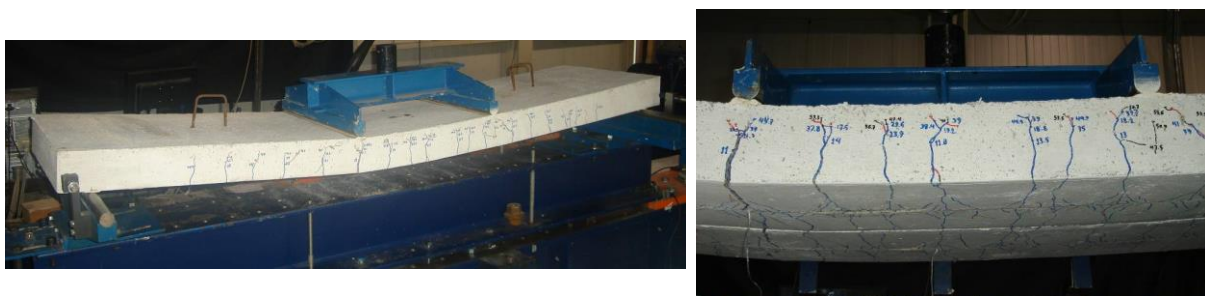
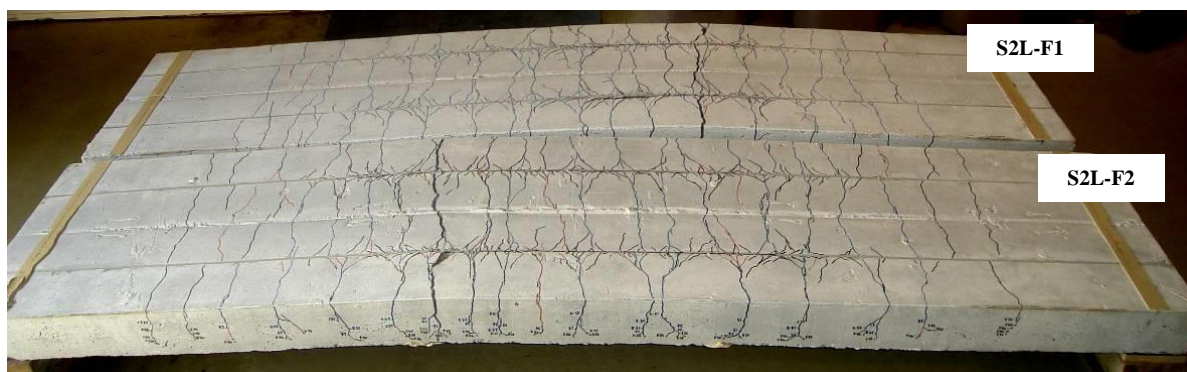
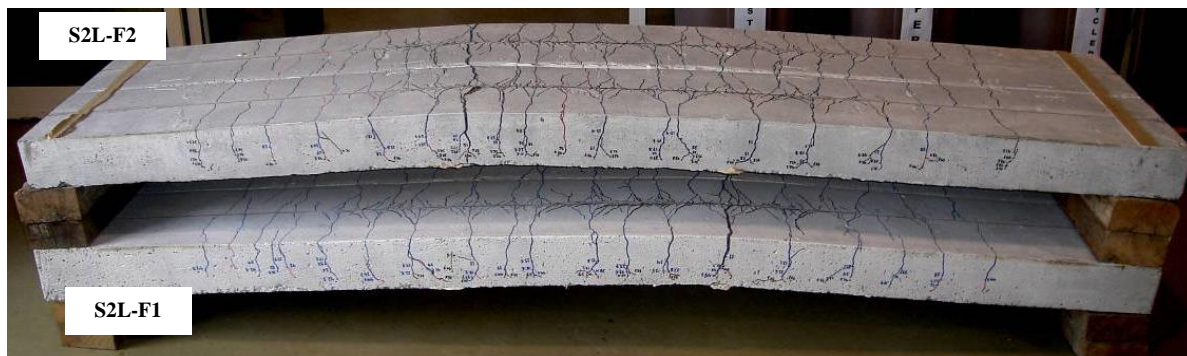


Figura 3.30 - Laje S2L-F2 após o ensaio à rotura e pormenor do modo de rotura.



a)



b)

Figura 3.31 - Padrão de fendilhação final das lajes S2L-F1 e S2L-F2: a) vista superior; b) vista lateral.

Na Figura 3.31 é possível observar o padrão de fendilhação final das lajes S2L-F1 e S2L-F2 após o ensaio até à rotura. A análise desta figura demonstra que o nível de carregamento cíclico teve influência no padrão de fendilhação final das lajes, na medida em que a laje que foi submetida ao carregamento cíclico mais severo (S2L-F2) teve uma menor distância entre fendas e a largura da banda de fendilhação foi ligeiramente mais extensa.

