



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Carolina Lopes Alves

Comportamento de lajes de betão armado
pré-fendilhadas e reforçadas à flexão com
laminados de CFRP inseridos pré-tensionados



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Carolina Lopes Alves

Comportamento de lajes de betão armado
pré-fendilhadas e reforçadas à flexão com
laminados de CFRP inseridos pré-tensionados

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

Chegou o momento de agradecer a todas aquelas pessoas e entidades que cooperaram na elaboração desta dissertação e fizeram com que os objetivos propostos fossem alcançados.

À Universidade do Minho, ao Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST) e ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) agradeço as instalações e recursos colocados à minha disposição para desenvolvimento da presente dissertação.

Ao Professor Salvador Dias, pelos seus ensinamentos, rigor científico, revisões críticas, disponibilidade, orientação, dedicação e apoio demonstrado ao longo da realização da presente dissertação.

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

Um agradecimento aos técnicos do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, António Matos e Marco Jorge, pela colaboração e apoio na execução do trabalho experimental realizado.

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.

Um agradecimento muito especial aos meus Pais e ao meu Irmão, que foram sem dúvida os pilares essenciais nos momentos mais difíceis desta caminhada. Pelo apoio incondicional, afeto, educação e pelo facto de me proporcionarem a realização da minha formação, são para mim um motivo de orgulho e uma fonte de inspiração. Obrigado.

À restante Família, pelos pequenos gestos e palavras, que serviram em muitos momentos de verdadeiro conforto.

Agradeço aos meus amigos, que sempre estiveram presentes e me apoiaram nestes 5 anos de vida académica, pelo apoio constante, amizade, companheirismo e sentido de entreaajuda.

Resumo

A presente dissertação resulta da investigação realizada para avaliar o efeito da pré-fendilhação do betão no reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) inseridos e pré-tensionados em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM - *Near Surface Mounted*).

O presente trabalho inicia-se com realização de uma revisão bibliográfica sobre a temática desta dissertação, com particular destaque para o estado de conhecimento ao nível do comportamento estrutural de elementos de betão armado reforçados à flexão com a técnica NSM usando compósitos de CFRP, com e sem pré-fendilhação do betão e com e sem aplicação de pré-tensão no CFRP. Posteriormente, é apresentado o programa experimental realizado no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST), por forma a avaliar o efeito da pré-fendilhação do betão, no comportamento de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados. O nível de dano (pré-fendilhação) e o nível de pré-tensão nos laminados de CFRP são os parâmetros que distinguem as soluções de reforço testadas. O comportamento de lajes pré-fendilhadas e reforçadas à flexão, com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados, é comparado com o de lajes semelhantes, com a diferença de, nestas, não existir pré-fendilhação antes da execução do reforço. Por último, as principais conclusões extraídas da investigação desenvolvida ao longo deste trabalho são apresentadas, e desenvolvimentos futuros são sugeridos.

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

Abstract

The present dissertation is the result of a research about the evaluation of the concrete pre-cracking effect on the flexural strengthening of reinforced concrete (RC) slabs using NSM (Near Surface Mounted) technique with prestressed CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer) laminates.

This work starts with a literature review performed about the knowledge that currently exists in terms of the subject of this dissertation, with particular emphasis in the behavior of RC structural elements flexural strengthened with NSM technique using CFRP composite materials, with or without concrete pre-cracking and with or without prestress in the CFRP. After performing a literature review the experimental program carried out in the present dissertation is described. This experimental research was carried out in the Structures Laboratory of the Department of Civil Engineering of the University of Minho (LEST) and had the purpose to assess the effect of the concrete pre-cracking on the flexural strengthening of RC slabs with prestressed NSM CFRP laminates. The damage level (precracking) and the prestressed CFRP level are the parameters that distinguish the tested CFRP strengthening configurations. The behavior of pre-cracked RC slabs flexural strengthened with prestressed NSM CFRP laminates is compared with similar RC slabs without pre-cracks before the CFRP application. Finally, the most relevant conclusions extracted from the present study are presented, and further research developments are suggested.

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

Índice geral

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO / PALAVRAS-CHAVE	iii
ABSTRACT / KEYWORDS	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Considerações gerais.....	1
1.2 - Objetivos de trabalho	2
1.3 - Organização da dissertação.....	3
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 - Compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão	5
2.2 - Técnicas de reforço com compósitos de CFRP	7
2.2.1 - Técnica de colagem externa (EBR).....	7
2.2.2 - Técnica de inserção (NSM).....	9
2.2.3 - Comparação entre as técnicas EBR e NSM	12
2.3 - Comportamento de elementos de betão armado reforçados à flexão com laminados de CFRP inseridos.....	14
2.4 - Reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos em estruturas de betão armado pré-fendilhadas	21
2.4.1 - Vigas de betão armado	21
2.4.2 - Lajes de betão armado.....	24

2.5 - Pré-esforço nos materiais compósitos para reforço de estruturas em betão armado.....	28
2.6 - Comportamento de estruturas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados.....	32
2.6.1 - Vigas de betão armado.....	32
2.6.2 - Lajes de betão armado.....	39
CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	47
3.1 - Conceção dos modelos.....	48
3.2 - Caraterização dos materiais.....	51
3.3 - Aplicação do reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados.....	53
3.4 - Sistema de ensaio e instrumentação das lajes.....	57
3.5 - Apresentação dos resultados.....	59
3.5.1 - Ensaio de Pré-fendilhação.....	59
3.5.2 - Ensaio de Rotura.....	62
3.5.2.1 - Desenvolvimento do padrão de fendilhação e modos de rotura.....	62
3.5.2.2 - Capacidade de carga e capacidade deformacional.....	68
3.5.2.3 - Extensões no CFRP e grau de mobilização do CFRP.....	74
3.5.3 - Efeito da pré-fendilhação.....	76
CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	83
4.1 - Conclusões gerais.....	83
4.2 - Desenvolvimentos futuros.....	85
CAPÍTULO 5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

Índice de figuras

Figura 1 - Diagrama tensão vs extensão de distintos tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço (Barros, 2007).....	6
Figura 2 - Materiais compósitos de CFRP: a) varão (Filho, 2005); b) laminado (Juvandes, 2011); c) manta (Dias, 2008) e d) tecido (Dias, 2008)	7
Figura 3 - Aplicação da técnica EBR com CFRP: a) no confinamento de pilares (Appleton e Costa, 2012); b) no reforço à flexão (Teixeira <i>et al.</i> , 2014); c) no reforço ao corte (Barros, 2004)	7
Figura 4 - Sistemas de reforço de CFRP aplicados com a técnica da colagem externa (Dias, 2001).....	8
Figura 5 - Aplicação da técnica da colagem externa e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias <i>et al.</i> , 2006)	9
Figura 6 - Reforço à flexão com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM (Sena-Cruz, 2011).....	10
Figura 7 - Aplicação de um reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos (Dias, 2008)	11
Figura 8 - Técnica NSM e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias, 2008)	11
Figura 9 - Grau de ancoragem do CFRP conferido pelas técnicas EBR e NSM (Dias, 2008)...	12
Figura 10 - Resultados dos ensaios realizados por Blaschko e Zilch (1999)	13
Figura 11 - Configuração e detalhes das vigas ensaiadas por Barros e Fortes (2005)	15
Figura 12 - Relação força vs deslocamento a meio-vão de vigas ensaiadas por Barros e Fortes (2005)	16
Figura 13 - Dados gerais sobre as vigas ensaiadas por Dias <i>et al.</i> (2012) (dimensões em mm)	17

Figura 14 - a) Relação força vs flecha a meio-vão das vigas ensaiadas por Dias <i>et al.</i> (2012); b) Relação percentagem de CFRP vs acréscimos de carga das vigas ensaiadas por Dias <i>et al.</i> (2012)	18
Figura 15 - Configuração das lajes ensaiadas por Bonaldo <i>et al.</i> (2007) (dimensões em mm).	19
Figura 16 - Diagrama força vs flecha a meio-vão obtidos nos ensaios das lajes em função da classe de resistência do betão: a) C12/15; b) C35/45 e c) C50/60 (Bonaldo, 2008)	19
Figura 17 - Curvas de comportamento das vigas REF-M, S1-PC1, S2-PC1 e S3-PC1 (Vieira, 2013)	22
Figura 18 - Geometria das faixas de laje ensaiadas por Dalfré e Barros (2013)	24
Figura 19 - Relações força média vs deslocamento vertical nas faixas de laje das séries SL45-H/HS (Dalfré e Barros, 2013)	27
Figura 20 - Esquema do sistema de pré-esforço indireto (adaptado de El-Hacha e Soudki, 2013)	29
Figura 21 - Esquema do sistema de pré-esforço direto (adaptado de El-Hacha e Gaafar, 2011)	29
Figura 22 - Esquema da técnica NSM com FRP pré-tensionado (adaptado de Aslam <i>et al.</i> , 2015)	30
Figura 23 - Curvas de força vs flecha a meio-vão para: a) viga sem reforço; b) viga reforçada sem pré-tensão, e c) viga reforçada com pré-tensão (Escobar, 2003)	31
Figura 24 - Comportamento de vigas reforçadas com diversos níveis de pré-esforço no CFRP (P1, P2 e P3), viga não pré-esforçada e viga não reforçada (adaptado de El-Hacha e Soudki, 2013)	31
Figura 25 - Carga máxima vs nível de pré-esforço nos varões de CFRP inseridos em diferentes estudos realizados (adaptado de Aslam <i>et al.</i> , 2015)	31
Figura 26 - Configuração do ensaio, geometria e armaduras das vigas ensaiadas (adaptado de El-Hacha e Gaafar, 2011)	33
Figura 27 - Força vs flecha a meio-vão das vigas ensaiadas por El-Hacha e Gaafar (2011)	34
Figura 28 - Sistema de ensaio das vigas ensaiadas por Costa (2014)	35

Figura 29 - Geometria e armaduras das vigas ensaiadas por Costa (2014).....	36
Figura 30 - Ilustração da ancoragem: a) passiva, b) ativa; c) aplicação do adesivo (Costa, 2014)	37
Figura 31 - Diagramas de força vs flecha a meio-vão das vigas da série III (Costa, 2014).	38
Figura 32 - Informação geral sobre as lajes de betão armado ensaiadas por Hosseini <i>et al.</i> (2014) (dimensões em mm)	40
Figura 33 - Seção transversal das lajes de betão armado reforçadas, usando a técnica NSM, com laminados de CFRP (Hosseini <i>et al.</i> , 2014) (dimensões em mm).....	40
Figura 34 - Relação força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas por Hosseini <i>et al.</i> (2014).	41
Figura 35 - a) Aumento da capacidade de carga vs nível de pré-esforço no CFRP; b) Diminuição da flecha máxima vs nível de pré-esforço no CFRP (Dias <i>et al.</i> , 2014a).....	41
Figura 36 - Modos de rotura nas lajes de betão armado ensaiadas (Dias <i>et al.</i> , 2014a).....	42
Figura 37 - Geometria das lajes ensaiadas (dimensões em mm).....	48
Figura 38 - Solução de reforço de CFRP das lajes testadas (dimensões em mm).....	49
Figura 39 - Execução das lajes de betão armado utilizadas no programa experimental	50
Figura 40 - Caracterização do betão: a) Provetes de betão; b) Ensaio para determinação da resistência à compressão; c) Ensaio para determinação do módulo de elasticidade; d) Modo de rotura dos provetes	51
Figura 41 - Caracterização do aço: a) Ensaio de tração uniaxial; b) Modo de rotura dos provetes	52
Figura 42 - Caracterização dos laminados de CFRP: a) ensaio de tração uniaxial; b) modo de rotura.....	52
Figura 43 - Adesivo epoxídico utilizado para colagem dos laminados de CFRP	53
Figura 44 - Posicionamento de uma laje pré-fendilhada na pista de pré-tensão	54
Figura 45 - Alguns dos procedimentos da aplicação do reforço à flexão de uma laje pré- fendilhada com laminados de CFRP pré-tensionados usando a técnica NSM	55
Figura 46 - Procedimentos da aplicação do reforço à flexão aplicando a técnica NSM: a) preparação do adesivo epoxídico e b) aplicação do adesivo epoxídico nos entalhes.....	56