Na Figura 3.32 é apresentada a relação força ( $F$ ) vs flecha a meio-vão ( $\delta$ ) das lajes S2L-F1 e S2L-F2, que se diferenciavam apenas pelo nível de carregamento cíclico a que foram sujeitas previamente à realização do ensaio à rotura.

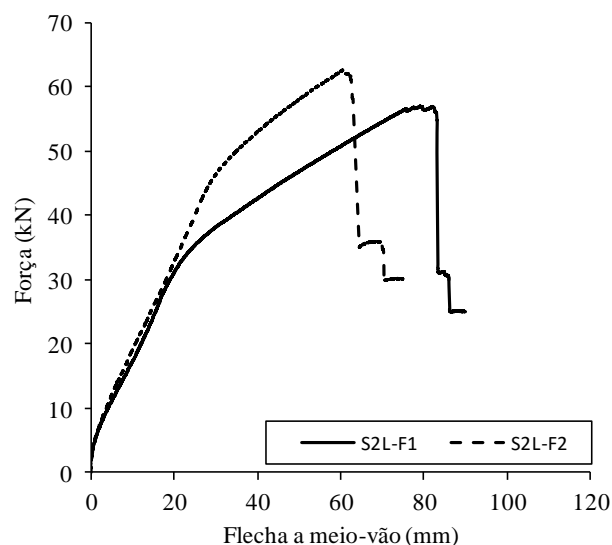


Figura 3.32 - Curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão das lajes S2L-F1 e S2L-F2.

A Figura 3.32 evidencia o facto das lajes sujeitas a um carregamento monotónico até à rotura, após terem sido submetidas previamente a um carregamento cíclico, apresentarem o mesmo comportamento até um nível de carga próximo do valor máximo da carga que foi imposto a esta laje antes do ensaio à rotura (28 kN). A partir deste nível verifica-se uma quebra de rigidez na laje S2L-F1 que não ocorreu na laje S2L-F2. A quebra de rigidez na laje S2L-F2 ocorreu para um nível de carga próximo do valor máximo da carga que foi imposto a esta laje antes do ensaio à rotura (45 kN).

Na Figura 3.32 também é evidente que a rigidez associada ao troço reto das curvas de comportamento imediatamente antes das lajes atingirem a sua capacidade de carga máxima é maior no caso da laje S2L-F2. Além disso, consta-se que a capacidade de carga máxima desta laje foi superior à da laje S2L-F1. Este comportamento melhorado por parte da laje submetida ao segundo nível de carregamento cíclico pode ser explicado pelo endurecimento do aço durante o carregamento cíclico.

Na Figura 3.33 apresenta-se, para as lajes S2L-F1 (Figura 3.33-a) e S2L-F2 (Figura 3.33-b), a relação entre a carga aplicada ao longo do ensaio à rotura, até as lajes atingirem a sua capacidade de carga máxima, e a variação das extensões registada nos extensómetros colados nos laminados de CFRP (ver Figura 3.15). A análise da Figura 3.33 permite constatar que os três extensómetros foram solicitados praticamente desde o início do ensaio à rotura. No entanto, os valores mais elevados das extensões ocorreram naturalmente nos extensómetros colados na secção a meio-vão (SG\_L1) e na secção de aplicação da carga (SG\_L2). Refira-se que o comportamento dos extensómetros SG\_L1 e SG\_L2, em ambas as lajes, foi similar ao observado na relação força vs flecha a meio-vão das lajes representada na Figura 3.32.

Na Tabela 3.7 apresentam-se os valores das extensões máximas registadas nos laminados de CFRP até ao momento em que as lajes atingiram a sua capacidade de carga máxima, assim como o grau de mobilização do reforço de CFRP (razão percentual entre o valor da extensão máxima registada nos laminados de CFRP,  $\varepsilon_{CFRP}^{máx}$ , e o valor médio da extensão máxima registada nos ensaios de tração uniaxial dos laminados de CFRP, 15.8‰) e o modo de rotura observado em cada laje. A análise desta tabela permite constatar que as extensões máximas registadas nos laminados de CFRP foram bastante elevadas, pois variaram entre os 73.4% e os 85.4% da capacidade máxima resistente à tração dos laminados de CFRP. Apesar de ter ocorrido a rotura do CFRP, na laje S2L-F2 a extensão máxima registada no CFRP foi de 11.6‰ (73.4% da capacidade máxima resistente do CFRP). Tal facto deve-se a que nesta laje a rotura do CFRP não se deu imediatamente a seguir à laje ter esgotado a sua capacidade de carga máxima, tal como se pode observar na Figura 3.32.

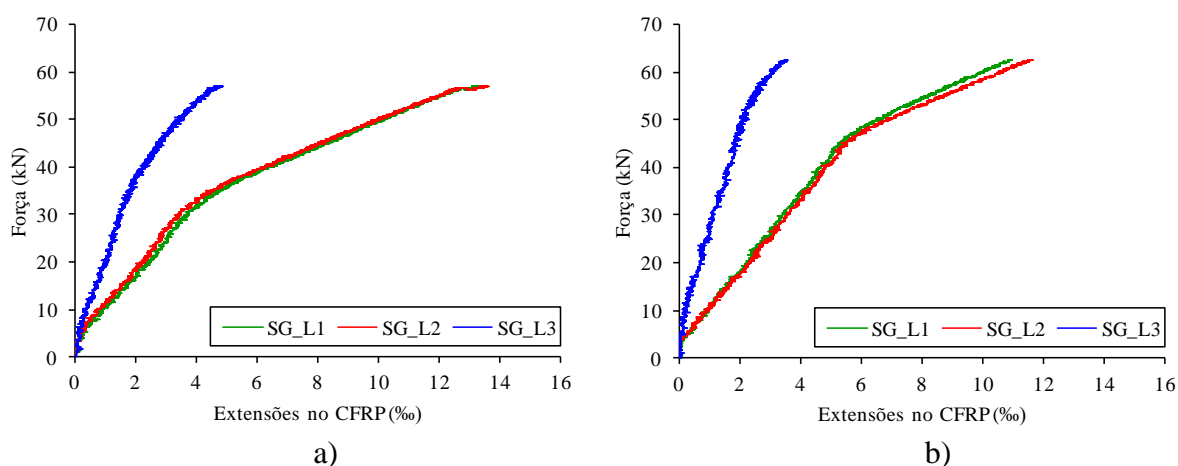


Figura 3.33 - Variação das extensões registadas nos laminados de CFRP no ensaio à rotura da laje: a) S2L-F1; b) S2L-F2.

Tabela 3.7 - Valores máximos da extensão registados no CFRP (lajes S2L-F1 e S2L-F2).

| Laje   | $\varepsilon_{CFRP}^{máx}$<br>(‰) | Grau de mobilização do reforço<br>(%) | Modo de rotura |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| S2L-F1 | 13.5                              | 85.4                                  | Rotura do CFRP |
| S2L-F2 | 11.6                              | 73.4                                  | Rotura do CFRP |

### 3.5.2.3. Efeito do carregamento cíclico

Por forma a se poder avaliar o efeito do nível de carregamento cíclico na eficácia do reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de CFRP inseridos, os resultados obtidos nos ensaios à rotura das lajes S2L-F1 e S2L-F2 serão comparados com os que foram alcançados por Dias *et al.* (2014), quando testaram as duas seguintes lajes: uma laje de referência sem CFRP (Laje REF) e uma laje semelhante às lajes S2L-F1 e S2L-F2 (que no âmbito da presente análise será designada de laje S2L-F0), com a diferença de não ter sido sujeita a um carregamento cíclico. Neste contexto, refira-se que o modo de rotura da laje S2L-F0 foi a rotura do reforço de CFRP tal como o que ocorreu nas lajes S2L-F1 e S2L-F2. Assim, verifica-se que os níveis de carregamento cíclico analisados não influenciaram o modo de rotura das lajes.

Na Figura 3.34 encontra-se a resposta força ( $F$ ) vs flecha a meio-vão ( $\delta$ ) das lajes REF (laje de referência sem reforço de CFRP), S2L-PC0 (laje reforçada que não foi sujeita a carregamento cíclico), S2L-PC1 (laje reforçada e sujeita ao 1º nível de carregamento cíclico) e S2L-PC2 (laje reforçada e sujeita ao 2º nível de carregamento cíclico), todas elas ensaiadas com carregamento monotónico até à rotura.

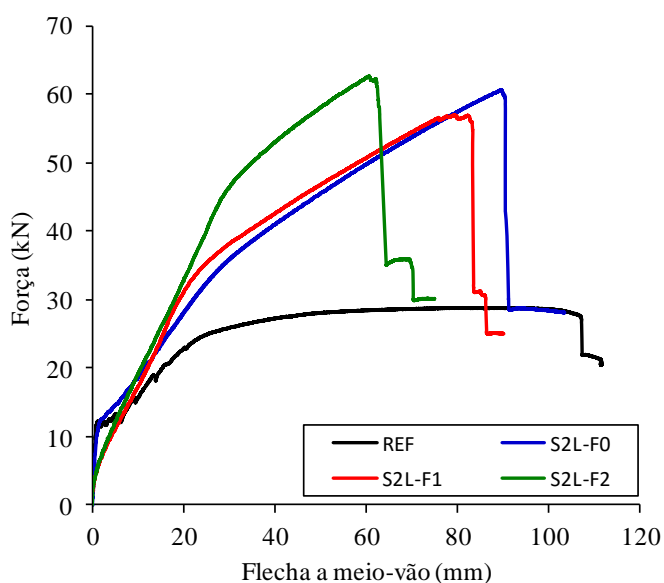


Figura 3.34 - Curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas com e sem carregamento cíclico.