Figura 47 - Aspeto final de uma laje pré-fendilhada e reforçada à flexão com laminados de CFRP inseridos e pré-tensionados	56
Figura 48 - Esquema geral do ensaio das lajes de betão armado	57
Figura 49 - Posição dos LVDT's nas lajes ensaiadas (dimensões em mm).....	58
Figura 50 - Instrumentação dos laminados de CFRP e dos varões de aço longitudinais.....	58
Figura 51 - Padrão de fendilhação das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 após a realização do ensaio de pré-fendilhação.....	60
Figura 52 - Padrão de fendilhação das lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 após a realização do ensaio de pré-fendilhação.....	61
Figura 53 - Aspeto final das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 após a execução do reforço...	61
Figura 54 - Aspeto final das lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 após a execução do reforço...	62
Figura 55 - Padrão de fendilhação da laje S2L-20-PC1 antes do ensaio de rotura e quando atinge a capacidade da carga máxima.....	63
Figura 56 - Padrão de fendilhação da laje S2L-20-PC2 antes do ensaio de rotura e quando atinge a capacidade da carga máxima.....	63
Figura 57 - Lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 após o ensaio à rotura e pormenor dos modos de rotura	64
Figura 58 - Padrão de fendilhação final registado para as lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2..	64
Figura 59 - Padrão de fendilhação da laje S2L-40-PC1 antes do ensaio de rotura e quando atinge a capacidade da carga máxima.....	66
Figura 60 - Padrão de fendilhação da laje S2L-40-PC2 antes do ensaio de rotura e quando atinge a capacidade da carga máxima.....	66
Figura 61 - Lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 após o ensaio à rotura e pormenor dos modos de rotura	66
Figura 62 - Padrão de fendilhação final registado para as lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2..	67
Figura 63 - Padrão de fendilhação final das lajes pré-fendilhados com o primeiro nível de dano e reforçadas com níveis de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20% e 40%.....	68
Figura 64 - Pormenor da deformação final das lajes ensaiadas (posição das lajes invertida) ..	68

Figura 65 - Padrão de fendilhação final das lajes pré-fendilhados com o segundo nível de dano e reforçadas com níveis de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20% e 40%	68
Figura 66 - Força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas no presente programa experimental: a) nível de dano 1; b) nível de dano 2.....	69
Figura 67 - Força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas no presente programa experimental: a) 20% de pré-tensão; b) 40% de pré-tensão	72
Figura 68 - Variação das extensões nos laminados de CFRP no ensaio à rotura	76
Figura 69 - Curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas no presente programa experimental e por Dias <i>et al.</i> (2014b).....	78
Figura 70 - Acréscimo da carga de serviço vs nível de pré-tensão no CFRP.....	81
Figura 71 - Acréscimo da carga máxima vs nível de pré-tensão no CFRP	82

Índice de tabelas

Tabela 1 - Principais resultados obtidos nos ensaios elaborados por Blaschko e Zilch (1999).	13
Tabela 2 - Resultados obtidos no programa experimental de Barros e Fortes (2005)	15
Tabela 3 - Principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas por Dias <i>et al.</i> (2012).....	17
Tabela 4 - Resultados obtidos nas lajes ensaiadas por Bonaldo <i>et al.</i> (2007)	20
Tabela 5 - Características das vigas e força máxima do ensaio de pré-fendilhação (Vieira, 2013)	22
Tabela 6 - Principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas (Vieira, 2013)	23
Tabela 7 - Informação das faixas de laje testadas por Dalfré e Barros (2013).....	26
Tabela 8 - Principais resultados obtidos no programa experimental de Dalfré e Barros (2013)	27
Tabela 9 - Resumo dos resultados obtidos por Barros e Gomes (2008).....	33
Tabela 10 - Resumo dos resultados obtidos nas vigas ensaiadas por El-Hacha e Gaafar (2011)	34
Tabela 11 - Principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas por Costa (2014).....	37
Tabela 12 - Compilação de resultados obtidos em termos de forças e flechas (Hosseini <i>et al.</i> , 2014).....	41
Tabela 13 - Reforço à flexão usando a técnica NSM com CFRP pré-esforçados - compilação de resultados experimentais.....	44
Tabela 14 - Informações gerais das lajes ensaiadas	49
Tabela 15 - Principais propriedades do betão, do aço, dos laminados de CFRP e do adesivo epoxídico	53
Tabela 16 - Dados referentes ao ensaio de pré-fendilhação	60
Tabela 17 - Principais resultados obtidos nas lajes ensaiadas com o primeiro nível de dano..	70

Tabela 18 - Principais resultados obtidos nas lajes ensaiadas com o segundo nível de dano..	70
Tabela 19 - Principais resultados obtidos nas lajes ensaiadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20%.....	73
Tabela 20 - Principais resultados obtidos nas lajes ensaiadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 40%.....	73
Tabela 21 - Valores máximos das extensões registadas nos extensómetros até as lajes alcançarem a sua capacidade de carga máxima	74
Tabela 22 - Extensões máximas registadas nos laminados de CFRP e grau de mobilização do CFRP	75
Tabela 23 - Efeito da pré-fendilhação na eficácia do reforço à flexão com laminados inseridos pré-tensionados	79

Capítulo 1

Introdução

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A crescente consciencialização para os problemas ambientais e económicos com que a sociedade global se debate levou à profunda mudança de mentalidade da comunidade dos dias de hoje. Como tal, procura-se hoje reabilitar e reforçar estruturas de betão existentes em vez de permanentemente se pensar em investir em construções novas.

Nas duas últimas décadas tem-se trabalhado nesse sentido e daí o surgimento de novos materiais compósitos e técnicas de reforço, associadas a estes, que proporcionaram novas soluções de reforço e reabilitação de estruturas de betão armado, em alternativa às técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas (adição de chapas metálicas, encamisamento das seções, aplicação de pré-esforço exterior). Os materiais compósitos, anteriormente referidos, são os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP - *Carbon Fibre Reinforced Polymer*). Estes, caracterizam-se por apresentarem reduzido peso específico, elevados valores de resistência à tração e módulo de elasticidade, e são materiais com elevada resistência à corrosão.

Neste contexto, o reforço de estruturas de betão armado com compósitos de CFRP, pode ser realizado recorrendo à técnica de colagem externa (EBR - *Externally Bonded Reinforcement*) ou à técnica de inserção (NSM - *Near Surface Mounted*). No âmbito do reforço à flexão de estruturas de betão armado com CFRP, os estudos experimentais já realizados permitem concluir que a técnica NSM é mais eficiente do que a técnica EBR, pois permite maior mobilização da elevada capacidade resistente dos CFRP devido ao maior grau de fixação que confere ao reforço (duplicação da área de colagem). Além disso, pelo facto do reforço estar inserido no betão de recobrimento, a técnica NSM garante maior proteção dos CFRP à exposição ambiental, à ação do fogo e a atos de vandalismo e, proporciona um menor impacto nas estruturas em termos estéticos.

A aplicação de compósitos de CFRP inseridos (técnica NSM) sem qualquer pré-tensão (reforço passivo) no reforço à flexão permite aumentar significativamente a capacidade de carga máxima dos elementos estruturais de betão armado. Contudo, para níveis de deformação correspondentes a estados limites de serviço, o grau de eficácia do reforço em termos do acréscimo de capacidade de carga não é tão significativo. Para se conseguir contornar o menor

desempenho da técnica NSM com CFRP em condições de serviço, o sistema de reforço deverá ser ativo em vez de ser passivo, isto é, deve-se proceder à aplicação de uma pré-tensão nos compósitos de CFRP. A aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados contribui para aumentar significativamente a capacidade de carga dos elementos, quer da carga de serviço quer da carga máxima, pois a sua elevada resistência à tração é utilizada de forma mais eficaz.

Na maioria dos casos, o reforço de estruturas de betão armado envolve betão em estado fendilhado. Assim, torna-se necessário analisar o efeito da pré-fendilhação do betão no comportamento de estruturas de betão armado quando reforçadas com uma determinada técnica de reforço.

De forma a avaliar, em conjunto, o efeito do nível de pré-fendilhação do betão e do nível de pré-tensão do CFRP no âmbito do reforço à flexão de estruturas de betão armado aplicando a técnica NSM, foi estabelecido um plano de trabalho no contexto da presente dissertação que terá como objeto de estudo o comportamento estrutural de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados, em que o betão se apresenta fendilhado na altura do reforço.

1.2. OBJETIVOS DE TRABALHO

O desenvolvimento da presente dissertação pretende, no âmbito da análise da viabilidade da aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço de estruturas de betão armado, avaliar experimentalmente o efeito da pré-fendilhação do betão no comportamento de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados. Assim sendo, os objetivos definidos para a presente dissertação foram os seguintes:

- Avaliar a eficácia da técnica da inserção de laminados de CFRP pré-tensionados 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 pré-tensão aplicado nos laminados de CFRP, no comportamento de lajes de betão armado reforçadas à flexão com a técnica NSM, que apresentam um determinado padrão de fendilhação previamente à aplicação do reforço de CFRP;
- Avaliar o efeito do nível de dano (nível de pré-fendilhação) que as lajes de betão armado apresentam, no desempenho do reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados, 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 encontra-se dividida em cinco capítulos, incluindo a introdução, as considerações finais e as referências bibliográficas.

O Capítulo 1 (Introdução) engloba as considerações gerais, de forma a apresentar o tema a abordar, a descrição dos objetivos a serem alcançados com a realização desta dissertação e, por fim, a forma como se encontra estruturada a presente dissertação.

No Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) é apresentado, de uma forma resumida, o resultado do trabalho de pesquisa bibliográfica efetuado sobre a temática da presente dissertação. Numa primeira fase é realizado um enquadramento sobre a utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão, com destaque para os compósitos de CFRP. Posteriormente, são apresentadas as técnicas de reforço de estruturas de betão armado com compósitos de CFRP, com particular relevo para a técnica NSM. Numa fase seguinte, é abordado o reforço à flexão de vigas/lajes de betão armado com materiais compósitos de CFRP aplicados com a técnica NSM em que as referidas vigas/lajes apresentam algum dano antes da aplicação do reforço (pré-fendilhação). O capítulo termina, tendo como base a investigação experimental já realizada, com uma abordagem ao comportamento de elementos estruturais de betão armado reforçados à flexão com materiais compósitos de CFRP inseridos pré-tensionados.

No Capítulo 3 (Programa Experimental) é descrito, detalhadamente, o programa experimental executado no âmbito da presente dissertação. A estrutura do capítulo está dividida, essencialmente, em duas partes. Na primeira são apresentados os modelos de lajes ensaiados, as características dos materiais usados, a aplicação do reforço de CFRP nas lajes, o tipo de ensaios realizados e a instrumentação instalada nas lajes. A segunda parte do capítulo é dedicada à apresentação e discussão dos resultados obtidos no programa experimental. Estes resultados serão comparados com os que foram alcançados por Dias *et al.* (2014b) que testaram lajes semelhantes às ensaiadas no âmbito do presente programa experimental com a diferença de não existir pré-fendilhação das lajes antes da execução do reforço.

O Capítulo 4 (Considerações Finais) está dividido em duas seções: na primeira descreve-se as principais conclusões da investigação realizada no âmbito da presente dissertação; na segunda são indicadas algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

A presente dissertação termina com o Capítulo 5 (Referências Bibliográficas) onde estão indicadas as referências bibliográficas que foram o suporte do trabalho de investigação desenvolvido.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo resulta da pesquisa bibliográfica realizada no âmbito da temática da presente dissertação. Numa primeira fase, é realizado um enquadramento sobre a utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão, com destaque para os compósitos de CFRP (Polímeros reforçados com fibras de carbono). Posteriormente, são apresentadas as técnicas de reforço de estruturas de betão armado com compósitos de CFRP, com particular relevo para a técnica da inserção do CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento, técnica designada na literatura internacional por NSM (*Near Surface Mounted*). Neste contexto, será abordado o reforço de elementos estruturais de betão armado com compósitos de CFRP aplicados com a técnica NSM em que os referidos elementos apresentam algum dano antes da aplicação do reforço (pré-fendilhação). O presente capítulo termina com uma abordagem ao comportamento de elementos estruturais de betão armado reforçados à flexão com compósitos de CFRP pré-tensionados, tendo como base investigação experimental já realizada.

2.1. COMPÓSITOS DE CFRP NO REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO

A necessidade crescente de reforçar estruturas de betão armado motivou o desenvolvimento de novas técnicas de reforço que incorporem novos materiais que sejam capazes de corresponder às necessidades existentes de forma eficaz e duradora. De entre estes novos materiais, destacam-se os FRP (Polímeros reforçados com fibras).

Os FRP's são constituídos por fibras (responsáveis pela resistência e rigidez do compósito) embebidas numa matriz polimérica (responsável por aglutinar as fibras de reforço e por protegê-las de condições adversas atuantes no meio) - resina termoendurecíveis, do tipo epóxi.

Existem vários tipos de fibras disponíveis, cada uma delas com características específicas no que diz respeito às suas dimensões, características mecânicas, durabilidade, resistência química, etc. Neste contexto destacam-se três tipos de fibras como sendo as mais comuns em sistemas de reforço de estruturas: as fibras de aramida (A), de vidro (G) e de carbono (C), na qual os respetivos compósitos são denominados por AFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida), GFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro) e CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono).