A análise da Figura 3.34 permite verificar que as lajes que foram submetidas ao carregamento cíclico (S2L-F1 e S2L-F2) apresentaram uma menor rigidez na fase inicial relativamente à das lajes não sujeitas a carregamento cíclico (REF e S2L-F0). No entanto, com o aumento da carga, o comportamento das lajes S2L-F1 e S2L-F2 aproximou-se do da laje S2L-F0, tendo-se verificado que, na rotura, a laje submetida ao segundo nível de carregamento cíclico (S2L-F2) teve um desempenho, em termos de capacidade de carga, melhor do que o registado nas lajes S2L-F0 e S2L-F1.

Na Tabela 3.8 encontram-se os resultados obtidos nas lajes REF, S2L-F0, S2L-F1 e S2L-F2 em termos da carga de cedência das armaduras ( $F_{sy}$ ), da carga máxima ( $F_{max}$ ) e das respetivas flechas a meio-vão ( $\delta_{sy}$  associada a  $F_{sy}$  e  $\delta_{max}$  associada a  $F_{max}$ ).

Tabela 3.8 - Resultados do ensaio à rotura da laje de referência sem CFRP e das lajes reforçadas com e sem carregamento cíclico.

| Laje   | Cedência da armadura  |   | Rotura   |   |
|--------|-----------------------|---|--|---|
|        | $\delta_{sy}$<br>(mm) | $F_{sy}$<br>(kN)  | $\delta_{max}$<br>(mm)                                 | $F_{max}$<br>(kN)                                   |
| REF    | 23.5                  | 24.5  | 81.1   | 28.9  |
| S2L-F0 | 29.3                  | 35.5  | 89.8   | 60.7  |
| S2L-F1 | 24.8                  | 35.3<br>(-0.6%) <sup>1</sup>  | 79.2<br>(-11.8%) <sup>1</sup>                          | 57.0<br>(-6.1%) <sup>1</sup>                        |
| S2L-F2 | 27.1 <sup>2</sup>     | 36.2 <sup>2</sup><br>(+1.97%) <sup>1</sup><br>(+2.55%) <sup>3</sup> | 60.7<br>(-32.4%) <sup>1</sup><br>(-23.4%) <sup>3</sup> | 62.7<br>(+3.3%) <sup>1</sup><br>(+10%) <sup>3</sup> |

<sup>1</sup>Varição percentual relativamente à laje S2L-F0; <sup>2</sup>Valores obtidos no âmbito do procedimento correspondente ao carregamento cíclico; <sup>3</sup>Varição percentual relativamente à laje S2L-F2.

Na Tabela 3.8 são ainda apresentados, entre parênteses, os valores das variações percentuais da carga de cedência das armaduras, da carga máxima e da flecha a meio-vão correspondente à carga máxima para os seguintes cenários: 1) com o objetivo de avaliar o efeito do carregamento cíclico na eficácia da técnica de reforço NSM com laminados de CFRP inseridos, são apresentadas as variações percentuais das lajes submetidas a diferentes carregamentos cíclicos (S2L-F1 e S2L-F2) relativamente à laje S2L-F0 que não foi sujeita a carregamento cíclico; 2) por forma a comparar os níveis de carregamento cíclico testados, são apresentadas as variações percentuais da laje S2L-F2 relativamente à laje S2L-F1. Tendo em conta que a avaliação do efeito do reforço de CFRP (laje não reforçada vs laje reforçada, ambas sem carregamento cíclico) foi anteriormente efetuada (ver Tabela 3.5), na Tabela 3.8 não foram introduzidos os incrementos percentuais dos parâmetros acima referidos da laje S2L-F0 (por simplificação da

análise adotaram-se nomes diferentes mas as lajes designadas nesta dissertação por S2L-PC0 e S2L-F0 correspondem à mesma laje) relativamente à laje de referência (REF).

Relativamente à carga de cedência da armadura ( $F_{sy}$ ), o valor registado na laje S2L-F1 foi de 35.3 kN, o que representou uma diminuição de 0.6% relativamente à carga  $F_{sy}$  da laje S2L-F0. A carga de cedência da laje S2L-F2 foi 1.97% superior à da laje S2L-F0.

Em termos de capacidade máxima de carga ( $F_{max}$ ), os valores obtidos nas lajes S2L-F1 e S2L-F2 foram, respetivamente, 57.0 kN e 62.7 kN, o que correspondeu a um decréscimo de 6.1% da laje S2L-F1 relativamente à laje S2L-F0 e um aumento de 3.3% da laje S2L-F2 relativamente à laje S2L-F0. Deste modo, verifica-se que o nível de carregamento cíclico aplicado nas lajes praticamente não teve influência na carga de cedência da armadura e na capacidade de carga máxima das lajes de betão armado ensaiadas. Efetuando uma comparação entre os níveis de carregamento cíclico aplicados, verifica-se que, em termos de capacidade de carga máxima, a laje S2L-F2 apresentou um aumento de 10% relativamente à laje S2L-F1.

Em termos da flecha a meio-vão associada à carga máxima das lajes ( $\delta_{max}$ ), verifica-se uma tendência para a diminuição do seu valor com o nível de carregamento cíclico. Os valores de  $\delta_{max}$  obtidos nas lajes S2L-F1 e S2L-F2 foram, respetivamente, 79.2 mm e 60.7 mm, o que correspondeu a um decréscimo de 11.8% da laje S2L-F1 relativamente à laje S2L-F0 e um decréscimo de 32.4% da laje S2L-F2 relativamente à laje S2L-F0. Efetuando uma comparação entre os níveis de carregamento cíclico aplicados, verifica-se que, em termos da flecha  $\delta_{max}$ , a laje S2L-F2 apresentou uma diminuição de 23.4% relativamente à laje S2L-F1.

# Capítulo 4

## Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais do trabalho de investigação desenvolvido no âmbito da presente dissertação. Posteriormente, são apresentadas algumas sugestões visando desenvolvimentos futuros.

### 4.1. CONCLUSÕES GERAIS

A investigação desenvolvida no âmbito da presente dissertação teve como principal objetivo a avaliação do efeito da pré-fendilhação e do carregamento cíclico no comportamento à rotura de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM). Para tal, foi realizado um programa experimental com quatro lajes de betão armado, tendo sido analisados dois níveis de dano (pré-fendilhação) e dois níveis de carregamento cíclico. Duas das lajes foram pré-fendilhadas (laje S2L-PC1: Nível de dano 1 e laje S2L-PC2: Nível de dano 2) e, posteriormente, reforçadas à flexão com dois laminados de CFRP inseridos. Estas lajes foram de seguida ensaiadas até à rotura com carregamento monotónico. As restantes duas lajes (S2L-F1 e S2L-F2) foram inicialmente reforçadas à flexão com dois laminados de CFRP inseridos e, posteriormente, submetidas a um carregamento cíclico (laje S2L-F1: Nível de carregamento cíclico 1 e laje S2L-F2: Nível de carregamento cíclico 2). As lajes S2L-F1 e S2L-F2 não atingiram a rotura durante o ensaio cíclico e foram, posteriormente, submetidas a um ensaio monotónico até à rotura. O comportamento à rotura das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 foi comparado com uma laje semelhante (laje S2L-PC0) com a diferença de não ter sido pré-fendilhada antes da aplicação do reforço de CFRP. O comportamento à rotura das lajes S2L-F1 e S2L-F2 foi comparado com uma laje semelhante (laje S2L-F0) com a diferença de não ter sido submetida a um carregamento cíclico.

#### 4.1.1. Efeito da pré-fendilhação antes da aplicação do reforço de CFRP (lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 vs laje S2L-PC0)

Sobre o efeito da pré-fendilhação das lajes antes da aplicação do reforço de CFRP, a realização do programa experimental associado a esta dissertação permitiu extrair as seguintes conclusões:

- As curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão do ensaio à rotura demonstraram que as lajes pré-fendilhadas e posteriormente reforçadas à flexão com laminados de CFRP

inseridos (S2L-PC1 e S2L-PC2) apresentaram dois estados principais de comportamento: betão fendilhado com o aço não plastificado e betão fendilhado com armadura em cedência. Na laje semelhante sem pré-fendilhação (laje S2L-PC0), a curva de comportamento força vs flecha a meio-vão do ensaio à rotura apresentou três estados principais de comportamento: betão não fendilhado; betão fendilhado com o aço não plastificado; betão fendilhado com armadura em cedência.