Na Figura 1 apresenta-se o diagrama de comportamento tensão vs extensão de diferentes tipos de fibra (carbono, vidro e aramida), entre elas o desempenho de fibras de carbono de elevado módulo de elasticidade (HM) e das fibras de carbono de elevada resistência (HS), dos cordões de aço de armadura de pré-esforço e do aço convencional tipo A500. A análise desta figura permite verificar que as fibras dos FRP apresentam um comportamento frágil, ou seja, um comportamento linear elástico até à rotura, em contraste com o comportamento dúctil do aço das armaduras de pré-esforço e do aço A500.

Da análise da Figura 1 é possível constatar o melhor desempenho das fibras de carbono em relação às fibras de aramida e de vidro, pois exibem melhores propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência à tração). Além disso, as fibras de carbono possuem uma maior resistência à ação de agentes químicos e ambientais, são imunes à corrosão, não absorvem água e o seu baixo peso específico facilita o seu transporte e a operação de execução do reforço (Dias, 2008).

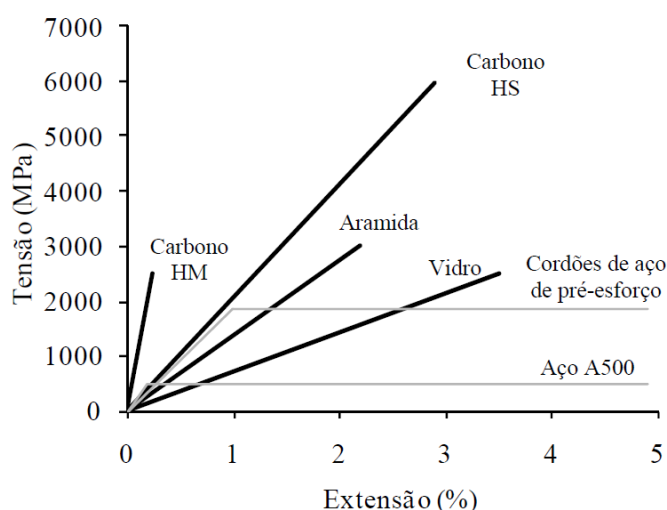


Figura 1 - Diagrama tensão vs extensão de distintos tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço (Barros, 2007).

As várias vantagens das fibras de carbono, em relação às fibras de aramida e de vidro, justificam o facto de serem as mais utilizadas no reforço de estruturas de betão recorrendo a materiais compósitos. A investigação realizada no âmbito da presente revisão bibliográfica centrou-se, fundamentalmente, nos materiais compósitos com fibras de carbono (CFRP).

Os sistemas *pré-fabricados* (varões - Figura 2a) e laminados - Figura 2b)) e os sistemas curados “*in situ*” (mantas no caso dos sistemas unidireccionais - Figura 2c) e tecidos no caso de sistemas multidireccionais - Figura 2d)) são os sistemas de reforço com CFRP frequentemente utilizados no reforço de estruturas de betão armado (Dias, 2008).

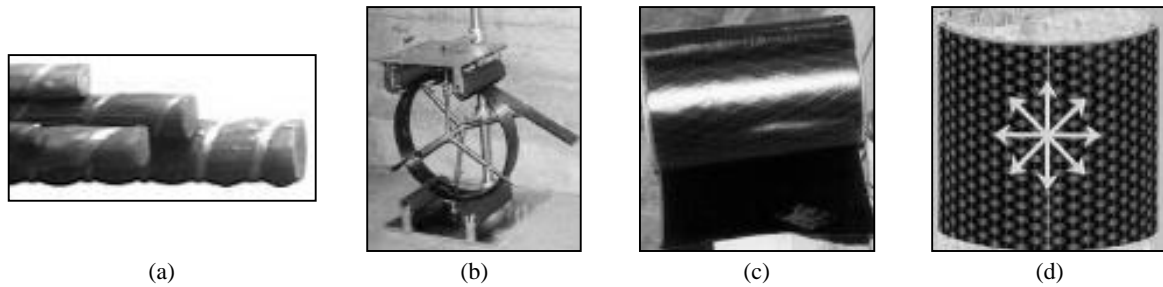


Figura 2 - Materiais compósitos de CFRP: a) varão (Filho, 2005); b) laminado (Juvandes, 2011); c) manta (Dias, 2008) e d) tecido (Dias, 2008).

Os compósitos de CFRP, para além, de apresentarem propriedades mecânicas (resistência e rigidez) muitíssimo superiores aos materiais convencionais caracterizam-se por serem leves e por conseguinte as técnicas de reforço com FRP, quando comparadas com as soluções de reforço tradicionalmente utilizadas, são de fácil e rápida aplicação e não proporcionam substancial adição de peso próprio da estrutura.

2.2. TÉCNICAS DE REFORÇO COM COMPÓSITOS DE CFRP

O reforço de elementos de betão armado usando compósitos de CFRP pode ser aplicado recorrendo às seguintes técnicas: a da colagem externa do reforço de CFRP, designada internacionalmente por técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), e a da inserção do CFRP (varões ou laminados) em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM).

2.2.1. Técnica de colagem externa (EBR)

A técnica de colagem externa com compósitos de CFRP consiste na colagem do CFRP nas faces exteriores do elemento estrutural a reforçar, de acordo com o tipo de reforço que se pretende concretizar: para aumentar o confinamento dos pilares efetua-se o encamisamento da seção do pilar (Figura 3a)), na face tensionada no caso do reforço à flexão (Figura 3b)) e nas faces laterais (com hipótese de se poder estender para outras faces) no caso do reforço ao corte (Figura 3c)).

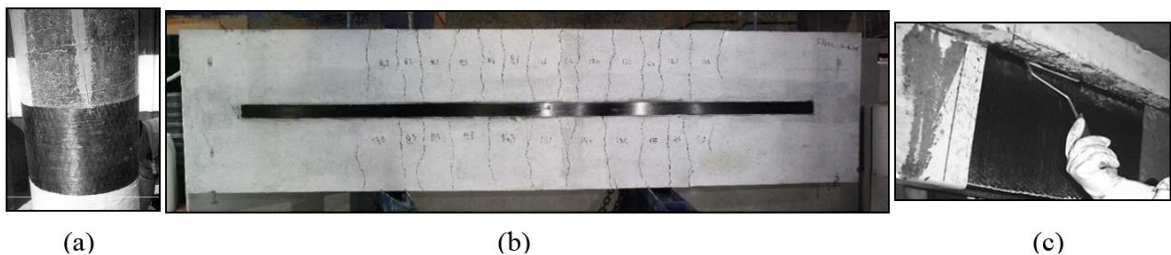


Figura 3 - Aplicação da técnica EBR com CFRP: a) no confinamento de pilares (Appleton e Costa, 2012); b) no reforço à flexão (Teixeira *et al.*, 2014); c) no reforço ao corte (Barros, 2004).

A aplicação dos sistemas compósitos de CFRP recorrendo à técnica EBR envolve essencialmente três tarefas (Juvandes *et al.*, 2003):

- i) a preparação da superfície consoante o sistema utilizado, designadamente, no caso do sistema curado *in situ* (mantas ou tecidos) a superfície deve ser esmerilada (Figura 4a)), enquanto que no caso do sistema pré-fabricado (laminados) a superfície deve ser boiardada com jato de areia ou ser “picotada” com martelo de agulhas (Figura 4b)). Esta preparação é efetuada de forma a garantir que a base tenha boas condições de aderência. Posteriormente, deve-se proceder à limpeza da superfície aplicando ar comprimido. Em alguns sistemas de reforço disponíveis no mercado é ainda recomendada a aplicação de uma camada primário (Figura 4c)).
- ii) a colagem propriamente dita do reforço (Figura 4d) no caso de manta e Figura 4e) no caso de laminado).
- iii) e o controlo da qualidade dos materiais utilizados, assim como, da qualidade da execução do reforço.



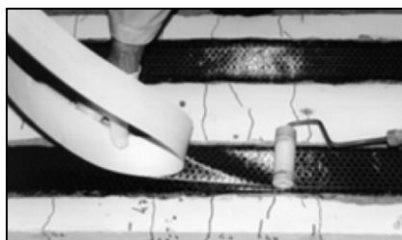
a) Preparação da superfície (manta)



b) Preparação da superfície (laminado)



c) Aplicação do primário



d) Colagem da manta



e) Colagem do laminado

Figura 4 - Sistemas de reforço de CFRP aplicados com a técnica da colagem externa (Dias, 2001).

Numa intervenção de reforço aplicando a técnica EBR deve ser garantido um controlo de qualidade, quer nos procedimentos de reforço como dos materiais aplicados. Assim sendo, na Figura 5 apresenta-se um organigrama que resume os procedimentos fundamentais numa intervenção de reforço com CFRP utilizando a técnica de colagem externa (EBR).

A aplicação da técnica EBR com compósitos de CFRP no reforço de elementos estruturais de betão armado apresenta vantagens, destacando-se a simples e rápida execução do reforço e o facto de proporcionar aumentos consideráveis no desempenho estrutural dos elementos

reforçados. No entanto, à técnica EBR estão associados alguns aspetos menos positivos. Desde logo, os baixos níveis de rendimento do CFRP alcançados, motivados pela ocorrência frequente de modos de rotura prematuros (descolamento/destacamento do CFRP), o que torna a técnica menos atrativa do ponto de vista económico. Além disto, o facto dos CFRP serem colados externamente ao elemento, faz com que fiquem diretamente expostos às condições ambientais adversas, à ação ao fogo e a eventuais atos vandalismo.

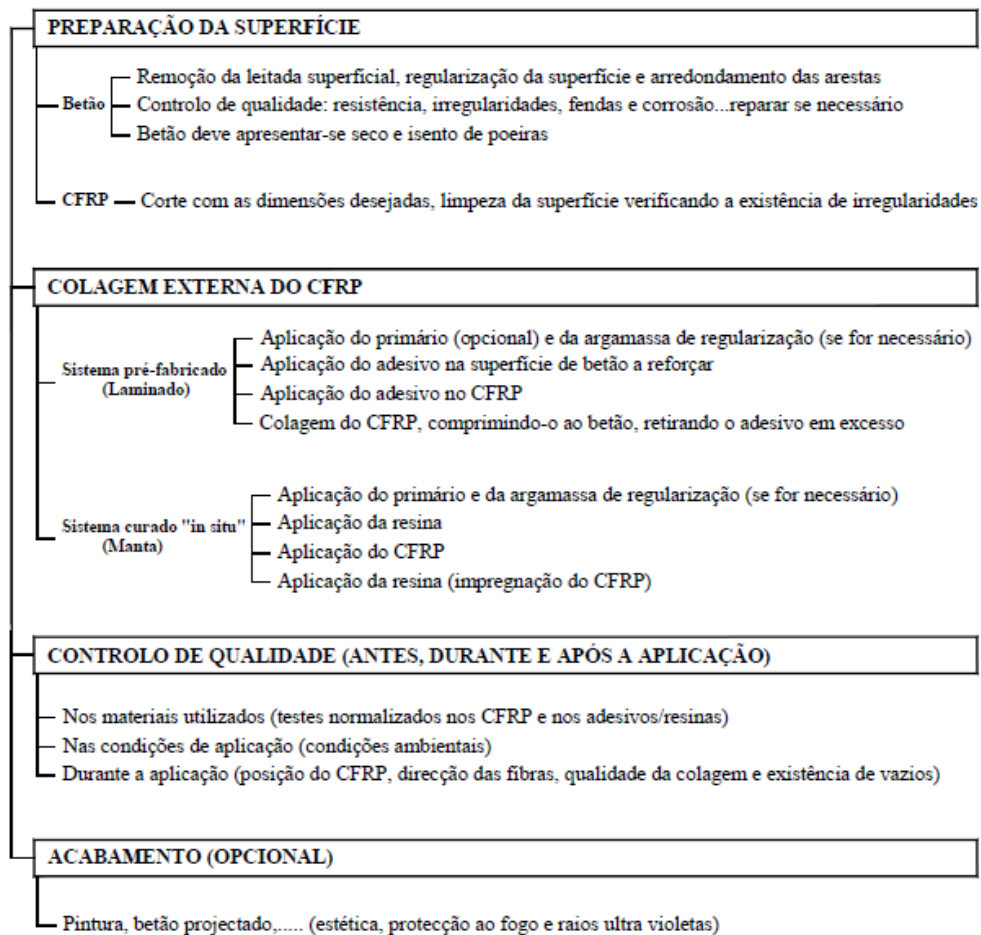


Figura 5 - Aplicação da técnica da colagem externa e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias *et al.*, 2006).