- Independentemente do nível de pré-fendilhação instalado, o modo de rotura observado nas lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 foi a rotura dos laminados de CFRP com as armaduras longitudinais de tração em cedência. O modo de rotura ocorrido nas lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 foi também o registado na laje semelhante sem pré-fendilhação (laje S2L-PC0). Desta forma verifica-se que os níveis de dano (pré-fendilhação) testados não modificaram o modo de rotura das lajes reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos.
- Tendo como base o comportamento da laje sem pré-fendilhação S2L-PC0, verificou-se que, em termos de carga de cedência das armaduras, as lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 apresentaram um incremento de 7% e 1.4%, respetivamente. Em termos de carga máxima, observou-se, relativamente à laje S2L-PC0, um aumento de 8.7% na laje S2L-PC1 e um decréscimo de 3.3% na laje S2L-PC2. Deste modo, conclui-se que, comparativamente com a laje S2L-PC0, as lajes que foram submetidas ao ensaio de pré-fendilhação (S2L-PC1 e S2L-PC2) não apresentaram variações significativas em termos da carga de cedência das armaduras e da capacidade de carga máxima.
- Comparando os níveis de pré-fendilhação analisados, em termos de carga de cedência das armaduras, verificou-se que a laje S2L-PC2 apresentou uma diminuição de 5.3% relativamente à laje S2L-PC1. Em termos de capacidade de carga máxima, observou-se um decréscimo de 11.1% da laje S2L-PC2 relativamente à laje S2L-PC1. Assim, conclui-se que a aplicação do nível de dano mais severo originou um decréscimo da carga de cedência das armaduras e da capacidade de carga máxima da laje S2L-PC2 relativamente à laje S2L-PC1.
- Em termos do índice de ductilidade, e tendo como base os valores obtidos pela laje S2L-PC0, observou-se um incremento de 6.5% da laje S2L-PC1 e um decréscimo de 19.4% na laje S2L-PC2. Efetuando uma comparação em termos dos níveis de dano testados, verificou-se que a laje S2L-PC2 apresentou uma diminuição de 24.2% relativamente à laje S2L-PC1, ou seja, houve uma diminuição da ductilidade com o aumento do nível de dano.
- As extensões máximas registadas nos laminados de CFRP das lajes S2L-PC1 e S2L-PC2 foram de 15.4% e 13.7%, respetivamente. Tendo em conta que o valor médio da extensão máxima registada nos ensaios de tração uniaxial dos laminados de CFRP foi de 15.8%,



verificou-se que o grau de mobilização do reforço de CFRP para as lajes acima mencionadas foi de 97.5% e de 86.7%, respetivamente, o que por um lado justifica o modo de rotura obtido (rotura do CFRP) e por outro demonstra a elevada eficácia do reforço à flexão, com laminados de CFRP inseridos, de lajes de betão armado com um determinado padrão de fendilhação.

#### **4.1.2. Efeito do carregamento cíclico (lajes S2L-F1 e S2L-F2 vs laje S2L-F0)**

Sobre o efeito do carregamento cíclico aplicado nas lajes antes de serem submetidas a um ensaio monotónico à rotura, a realização do programa experimental associado a esta dissertação permitiu extrair as seguintes conclusões:

- Independentemente do nível de carregamento cíclico, o modo de rotura observado nas lajes S2L-F1 e S2L-F2 foi a rotura dos laminados de CFRP com as armaduras longitudinais de tração em cedência. Deste modo, verifica-se que existiu um aproveitamento total do material de reforço utilizado. O modo de rotura ocorrido nas lajes S2L-F1 e S2L-F2 foi também o registado na laje semelhante sem carregamento cíclico (laje S2L-F0). Desta forma verifica-se que os níveis de carregamento cíclico testados não modificaram o modo de rotura das lajes reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos.
- Tendo como base o comportamento da laje sem carregamento cíclico S2L-F0, verificou-se que, em termos de carga de cedência das armaduras, a laje S2L-F1 apresentou uma diminuição de 0.6% e a laje S2L-F2 teve um aumento de 1.97% (devido ao nível de carregamento cíclico imposto na laje S2L-F2, a cedência das armaduras aconteceu previamente ao ensaio à rotura, durante o procedimento do ensaio cíclico). Em termos de capacidade de carga máxima, as lajes S2L-F1 e S2L-F2 apresentaram, relativamente à laje S2L-F0, um decréscimo de 6.1% e um incremento de 3.3%, respetivamente. Deste modo, conclui-se que o nível de carregamento cíclico aplicado praticamente não teve influência na carga de cedência das armaduras (laje S2L-F1 vs laje S2L-F0) e na capacidade de carga máxima das lajes de betão armado ensaiadas.
- Tendo o comportamento da laje S2L-F1 como referência, verificou-se que a laje S2L-F2 apresentou um aumento de 10% em termos de capacidade de carga máxima. Deste modo, conclui-se que ao aumento do nível de carregamento cíclico esteve associado um aumento da capacidade de carga máxima.
- Em termos da flecha máxima a meio-vão ( $\delta_{max}$ ), as lajes S2L-F1 e S2L-F2 apresentaram, relativamente à laje S2L-F0, um decréscimo de 11.8% e 32.4%, respetivamente. Efetuando uma comparação entre os níveis de carregamento cíclico aplicados, verifica-se que, em

termos da flecha  $\delta_{max}$ , a laje S2L-F2 apresentou uma diminuição de 23.4% relativamente à laje S2L-F1.

## 4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados obtidos no âmbito da presente dissertação são uma contribuição para o nível de conhecimento sobre o reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM). Em termos de desenvolvimentos futuros, são propostos os seguintes aspetos a investigar:

- Avaliação do efeito de uma maior percentagem de laminados de CFRP inseridos e de uma maior percentagem de armadura longitudinal no reforço à flexão de lajes de betão armado com pré-fendilhação no betão; Avaliação do efeito de uma maior percentagem de laminados de CFRP inseridos e de uma maior percentagem de armadura longitudinal no reforço à flexão de lajes de betão armado com carregamento cíclico.
- Avaliação da eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de lajes de betão armado, pré-fendilhadas antes da execução do reforço e solicitadas, posteriormente ao reforço, com um carregamento cíclico.
- Avaliação do efeito da pré-fendilhação do betão e de um carregamento cíclico no reforço à flexão de lajes contínuas de betão armado com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM.

# Capítulo 5

## Referências Bibliográficas

- ACI 440R-96, 1996, “*State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures*”, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 440, 68 pp.
- Aidoo, J., Harries, K.A. e Petrou, M.F., 2004a, “*Behaviour of reinforced concrete bridge girders retrofit with CFRP and subjected to monotonic and fatigue loading*” Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, AB, Canada.
- Aidoo, J., Harries, K.A., e Petrou, M.F., 2004b, “*Fatigue behavior of carbon fiber reinforced polymer strengthened reinforced concrete bridge girders*”, Journal of Composites for Construction, vol. 8, nº 60, pp. 501-509.
- Arduini, M. e Nanni, A., 1997, “*Behaviour of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets*”, Journal of Composites for Construction, vol. 1, nº2, September, pp. 63-70.
- Badawi, M. e Soudki, K., 2009, “*Fatigue behaviour of RC beams strengthened with NSM CFRP rods*”, Journal of Composites for Construction, vol. 13, nº5, September/October, pp. 415-421.
- Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Riskalla, S.H. e Triantafillou, T.C., 2002, “*Fiber-reinforced polymer composites for construction – State-of-the-art review*”, Journal of Composites for Construction, vol. 6, nº2, May, pp. 73-87.
- Barnes, R.A. e Mays, G.C. (1999), “*Fatigue performance of concrete beams strengthened with CFRP plates*” Journal of Composites for Construction, vol. 3, nº2, pp.63-72.
- Benjeddou, O., Ouezdou, M. B. e Bedday, A., 2006, “*Damaged RC beams repaired by bonding of CFRP laminates*”, Construction and Building Materials, vol. 21, nº6, June, pp. 1301-1310.
- Blaschko, M., e Zilch, K., 1999, “*Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits*”, Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials, Paris, France, 1-7 pp.

- Bonaldo, E., 2008, “*Composite materials and discrete steel fibres for the strengthening of thin concrete structures*”, Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, Dezembro, 404 pp.
- Branco, F.G., 2011, “Reabilitação e reforço de estruturas”, Aula 15: Reforço por colagem de chapas de aço, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Brena, S.F., Benouaich, M.A., Kreger, M.E., e Wood, S., 2005, “*Fatigue tests of reinforced concrete beams strengthened using carbon fiber-reinforced polymer composites*”, *ACI Structural Journal*, vol. 102, nº 2\_, pp. 305-313.
- 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, Suécia, June, 190 pp.
- Costa, I.G. e Barros, J.A.O., 2013, “*Assessment of the long term behavior of structural adhesives in the context of NSM flexural strengthening technique with prestressed CFRP laminates*”, 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-11), Guimarães, Portugal, June 26-28.
- Dalfré, G. M., Barros, J.A.O., 2012, “*NSM technique to increase the load carrying capacity of continuous RC slabs*”, *Engineering Structures*, vol. 56, May, pp. 137-153.
- 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., 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.A., 2006, “*Estruturas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas de CFRP*”, *Revista IBRACON de Estruturas*, vol. 2, nº2, Junho, pp. 252-275.
- Dias, S.J.E., 2008, “*Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com a técnica de inserção de laminados de CFRP*”, Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, Julho, 391 pp.