2.2.2. Técnica de inserção (NSM)

Como resposta a algumas das lacunas evidenciadas pela técnica EBR, surgiu mais recentemente a técnica de reforço NSM com compósitos de CFRP que se baseia na inserção do CFRP em entalhes executados nos elementos a reforçar, sendo que em estruturas de betão armado estes entalhes de pequena dimensão são efetuados no betão de recobrimento (Sena-Cruz, 2008). O material responsável pela transferência de tensões entre o elemento a reforçar e o CFRP é habitualmente um adesivo epoxídico. A Figura 6 ilustra da aplicação da técnica NSM no reforço à flexão com laminados de CFRP.



Figura 6 - Reforço à flexão com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM (Sena-Cruz, 2011).

A técnica de reforço NSM pode ser aplicada usando várias formas de CFRP em termos de seção transversal: varões de seção circular ou de seção quadrada e laminados de CFRP (uma das dimensões da seção transversal é bastante menor que a outra). A decisão sobre a utilização de varões de CFRP no reforço de estruturas de betão armado deve ter em conta que: i) podem existir dificuldades na execução dos entalhes com os equipamentos de corte disponíveis no mercado, atendendo à dimensão que os entalhes devem ter por forma a que os varões possam ser inseridos; ii) à solução com laminados de CFRP estar associada uma zona de ligação ao betão mais uniforme que no caso dos varões de CFRP, o que tem consequência em termos do comportamento da ligação betão-adesivo-CFRP.

El-Hacha e Rizkalla (2004) compararam dois tipos de soluções de reforço de CFRP aplicados com a técnica de inserção (NSM): laminados e varões. No programa experimental, a rigidez axial $(EA)_{FRP}$ das soluções de reforço de CFRP foi a mesma, por isso, o comportamento força vs deformação de todas as vigas reforçadas era previsto serem idênticos. Os referidos autores concluíram que a solução com laminados foi mais eficaz, dado que houve o máximo aproveitamento do CFRP, enquanto no caso da solução com varões ocorreu o descolamento/deslizamento do CFRP (rotura prematura). O menor desempenho da solução de varões deveu-se, fundamentalmente, ao facto da área de colagem do varão de CFRP ser baixa, comparativamente com a área de colagem do laminado. Estas constatações permitem concluir que, a utilização de laminado de CFRP é a mais indicada em termos de potenciar o máximo rendimento do CFRP.

Na Figura 7 apresenta-se a título de exemplo uma intervenção de reforço à flexão de uma viga de betão armado com laminados de CFRP inseridos. Os procedimentos seguidos na referida intervenção foram:

- execução dos entalhes no elemento a reforçar (Figura 7a));
- limpeza dos entalhes com jato de ar-comprimido (Figura 7b));
- corte dos laminados de CFRP (Figura 7c)) e limpeza dos mesmos com acetona (Figura 7d));

- produção do adesivo epoxídico segundo as recomendações do fabricante (Figura 7e));
- preenchimento dos entalhes com o adesivo (Figura 7f));
- aplicação do adesivo nas faces do laminado de CFRP (Figura 7g));
- inserção do CFRP no entalhe e remoção do adesivo em excesso (Figura 7h)).

A Figura 8 apresenta um organigrama que regista, resumidamente, os passos fundamentais numa intervenção de reforço com compósitos de CFRP utilizando a técnica da inserção (NSM). Tal como acontece com a técnica EBR, numa intervenção de reforço aplicando a técnica NSM deve ser garantido um controlo de qualidade, quer nos procedimentos de reforço como dos materiais aplicados.

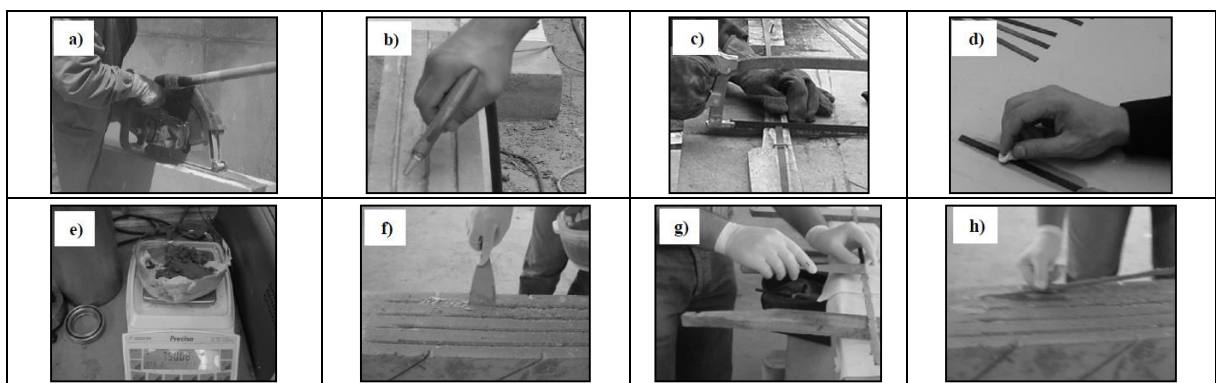


Figura 7 - Aplicação de um reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos (Dias, 2008).

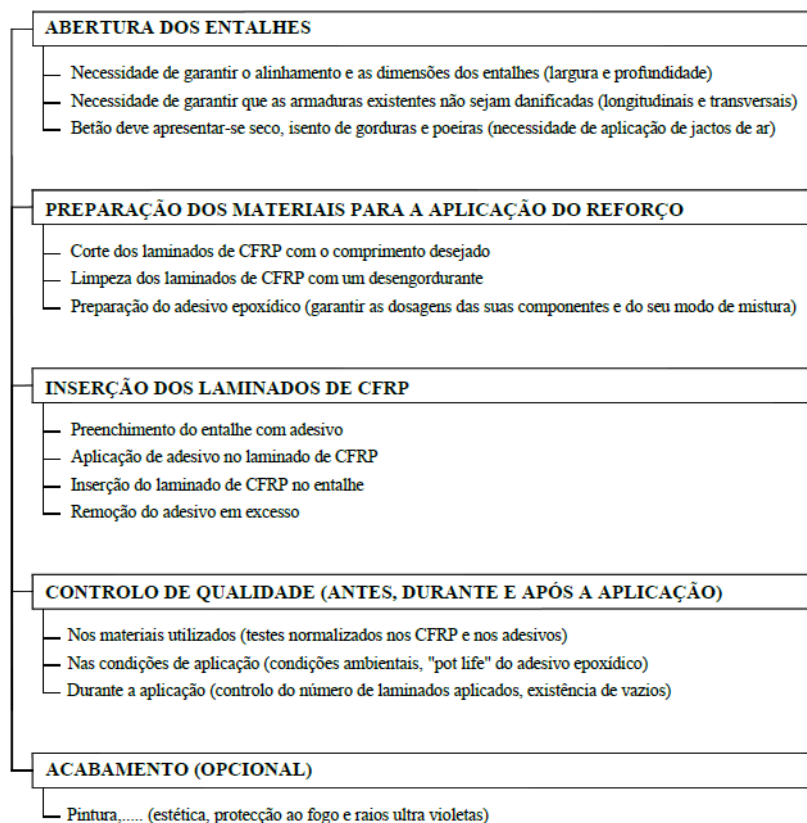


Figura 8 - Técnica NSM e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias, 2008).

2.2.3. Comparação entre as técnicas EBR e NSM

Nesta seção é feita uma análise comparativa das técnicas de reforço EBR e NSM com compósitos de CFRP. A técnica de inserção do CFRP, relativamente à técnica EBR, é de mais fácil aplicação pois não requer qualquer preparação da superfície, havendo apenas a necessidade de executar os entalhes no betão de recobrimento. Além disso, a técnica NSM garante uma maior proteção dos laminados de CFRP face à exposição ambiental, à ação do fogo e a atos de vandalismo.

A comparação entre as duas técnicas de reforço, em termos de desempenho estrutural do CFRP, é mais perceptível quando se compara a área de colagem do mesmo reforço em ambas as técnicas (Figura 9). Com efeito, a área de colagem do laminado na técnica NSM é o dobro da oferecida pela técnica EBR proporcionando assim um grau de fixação do CFRP ao betão mais elevado. Consequentemente, existe uma mobilização de tensões mais elevadas no CFRP aquando da rotura do elemento reforçado, o que permite um melhor aproveitamento das elevadas potencialidades do CFRP (Dias, 2008). Assim, na técnica NSM, em comparação à técnica EBR, a descolagem do CFRP é retardada ou mesmo evitada, proporcionando níveis de extensão do CFRP mais elevados e, conseqüentemente, maiores acréscimos de capacidade de carga dos elementos reforçados.

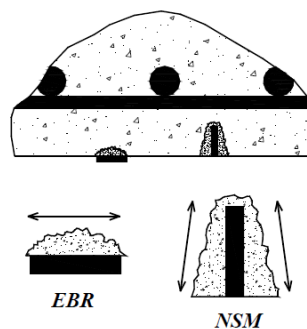


Figura 9 - Grau de ancoragem do CFRP conferido pelas técnicas EBR e NSM (Dias, 2008).

As várias mais-valias que se enunciaram em relação à técnica NSM fazem com que seja em muitos casos uma alternativa viável à técnica EBR. Ao longo dos anos foram elaborados trabalhos experimentais que comprovam a maior eficácia da técnica NSM em relação à técnica EBR em termos de reforço à flexão (Blaschko e Zilch, 1999; El-Hacha e Rizkalla, 2004; Barros *et al.*, 2005).

Blaschko e Zilch (1999) efetuaram um programa experimental pioneiro onde compararam a eficácia das técnicas EBR e NSM, ambas com laminados de CFRP, quando aplicadas no reforço à flexão de elementos estruturais de betão armado. O programa experimental consistiu no ensaio

à flexão em três pontos de carga de duas lajes (A1 e A2 com seção transversal com dimensões $350 \times 150 \text{ mm}^2$) e duas vigas (B1 e B2 com seção transversal com dimensões $150 \times 350 \text{ mm}^2$). Os quatro modelos anteriormente referidos, todos eles com um vão de 3000 mm e com betão de classe C20/25, foram reforçados à flexão com laminados de CFRP: os modelos A1 e B1 foram reforçados usando a técnica EBR e os modelos A2 e B2 foram reforçados usando a técnica NSM (Tabela 1).

Na Figura 10 são apresentadas as curvas de comportamento momento fletor vs deslocamento a meio-vão dos elementos estruturais ensaiados por Blaschko e Zilch (1999). A Tabela 1 apresenta os principais resultados obtidos no programa experimental onde é possível observar que a técnica NSM proporcionou, quer nas lajes como nas vigas, valores mais elevados de capacidade máxima de carga e de deformação do que os proporcionados pela técnica EBR. Com efeito, com a técnica NSM foi possível alcançar o dobro da capacidade de carga verificada nas correspondentes vigas/lajes reforçadas com a técnica EBR.

Tabela 1 - Principais resultados obtidos nos ensaios elaborados por Blaschko e Zilch (1999).

Modelo	Armadura	Reforço de CFRP		Máximo momento fletor resistente (kN.m)	Modo de rotura
		Técnica	Quantidade		
A1	3Ø6 mm (tração)	EBR	1 laminado com seção de $1.2 \times 50 \text{ mm}^2$	12	Destacamento do CFRP
A2		NSM	2 laminados com seção de $1.2 \times 25 \text{ mm}^2$	26	Rotura do CFRP
B1	2Ø6 mm (tração)	EBR	1 laminado com seção de $1.2 \times 50 \text{ mm}^2$	26	Destacamento do CFRP
B2		NSM	2 laminados com seção de $1.2 \times 25 \text{ mm}^2$	52	Rotura por corte

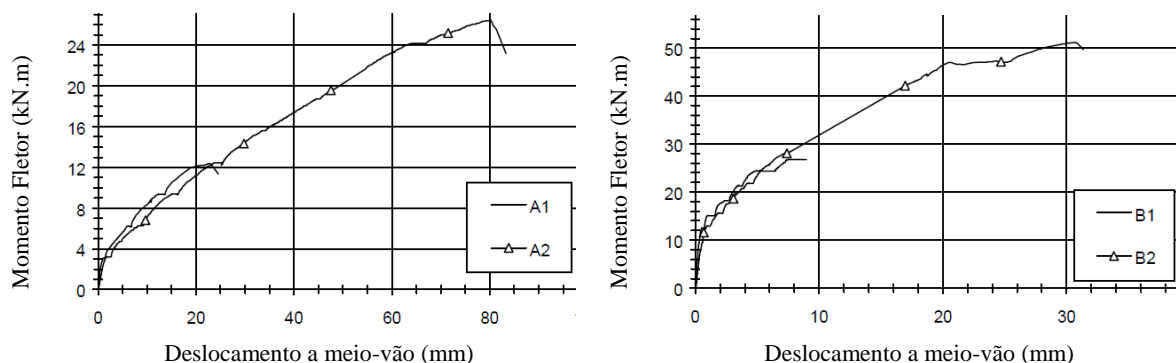


Figura 10 - Resultados dos ensaios realizados por Blaschko e Zilch (1999).