- Dias, S.J.E., Hosseini, M., Barros, J.A.O., 2014, “Aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados no reforço à flexão de lajes de betão armado”, 5ª Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas.
- Ekenel, M., Rizzo, A., Myers, J.J., e Nanni, A., 2005, “*Effect of fatigue loading on flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with FRP fabrics and pre-cured laminate systems*” Proceedings of the 3rd International Conference on Composites in Construction, Lyon, France.
- El-Hacha, R. e Riskalla, S.H., 2004, “*Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures*”, ACI Structural Journal, vol. 101, nº5, September-October, pp. 717-726.
- Fernandes, P., Silva, P., Sena-Cruz, J. M., Azenha, M., Barros, J.A.O., 2014, “*Comportamento à fadiga de elementos de betão reforçados através de sistemas de CFRP*”, 1º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, Foz do Iguaçu.
- fib* - Bulletin 14, 2001, “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*”, Technical report by Task Group 9.3 FRP (Fiber Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, Fédération Internationale du Béton - *fib*, July, 130 pp.
- Gheorghiu, C., Labossiere, P., e Proulx, J., 2004a, “*Effect of highlevel fatigue loading on RC-beams externally reinforced with CFRPs.*” Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, AB, Canada.
- Gheorghiu, C., Labossiere, P., e Raihe, A., 2004b, “*Environmental fatigue and static behavior of RC beams strengthened with carbonfiber-reinforced polymer.*” Journal of Composites for Construction, vol. 8, nº 3, pp. 211-218.
- Gheorghiu, C., Labossiere, P., Proulx, J., 2005, “*Fatigue and monotonic strength of RC beams strengthened with CFRPs*”, Composites: Part A, 37 (2006), pp. 1111-1118.
- Gomes, A. e Appleton, J., 1997, “*Reforço de estruturas de betão por encamisamento das secções*”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, nº42, Setembro, pp. 7-17.
- Hassanen, M.A.H., 2000, “*Behaviour of R.C. beams upgraded with externally Bonded steel or FRP plates*”, Doctoral Thesis, Loughborough University, June, 370 pp.
- Heffernan, P.J., 1997, “*Fatigue behaviour of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates*”, Doctoral Thesis, Department of Civil Engineering, Royal Military College of Canada, Kingston, Ontario, May, 157 pp.

- Heffernan, P.J., e Erki, M.A., 2004, “*Fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced plastic laminates*”, Journal of Composites for Construction, vol. 8, nº2, pp. 132-140.
- 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, Setembro, pp. 33-42.
- Kim, Y.J. e Heffernan, P.J., 2008, “*Fatigue behaviour of externally strengthened concrete beams with Fiber-Reinforced polymers: State of the art*”, Journal of Composites for Construction, vol. 12, nº3, May/June, pp. 246-256.
- Larson, K.H., Peterman, R.J., e Rashheed, H.A., 2005, “*Strength-fatigue behavior of fiber reinforced polymer strengthened prestressed concrete T-beams*” Journal of Composites for Construction, vol. 9, nº4, pp. 313-326.
- Masoud, S., Soudki, K. e Topper, T., 2001, “*CFRP-strengthened and corroded RC beams under monotonic and fatigue loads*”, Journal of Composites for Construction, nº 5, vol. 4, pp. 228-236.
- Neves, S.P.M., 2012, “*Pré-esforço exterior no reforço de estruturas*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Abril, 141 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.
- Oudah, F. e El-Hacha, R., 2013, “*Research progress on the fatigue performance of RC beams strengthened in flexure using Fiber Reinforced Polymers*”, Composites Part B, vol. 47, pp. 82-95.
- Rosenboom, O.A., e Rizkalla, S.M., 2005, “*Fatigue behavior of prestressed concrete bridge girders strengthened with various CFRP systems*” Fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures, ACI, pp. 597-612.
- Sena-Cruz, J.M., Barros, J.A.O. e Dias, S.J.E., 2011, “*1º Seminário sobre o projeto de reforço de Estruturas de betão com FRP's*”, 1ª Edição, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães.

- 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.
- Shahawy, M. e Beitelman, T.E., 1999, “Static and fatigue performance of RC beams strengthened with CFRP laminates”, Journal of Structural Engineering, vol. 125, nº 6, pp. 613-621.
- Stap, 2015, “*Reforço de betão armado com chapas e perfis de aço*”, Stap Reparação, Consolidação e Modificação de Estruturas, S.A., Lisboa, Portugal, <http://www.stap.pt/index.php?id=116&det=3>, acedido em 07-05-2015.
- Toutanji, H., Zhao, L., Deng, Y., Zhang, Y., e Balaguru, P., 2006, “*Cyclic behavior of RC beams strengthened with carbon fiber sheets bonded by inorganic matrix*” Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 18, nº1, pp. 28-35.
- Vilhena, A., 2013, “*Reabilitação habitacional e o sector da construção civil*”, O Parque Habitacional e a sua Reabilitação: Retrato e Prospetiva, LNEC, Lisboa, 12 de Novembro.
- Wenwei, W. e Guo, L., 2005, “*Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load*”, International Journal of Solids and Structures, vol. 43, nº6, March, pp. 1372-1387.