El-Hacha e Rizkalla (2004) elaboraram um programa experimental para comparar a eficácia da técnica EBR e NSM aplicando laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas em T de betão

armado. Dos resultados obtidos, verificou-se que a aplicação do mesmo tipo de solução de reforço (laminado de CFRP com $2 \times 16 \text{ mm}^2$ de seção transversal), em ambas as técnicas, proporcionou diferentes aumentos da capacidade máxima de carga nas vigas, relativamente à viga de referência. Com efeito, a aplicação do laminado com a técnica NSM proporcionou um aumento de 79.2% enquanto com a técnica EBR apenas se verificou um aumento de 16.6%.

Barros *et al.* (2005), a partir do programa experimental elaborado, compararam o grau de eficácia da técnica NSM, com laminados de CFRP, com o proporcionado com a técnica EBR usando laminados de CFRP ou mantas de CFRP. Neste programa foram ensaiadas, à flexão, três séries de vigas em betão armado (S1, S2 e S3), que se distinguíam pela quantidade de armadura longitudinal e pela solução de reforço à flexão com CFRP adotada. Barros *et al.* (2005) constataram que as vigas reforçadas com laminados inseridos (técnica NSM), independentemente da série de vigas testadas (S1, S2 e S3), apresentaram valores de carga de rotura mais elevados (79.9 kN, 93.3 kN e 96.6 kN, respetivamente) do que as vigas reforçadas com a técnica EBR (mantas - 43.0 kN, 79.5 kN e 87.3 kN, respetivamente e laminados de CFRP - 38.6 kN, 83.5 kN e 86.5 kN, respetivamente).

2.3. COMPORTAMENTO DE ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO REFORÇADOS À FLEXÃO COM LAMINADOS DE CFRP INSERIDOS

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos experimentais que permitem compreender o comportamento de elementos de betão armado reforçados à flexão com laminados de CFRP inseridos.

Barros e Fortes (2005) usaram a técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado por forma a duplicar a sua capacidade de carga máxima. Para este estudo, oito vigas, divididas em quatro séries (S1, S2, S3 e S4), foram ensaiadas à flexão em quatro pontos de carga de acordo com Figura 11. Nesta figura apresenta-se, para cada série, a geometria, as armaduras existentes, a posição e quantidade de laminados de CFRP. Na Tabela 2 apresenta-se as características dos materiais utilizados (a resistência à compressão do betão (f_{cm}), a quantidade e dimensões dos laminados de CFRP) e os resultados obtidos no programa experimental em termos de: carga de início de fendilhação (F_{cr}), carga de serviço (F_{serv} - carga definida pelos autores como sendo a carga correspondente a uma flecha a meio-vão de $L/400 = 3.75 \text{ mm}$, em que L é o vão da viga), carga de cedência de armaduras (F_{sy}), carga máxima (F_{max}), extensão máxima no CFRP (ϵ_{CFRP}^{max}) e modos de rotura observados nas vigas ensaiadas.

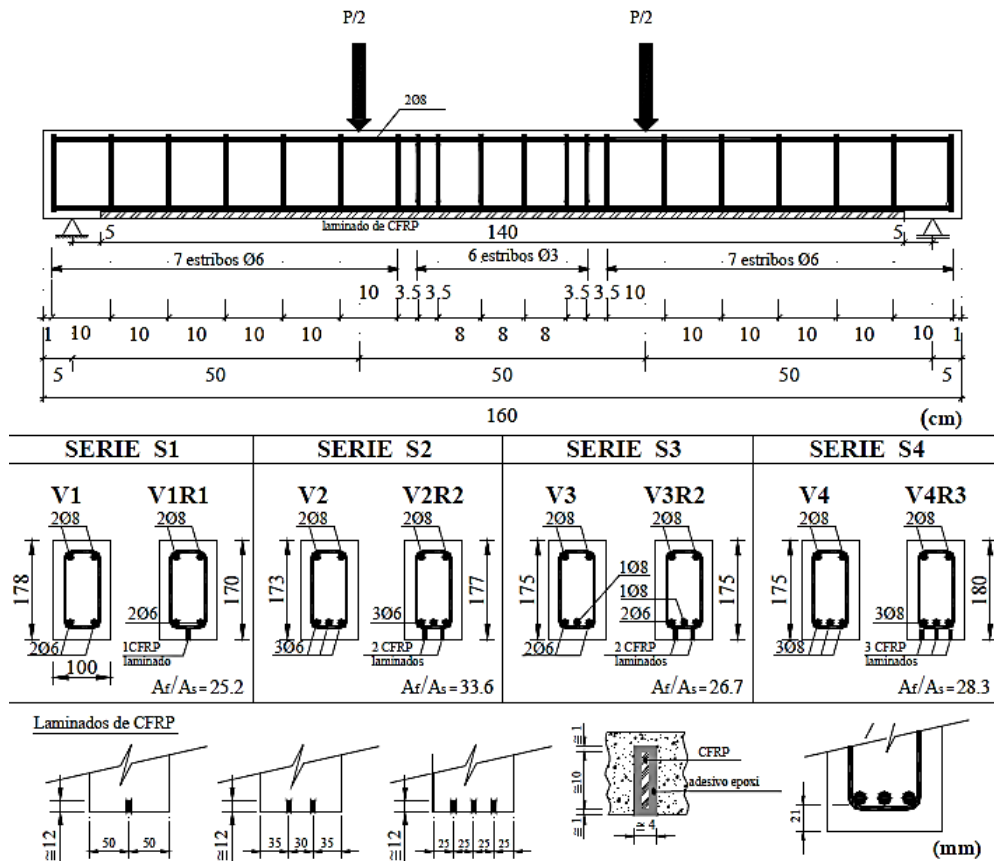


Figura 11 - Configuração e detalhes das vigas ensaiadas por Barros e Fortes (2005).

Tabela 2 - Resultados obtidos no programa experimental de Barros e Fortes (2005).

Série	Viga	f_{cm} (MPa)	Laminados	F_{cr} (kN)	F_{serv} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	ϵ_{CFRP}^{max} (%)	Modo de rotura
S1	V1	46.1	1 laminado com seção de	8.5	18.6	24.5	28.2	----	(1)
	V1R1		1.45×9.59 mm ²	10.7 (26%)	22.7 (22%)	32.31 (32%)	50.3 (78%)	15.5	(2)
S2	V2		2 laminados com seção de	8.1	21.7	37.5	41.0	----	(1)
	V2R2		1.45×9.59 mm ²	12.3 (52%)	31.4 (45%)	52.28 (39%)	78.5 (91%)	12.8	(2)
S3	V3		2 laminados com seção de	7.9	23.8	40.0	41.3	----	(1)
	V3R2		1.45×9.59 mm ²	11.9 (51%)	32.8 (38%)	54.52 (36%)	81.9 (98%)	12.8	(2)
S4	V4		3 laminados com seção de	8.1	32.3	46.9	48.5	----	(1)
	V4R3		1.45×9.59 mm ²	14.1 (74%)	40.4 (25%)	69.11 (47%)	94.9 (96%)	10.6	(2)

Valor (Variação em relação à viga de referência de cada série); (1) Rotura por flexão; (2) Esmagamento do betão.

Na Figura 12 apresenta, a título de exemplo, os diagramas força vs deslocamento a meio-vão para a viga reforçada (V2R2) e para a respetiva viga de referência (V2). A viga reforçada à flexão com CFRP apresenta uma curva de comportamento típica de um elemento fletido com reforço à flexão com CFRP, onde é possível identificar quatro estados de comportamento: a fase de betão não fendilhado (até ao início de fendilhação do betão), a fase de betão fendilhado

com aço não plastificado (entre o início da fendilhação do betão e a cedência das armaduras longitudinais), a fase de betão fendilhado, após a cedência das armaduras do aço e a fase em que a viga atinge a sua capacidade de carga máxima.

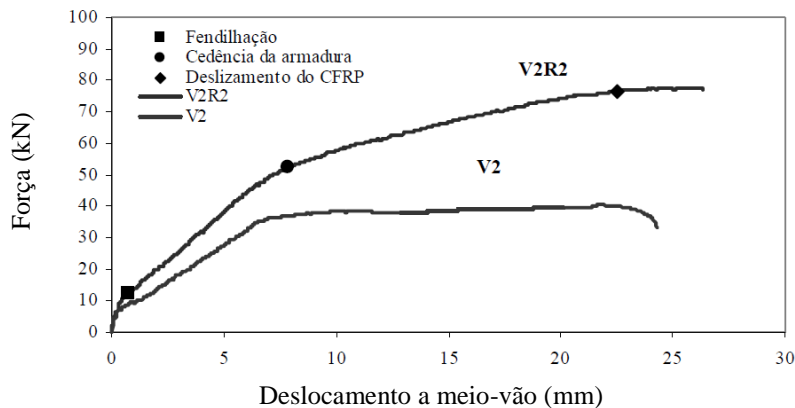


Figura 12 - Relação força vs deslocamento a meio-vão de vigas ensaiadas por Barros e Fortes (2005).

O objetivo de Barros e Fortes (2005) em duplicar a capacidade máxima de carga (F_{max}) das vigas de betão armado utilizando a técnica NSM com laminados de CFRP foi atingido tendo-se verificado um aumento médio de 91% na carga de rotura das vigas reforçadas quando se aplicou a técnica de NSM. A técnica NSM possibilitou acréscimos significativos da carga de início de fendilhação (F_{cr}), entre os 26% e 74%. Para a carga de serviço (F_{serv}), registaram-se aumentos nas vigas reforçadas, que variaram entre os 22% e os 45%. Relativamente à carga correspondente ao início da cedência das armaduras de aço (F_{sy}) foram registados aumentos entre os 32% e os 47%. As extensões nos laminados de CFRP (ϵ_{CFRP}^{max}) variaram entre 10.6% e 15.5%, correspondendo, respetivamente, a 62% a 91% da sua extensão última ($\epsilon_{CFRP}^{última}=17\%$), o que demonstra que a técnica NSM permite a mobilização de níveis de aproveitamento do reforço de CFRP muito próximos da resistência última à tração deste material compósito.

Mais tarde, Dias *et al.* (2012) realizaram uma investigação experimental para analisar o comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM). O programa experimental englobou o ensaio de quatro vigas de betão armado: uma sem reforço (REF-M) e as três restantes (S1-M, S2-M e S3-M) distinguem-se pela quantidade de laminados utilizados no reforço, respetivamente, um laminado (S1-M), dois laminados (S2-M) e três laminados (S3-M). Os laminados que foram colocados nas S1-M, S2-M e S3-M tinham uma seção transversal com dimensões $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ e um comprimento de 2300 mm. As vigas testadas, cujo betão tinha um valor médio de resistência à compressão de 50.2 MPa, tinham uma seção transversal retangular com $150 \times 300 \text{ mm}^2$ e um comprimento de 2600 mm (Figura 13). As vigas continham

uma percentagem de armadura longitudinal de tração igual a 0.38% correspondentes a dois varões com 10 mm de diâmetro (2Ø10) e em termos de percentagem de reforço de CFRP (ρ_f), as vigas S1-M, S2-M e S3-M apresentavam percentagens de 0.03%, 0.06% e 0.09%, respetivamente.

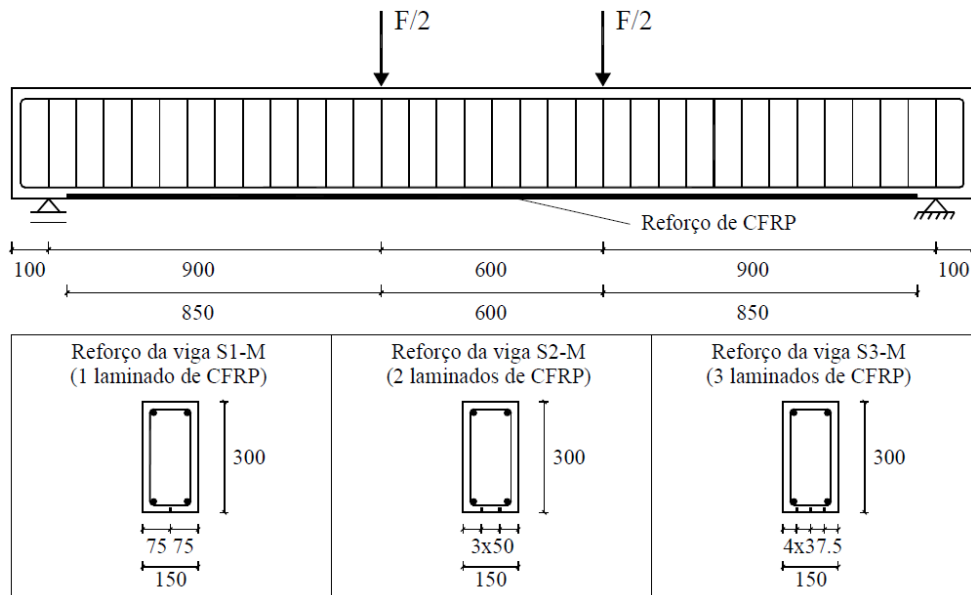


Figura 13 - Dados gerais sobre as vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012) (dimensões em mm).

Tabela 3 - Principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012).

Viga	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	$u_{F_{max}}$ (mm) ⁽¹⁾	ε_{CFRP}^{max} (‰)	Modo de rotura
REF-M	20.1	56.6	62.3	45.1	---	Esmagamento do betão
S1-M	21.0 (4.5%)	62.4 (10%)	88.4 (42%)	41.2 (91%)	17.9	Rotura do CFRP
S2-M	2.2 (10%)	69.5 (23%)	111.9 (80%)	43.6 (97%)	17.4	Destacamento do CFRP
S3-M	24.0 (19%)	76.0 (34%)	126.6 (103%)	38.9 (86%)	14.9	Destacamento do CFRP

⁽¹⁾ $u_{F_{max}}$ é a flecha a meio-vão correspondente à força F_{max} ; Valor (Variação em relação à viga REF-M).

Da Tabela 3 verifica-se que as soluções de reforço adotadas provocaram acréscimos da carga de início de fendilhação do betão que variaram entre os 4.5% (viga S1-M) e os 19% (viga S3-M). Relativamente à flecha a meio-vão associada à carga máxima das vigas ($u_{F_{max}}$) verificou-se que os valores alcançados pelas vigas reforçadas com CFRP foram ligeiramente inferiores ao obtido pela viga de referência REF-M (variaram entre os 86% (viga S3-M) e os 97% (viga S2-M) do valor de $u_{F_{max}}$ da viga REF-M). Em termos médios, o valor da extensão máxima registada no CFRP (ε_{CFRP}^{max}) foi de 16.7‰, o que correspondeu a um grau de mobilização médio do reforço de 93%, o que demonstram o elevado nível de aproveitamento do reforço de CFRP usando a técnica NSM.

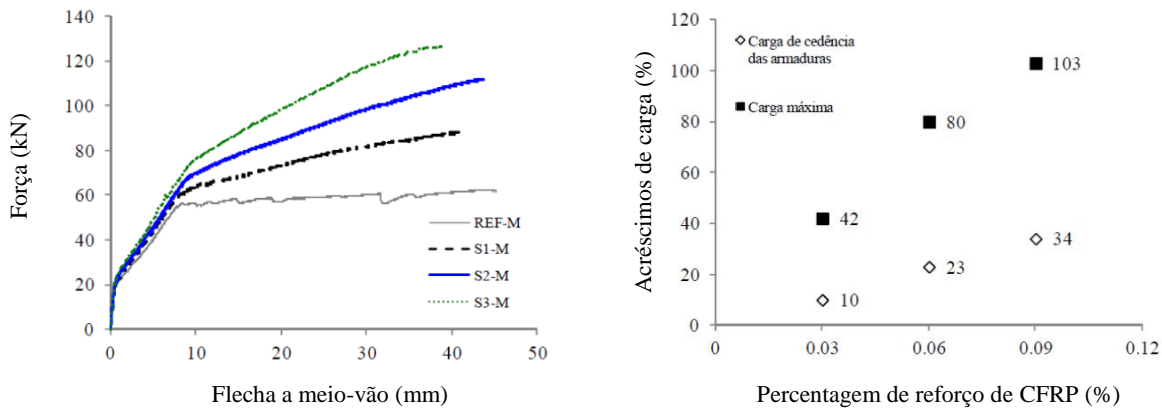


Figura 14 - a) Relação força vs flecha a meio-vão das vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012); b) Relação percentagem de CFRP vs acréscimos de carga das vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012).

A Figura 14a) apresenta o comportamento força vs flecha a meio-vão das vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012). Tendo como base o comportamento da viga de referência (REF-M) e independentemente da percentagem de reforço de CFRP das vigas S1-M, S2-M e S3-M, verifica-se que a presença dos laminados proporcionou aumentos de rigidez e de capacidade de carga na rotura. A Figura 14b) apresenta a relação entre a percentagem de reforço de CFRP e os acréscimos de carga verificados, em relação à viga REF-M, quer em termos da carga de cedência das armaduras (10% (viga S1-M), 23% (viga S2-M) e 34% (viga S3-M)) como da carga máxima (42% (viga S1-M), 80% (viga S2-M) e 103% (viga S3-M)). Assim, verifica-se que a viga reforçada com três laminados de CFRP permitiu a duplicação da capacidade de carga máxima da viga de referência REF-M. Os valores obtidos permitem concluir que os acréscimos de carga obtidos foram proporcionais à percentagem de reforço de CFRP, ou seja, maiores valores ρ_f maiores aumentos da capacidade resistente.

Bonaldo *et al.* (2007) aplicaram a técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão em faixas de laje de betão armado (Figura 15) com o objetivo de avaliar a influência da distância entre laminados de CFRP e, conseqüentemente, a percentagem de CFRP (ρ_f) e a classe de resistência do betão. O programa experimental consistiu, para cada tipo de classe de resistência do betão testado (C12/15, C35/45 e C50/60), no ensaio à flexão de cinco faixas de laje de betão armado: uma sem reforço de CFRP (laje S0) e quatro reforçadas com CFRP que se distinguiam pela percentagem de CFRP que continham (0.06% - 1 laminado de CFRP (laje S1), 0.13% - 2 laminados de CFRP (laje S2), 0.25% - 4 laminados de CFRP (laje S4) e 0.50% - 8 laminados de CFRP (laje S8)). Todas as lajes de betão armado testadas continham três varões de aço de 8 mm de diâmetro (3Ø8) enquanto que os laminados de CFRP adotados possuíam $1.4 \times 10.02 \text{ mm}^2$ de seção transversal.

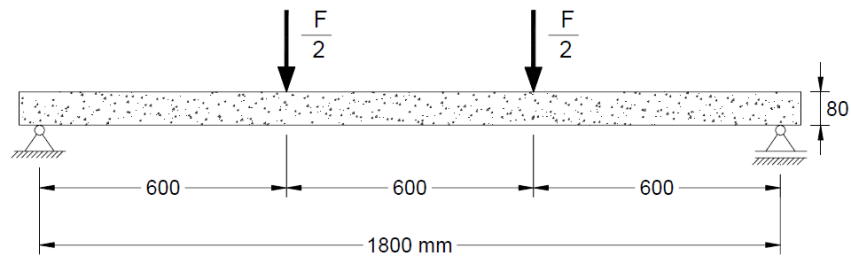


Figura 15 - Configuração das lajes ensaiadas por Bonaldo *et al.* (2007) (dimensões em mm).

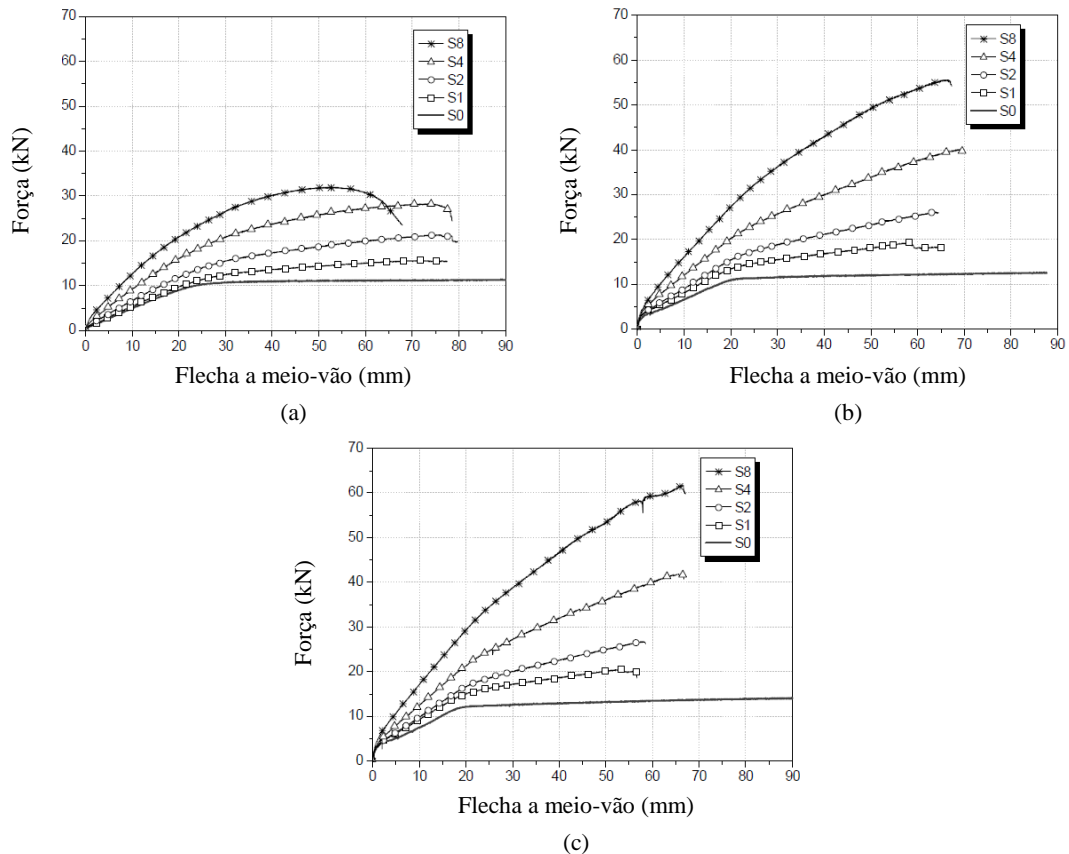


Figura 16 - Diagrama força vs flecha a meio-vão obtidos nos ensaios das lajes em função da classe de resistência do betão: a) C12/15; b) C35/45 e c) C50/60 (Bonaldo, 2008).

A Figura 16 apresenta os diagramas força vs flecha a meio-vão obtidos nos ensaios das lajes de cada uma das classes de resistência do betão (C12/15, C35/45, C50/60). Da Figura 16 observa-se que, independentemente da classe de resistência do betão em análise, o aumento da percentagem de CFRP (ρ_f) conferiu às lajes de betão armado um maior acréscimo em termos de carga de cedência das armaduras e de carga máxima.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no programa experimental de Bonaldo *et al.* (2007), onde se indica a carga máxima (F_{max}), a flecha a meio-vão associada à força máxima ($u_{F_{max}}$), a extensão máxima registada no CFRP (ϵ_{CFRP}^{max}) e os modos de rotura observados. A partir dos dados da Tabela 4 é possível observar que nas lajes de betão armado com betão de classe de resistência baixa (C12/15), o incremento em termos de capacidade de carga máxima da laje foi

limitado pelo esmagamento de betão. Contudo, verificou-se nas lajes S1, S2, S4 e S8, quando comparadas com a laje S0, um acréscimo de 36%, 91%, 145% e 200%, respetivamente. O incremento em termos de carga máxima para as percentagens de reforço $\rho_f = 0.06\%$ (S1), 0.13% (S2), 0.25% (S4) e 0.50% (S8) das lajes com C35/45 e C50/60 de classe de resistência no betão foi de 52%, 104%, 224% e 348% e de 37%, 87%, 180% e 313%, respetivamente.

De acordo com os valores da Tabela 4, os valores médios das extensões máximas no CFRP nas lajes com as classes de betão C12/15, C35/45 e C50/60 foram 9.1‰, 11.8‰ e 11.7‰, respetivamente.

Os modos de rotura observados e, conseqüentemente, o grau de eficácia do reforço de CFRP foram condicionados pela classe de resistência do betão. Para a classe C12/15, com a exceção das lajes S1 e S2, onde se registou a rotura do CFRP, o modo de rotura típico foi o esmagamento do betão. Para as classes de resistência C35/45 e C50/60, com a exceção das lajes correspondentes à máxima percentagem de CFRP (S8), o modo de rotura típico foi a rotura do CFRP. Com efeito, nas lajes S8 das classes de resistência C35/45 e C50/60 os modos de rotura foram o esmagamento do betão e a rotura por corte, respetivamente. Desta forma se conclui que com a maior percentagem de CFRP testada e independentemente do tipo de betão não foi alcançada a rotura do CFRP.

Tabela 4 - Resultados obtidos nas lajes ensaiadas por Bonaldo *et al.* (2007).

Classe de resistência do betão	Laje	F_{max} (kN) ⁽¹⁾	u_{Fmax} (mm) ⁽¹⁾	ε_{CFRP}^{max} (‰) ⁽²⁾	Modo de rotura
C12/15 ($f_{cm} = 19$ MPa)	S0	11	90	----	Flexão
	S1	15 (36%)	77	12	Rotura do CFRP
	S2	21 (91%)	78	10.5	Rotura do CFRP/ Esmagamento do betão
	S4	27 (145%)	78	8.75	Esmagamento do betão
	S8	33 (200%)	53	5	Esmagamento do betão
C35/45 ($f_{cm} = 42$ MPa)	S0	12.5	88	----	Flexão
	S1	19 (52%)	65	12	Rotura do CFRP
	S2	25.5 (104%)	63	12.5	Rotura do CFRP
	S4	40.5 (224%)	70	12.3	Rotura do CFRP
	S8	56 (348%)	67	10.4	Esmagamento do betão
C50/60 ($f_{cm} = 57$ MPa)	S0	15	90	----	Flexão
	S1	20.5 (37%)	57	11.5	Rotura do CFRP
	S2	28 (87%)	58	11.8	Rotura do CFRP
	S4	42 (108%)	67	13	Rotura do CFRP
	S8	62 (313%)	67	10.5	Rotura por corte

⁽¹⁾ Valores retirados diretamente dos gráficos da Figura 16; ⁽²⁾ Valores retirados diretamente dos gráficos disponíveis por Bonaldo *et al.* (2007).

A partir da investigação experimental realizada até ao momento, é possível verificar que a eficácia do reforço à flexão de elementos estruturais de betão armado aplicando a técnica NSM

com laminados de CFRP é condicionada pelos seguintes parâmetros: a geometria do elemento, a percentagem de armadura longitudinal, a percentagem de CFRP, a classe de resistência do betão, o tipo de carregamento, o espaçamento entre laminados adjacentes e a distância do laminado à face do elemento a reforçar (Barros *et al.*, 2007, Bonaldo *et al.*, 2007 e De Lorenzis e Teng, 2007).

2.4. REFORÇO À FLEXÃO COM LAMINADOS DE CFRP INSERIDOS EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO PRÉ-FENDILHADAS

A maioria das estruturas de betão armado que necessitam de reparação e reforço apresentam betão em estado fendilhado. Neste contexto, nesta seção será abordada a influência da pré-fendilhação do betão, no reforço à flexão de elementos estruturais de betão armado reforçados com laminados de CFRP inseridos, tendo como base investigação experimental já realizada.

2.4.1. Vigas de betão armado

Vieira (2013) avaliou experimentalmente o efeito da pré-fendilhação do betão, no comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos. No total foram ensaiadas cinco vigas de betão armado (semelhantes às testadas por Dias *et al.*, 2012): uma foi reforçada com um laminado de CFRP (viga S1-PC1, semelhante à viga S1-M da Figura 13), duas foram reforçadas com dois laminados (vigas S2-PC1 e S2-PC2, semelhantes à viga S2-M da Figura 13) e as restantes duas foram reforçadas com três laminados (vigas S3-PC1 e S3-PC3, semelhantes à viga S3-M da Figura 13).

Os modelos foram sujeitos, previamente à aplicação do reforço de CFRP, a ensaios à flexão em quatro pontos de carga (de acordo com o representado na Figura 13) com carregamento monotónico até um determinado nível de carga (Ensaio de pré-fendilhação). Por forma a avaliar o efeito do nível de dano na estrutura na eficácia da técnica de reforço em estudo foram analisados três níveis de dano, caracterizados pela força máxima imposta no ensaio de pré-fendilhação. Após a pré-fendilhação das vigas, estas foram reforçadas à flexão utilizando a técnica NSM com laminados de CFRP. Depois da cura do adesivo, as vigas foram solicitadas até atingirem a rotura (Ensaio à rotura).

A Tabela 5 apresenta as características gerais das vigas ensaiadas no programa experimental de Vieira (2013), nomeadamente: a percentagem de armadura longitudinal de tração (ρ_{sl}); o valor médio da resistência à compressão do betão das vigas (f_{cm}); a solução de reforço de CFRP aplicada; a percentagem de reforço de CFRP (ρ_f) e a força máxima imposta no ensaio de pré-

fendilhação das vigas (obtida considerando a curva de comportamento de uma viga de betão armado sem reforço de CFRP (REF-M) semelhante às que foram utilizadas no presente programa experimental) e que foi testada no âmbito do trabalho desenvolvido por Dias *et al.* (2012). Os valores da força máxima impostos no ensaio de pré-fendilhação das vigas estão associados a valores de flecha a meio-vão compreendidos entre 50% e 80% do valor máximo permitido regulamentarmente (NP EN 1992-1-1, 2010) para estados limites de serviço (L/250, em que L é o vão livre da viga, de valor igual a 2400 mm).

Tabela 5 - Características das vigas e força máxima do ensaio de pré-fendilhação (Vieira, 2013).

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

⁽¹⁾ Força associada a uma flecha de 50% do valor da flecha correspondente a L/250; ⁽²⁾ Força associada a uma flecha de 65% do valor da flecha correspondente a L/250; ⁽³⁾ Força associada a uma flecha de 80% do valor da flecha correspondente a L/250.

A Figura 17 apresenta as curvas referentes ao comportamento das vigas S1-PC1, S2-PC1 e S3-PC1, reforçadas à flexão com um, dois e três laminados, respetivamente (nestas três vigas, a força máxima imposta no ensaio de pré-fendilhação foi de 40 kN). Na Figura 17 é visível que as vigas reforçadas apresentam, numa fase inicial, uma rigidez inferior à da viga de referência sem reforço (REF-M) devido à pré-fendilhação instalada nas vigas antes da aplicação do reforço de CFRP. Na Figura 17 são, também, visíveis os benefícios da presença dos reforços de CFRP quer em termos de rigidez quer em termos de capacidade de carga máxima, que foram tanto maiores quanto maior a percentagem de CFRP.

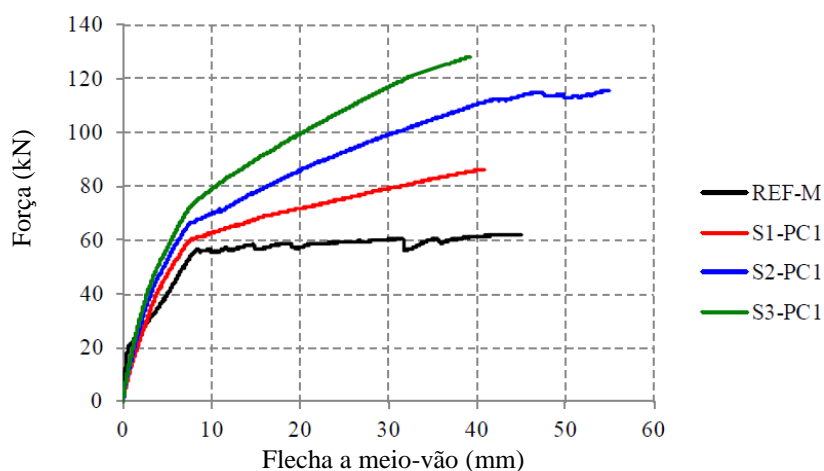


Figura 17 - Curvas de comportamento das vigas REF-M, S1-PC1, S2-PC1 e S3-PC1 (Vieira, 2013).

Tabela 6 - Principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas (Vieira, 2013).

Viga	F_{max} (kN)	Acréscimo de carga máxima (%)	$u_{F_{max}}$ (mm)	ε_{CFRP}^{max} (‰)	Modo de rotura
REF-M	62.3	---	45.1	---	---
S1-PC1	86.4	38.7	40.8	15.3	Rotura do CFRP
S2-PC1	115.6	85.6	55.0	17.7	Rotura do CFRP
S2-PC2	113.7	82.5	46.1	16.7	Destacamento do CFRP
S3-PC1	128.2	105.8	39.3	15.9	Destacamento do CFRP
S3-PC3	131.0	110.3	38.8	14.5	Destacamento do CFRP

Os principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas até à rotura são apresentados na Tabela 6. Assim, são apresentados os valores da carga máxima (F_{max}), dos acréscimos de carga máxima proporcionados pelo reforço de CFRP (F_{max}), do deslocamento a meio-vão da viga correspondente a F_{max} ($u_{F_{max}}$), da extensão máxima registada no CFRP (ε_{CFRP}^{max}) até ao momento em que as vigas atingiram a sua capacidade de carga máxima e dos modos de rotura observados.

Em termos médios e relativamente à viga de referência REF-M, os modelos reforçados com 1, 2 e 3 laminados de CFRP apresentaram, respetivamente, uma carga máxima (F_{max}) 1.38, 1.84 e 2.08 vezes superior e um deslocamento a meio-vão associado à carga máxima das vigas ($u_{F_{max}}$) de 90.5%, 112.1% e 86.6%, respetivamente. Da Tabela 6, observa-se que as extensões máximas registadas, nos extensómetros elétricos aplicados nos laminados de CFRP, variaram entre 14.5‰ (S3-PC3) e 17.7‰ (S2-PC1).

De um modo geral, Vieira (2013) concluiu que a aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado, independentemente da percentagem de CFRP e independentemente do nível de pré-fendilhação instalado previamente à aplicação do reforço, permitiu aumentar a capacidade de carga das vigas. Em termos de efeito da pré-fendilhação para as soluções de reforço com 1, 2 e 3 laminados de CFRP, as curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão correspondentes ao ensaio à rotura das vigas permitiram concluir que, numa fase inicial, as vigas pré-fendilhadas e posteriormente reforçadas com laminados de CFRP inseridos apresentaram menor rigidez do que as vigas semelhantes mas sem pré-fendilhação do betão. As vigas pré-fendilhadas e reforçadas com laminados de CFRP inseridos apresentaram dois estados principais de comportamento (betão fendilhado com o aço não plastificado e o betão fendilhado após a cedência das armaduras) ao invés das vigas reforçadas com CFRP sem pré-fendilhação que apresentam três estados de comportamento (betão não fendilhado, betão fendilhado com o aço não plastificado e betão fendilhado após cedência do aço das armaduras longitudinais).

Relativamente à influência do nível de pré-fendilhação Vieira (2013) concluiu que, independentemente do nível de pré-fendilhação que as vigas apresentavam na altura do reforço de CFRP, os valores da carga máxima e do nível de mobilização do reforço de CFRP, aquando da rotura das vigas, foram similares aos alcançados em vigas semelhantes mas sem pré-fendilhação do betão. Perante, os resultados obtidos nas vigas reforçadas com dois e três laminados de CFRP, onde foram estudados dois níveis de pré-fendilhação, conclui-se que os níveis de pré-fendilhação não comprometeram a eficácia da técnica de reforço à flexão de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos.

2.4.2. Lajes de betão armado

Dalfré e Barros (2013) avaliaram experimentalmente a eficácia da técnica de reforço NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de lajes contínuas de betão armado, em termos de capacidade de carga, redistribuição de momentos e ductilidade. Concretamente, o objetivo foi verificar a possibilidade de aumentar a capacidade de carga das faixas de lajes em 25% e 50%, mantendo níveis de redistribuição de momentos de 15%, 30% e 45%. O programa experimental baseou-se em ensaios à flexão, em cinco pontos de carga, de dezassete faixas de lajes de betão armado, divididas em dois grupos de acordo com a configuração de reforço:

- Grupo H, composto por lajes reforçadas com laminados de CFRP aplicados usando a técnica NSM na região de momentos negativos e,
- Grupo HS, constituído por lajes reforçadas com laminados de CFRP aplicados usando a técnica NSM quer na região de momentos negativos como na região de momentos positivos.

Neste contexto salienta-se o facto da técnica NSM ser uma técnica especialmente apropriada para utilização no reforço para momentos negativos, visto que nesta técnica o reforço encontra-se inserido em entalhes efetuados no betão recobrimento.

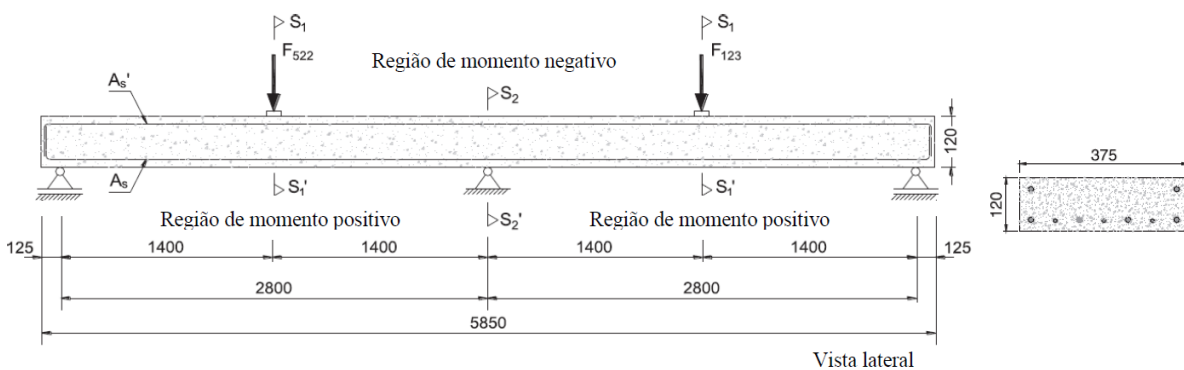


Figura 18 - Geometria das faixas de laje ensaiadas por Dalfré e Barros (2013).

As dezassete faixas de laje testadas por Dalfré e Barros (2013), com dois vãos, tinham dimensões de $120 \times 375 \times 5850 \text{ mm}^3$ (Figura 18). O grupo H era composto por três faixas de laje de referência (SL15-H, SL30-H e SL45-H) e seis faixas de lajes reforçadas à flexão, com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM na região de momentos negativos, visando o incremento da capacidade de carga da laje de referência em 25% (SL15s25-H, SL30s25-H, SL45s25-H) e 50% (SL15s50-H, SL30s50-H, SL45s50-H). O grupo HS era composto por três faixas de laje de referência (SL15-HS, SL30-HS e SL45-HS) e por cinco faixas de laje reforçadas à flexão, com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM quer na região de momentos negativos como nas regiões de momentos positivos (SL15s25-HS, SL30s25-HS, SL45s25-HS, SL30s50-HS e SL45s50-HS). A notação adotada na identificação de cada laje é SLx_{sy}-z, onde “x” é a percentagem prevista de redistribuição de momento (15%, 30% ou 45%), “y” é o incremento do momento negativo (25% ou 50%) e “z=H” ou “z=HS” indicam que a laje foi reforçada apenas na região de momentos negativos (H) ou em ambas as regiões de momentos negativos/positivos (HS). Na Tabela 7 é apresentada a geometria, armadura longitudinal e detalhes do sistema de reforço das faixas de laje nos diferentes vãos.

As faixas de lajes do grupo HS foram submetidas a dois tipos de ensaios à flexão em cinco pontos de carga. No primeiro ensaio, as lajes SL15s25-HS, SL30s25-HS, SL30s50-HS, SL45s25-HS e SL45s50-HS, previamente à aplicação do reforço, foram carregadas até atingirem, nas seções carregadas, um deslocamento vertical correspondente a 50% do deslocamento vertical medido nas lajes de referências quando, na região de momentos negativos, a armadura longitudinal atingiu a seu estado de cedência. Quando este deslocamento foi atingido nas lajes, um sistema de reação temporário foi aplicado a fim de manter esta deformabilidade durante um período necessário para se proceder ao seu reforço. O segundo ensaio consistiu no carregamento das faixas de lajes, já reforçadas, até à rotura. As faixas de laje do grupo H foram reforçadas e ensaiadas à rotura sem terem sido previamente fendilhadas.

Na Figura 19 apresentam-se, a título de exemplo, as curvas força média ($F = (F_{522} + F_{123})/2$) vs deslocamento vertical na seção S1-S1' das faixas de lajes dos grupos H e HS com 45% de redistribuição de momento (SL45-H, SL45s25-H, SL45s50-H, SL45-HS, SL45s25-HS, SL45s50-HS) - ver na Figura 18 o significado de F_{522} e F_{123} . A Figura 19 revela que as faixas de lajes do grupo H apresentam um comportamento bastante diferente em relação as faixas de lajes do grupo HS. Esta diferença é justificada, por dois fatores: em termos de ensaios, as faixas de laje do grupo H foram apenas sujeitas ao ensaio de rotura enquanto que as do grupo HS, primeiramente estiveram sujeitas ao ensaio de pré-fendilhação e só depois de reforçadas é que

foram ensaiadas à rotura; em termos de reforço utilizado nas lajes, no grupo HS os reforços foram aplicados nas regiões de momentos positivos e negativos, enquanto que no grupo H os reforços foram aplicados nas regiões de momentos negativos. A aplicação de reforço nas regiões de momentos positivos e negativos proporcionou um aumento significativo da capacidade de carga das lajes.

Tabela 7 - Informação das faixas de laje testadas por Dalfré e Barros (2013).

Grupo	Laje	Pré-fendilhada	Betão	Armaduras		Nº de laminados de CFRP		
			f_{cm} (MPa)	Seção S1-S1` (na Figura 18)	Seção S2-S2` (na Figura 18)	Zona de momentos positivos	Zona de momentos negativos	
H	SL15-H	Não	40	4Ø12 + 3Ø8 (tração) e 2Ø12 (compressão)	2Ø12 + 1Ø8 (tração) e 5Ø12 (compressão)	0	0	
	SL15s25-H	Não					3×(1.4×10 mm ²)	
	SL15s50-H	Não					7×(1.4×10 mm ²)	
	SL30-H	Não	36	3Ø12 + 4Ø10 (tração) e 2Ø12 (compressão)	2Ø10 + 1Ø12 (tração) e 4Ø12 (compressão)	0	0	
	SL30s25-H	Não					2×(1.4×10 mm ²)	
	SL30s50-H	Não					5×(1.4×10 mm ²)	
	SL45-H	Não	41	6Ø12 + 1Ø8 (tração) e 2Ø10 (compressão)	2Ø12 + 1Ø8 (tração) e 3Ø10 + 2Ø8 (compressão)	0	0	
	SL45s25-H	Não					1×(1.4×10 mm ²)	
	SL45s50-H	Não					3×(1.4×10 mm ²)	
HS	SL15-HS	Sim	26	4Ø12 + 3Ø8 (tração) e 2Ø12 (compressão)	2Ø12 + 1Ø8 (tração) e 5Ø12 (compressão)	0	0	
	SL15s25-HS	Sim					1×(1.4×10 mm ²) + 2×(1.4×20 mm ²)	4×(1.4×20 mm ²)
	SL30-HS	Sim	28	3Ø12 + 4Ø10 (tração) e 2Ø12 (compressão)	2Ø10 + 1Ø12 (tração) e 4Ø12 (compressão)	0	0	
	SL30s25-HS	Sim					2×(1.4×10 mm ²) + 2×(1.4×20 mm ²)	2×(1.4×20 mm ²)
	SL30s50-HS	Sim					1×(1.4×10 mm ²) + 6×(1.4×20 mm ²)	3×(1.4×20 mm ²)
	SL45-HS	Sim	42	6Ø12 + 1Ø8 (tração) e 2Ø10 (compressão)	2Ø12 + 1Ø8 (tração) e 3Ø10 + 2Ø8 (compressão)	0	0	
	SL45s25-HS	Sim					2×(1.4×20 mm ²)	2×(1.4×20 mm ²)
	SL45s50-HS	Sim					6×(1.4×20 mm ²)	2×(1.4×20 mm ²)

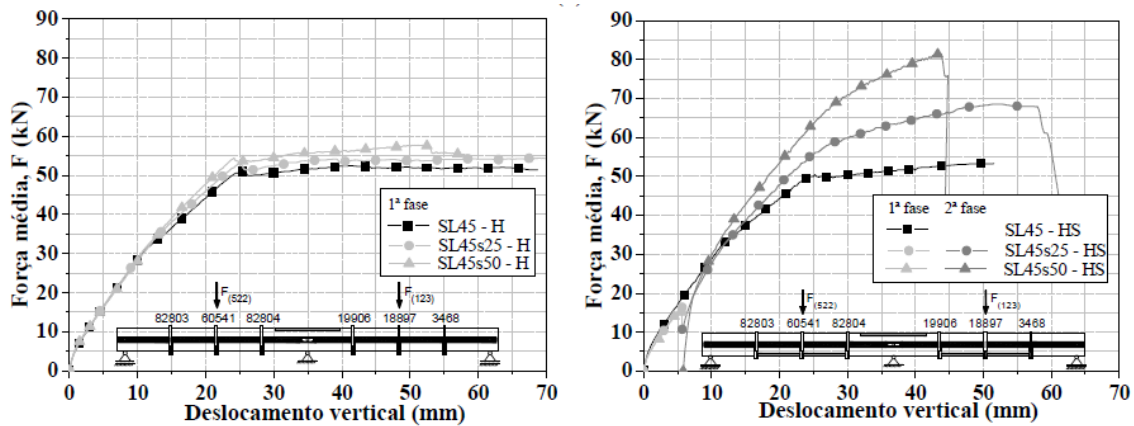


Figura 19 - Relações força média vs deslocamento vertical nas faixas de laje das séries SL45-H/HS (Dalfré e Barros, 2013).

Tabela 8 - Principais resultados obtidos no programa experimental de Dalfré e Barros (2013).

	Laje	Modo de rotura	F_{max} (kN) ⁽¹⁾	$u_{F_{max}}$ (mm) ⁽²⁾	η (%) ⁽³⁾	IR (%) ⁽⁴⁾
Grupo H	SL15-H	Flexão	51.36	55.04	7.85	----
	SL15s25-H	Flexão	57.60	81.01	-20.40	12.15
	SL15s50-H	Rotura por corte	62.36	46.25	-27.64	21.42
	SL30-H	Flexão	49.84	38.63	27.71	----
	SL30s25-H	Flexão	54.87	70.27	6.36	10.09
	SL30s50-H	Rotura por corte	58.09	57.62	-2.42	16.55
	SL45-H	Flexão	52.55	41.29	43.62	----
	SL45s25-H	Flexão	54.49	71.12	32.58	3.69
	SL45s50-H	Rotura por corte	57.79	51.55	16.73	9.97
Grupo HS	SL15-Hs	Flexão	47.61	54.45	(na)	----
	SL15s25-Hs	Destacamento do betão	69.24	47.73	8.85	45.43
	SL30-Hs	Flexão	47.85	53.00	19.69	----
	SL30s25-Hs	Destacamento do betão	72.96	65.18	26.58	52.48
	SL30s50-Hs	Destacamento do betão	80.42	49.19	31.67	68.07
	SL45-Hs	Flexão	53.27	51.52	38.93	----
	SL45s25-Hs	Rotura por corte	58.48	52.33	37.66	28.55
	SL45s50-Hs	Rotura por corte	81.57	43.64	47.04	53.13

(na) – não é apresentada uma vez que as reações não foram registadas devido a um deficiente funcionamento do sistema de aquisição de dados durante o ensaio da faixa de laje; ⁽¹⁾ F_{max} : carga média máxima ($F=(F_{522}+F_{123})/2$); ⁽²⁾ $u_{F_{max}}$: deformação média máxima; ⁽³⁾ $\eta = (1 - \delta) * 100$, em que $\delta = M_{red}/M_{elast}$; ⁽⁴⁾ $IR = \frac{F_{max}^{CFRP} - F_{max}^{REF}}{F_{max}^{REF}} \times 100$, em que F_{max}^{REF} é a carga média máxima das lajes de referência e F_{max}^{CFRP} é a carga média máxima das lajes reforçadas com CFRP.

A Tabela 8 apresenta um resumo dos principais resultados obtidos no programa experimental de Dalfré e Barros (2013) onde se indica os modos de rotura, a força média máxima (F_{max}), o deslocamento associado à força média máxima ($u_{F_{max}}$) e os indicadores da redistribuição de momentos (η) e da eficácia das soluções de reforço em termos de aumento da capacidade máxima de carga (IR). Da Tabela 8 conclui-se que, para o grupo H, o aumento da capacidade máxima de carga das lajes variou entre 3.69% e 21.42%, verificando-se que a solução de reforço composta por laminados só aplicados na zona de momentos negativos não conduziu à

concretização do objetivo do aumento da capacidade máxima de carga desejável. No que respeita ao grupo HS, o aumento da capacidade máxima de carga das lajes variou entre 28.55% e 68.07% demonstrando assim, que o objetivo do aumento da capacidade máxima de carga nas lajes foi atingido com a aplicação do reforço em ambas as regiões (momentos positivos e negativos).

Relativamente, à percentagem de redistribuição de momentos, os autores concluíram que a percentagem obtida foi menor do que a prevista nas lajes reforçadas apenas com laminados de CFRP na zona de momentos negativos. Nesta configuração de reforço de CFRP (zona de momentos negativos), a redistribuição de momentos (η) diminuiu com o aumento da percentagem de CFRP. No entanto, a estratégia de colocar reforço de CFRP em ambas as zonas (momentos negativos e positivos) não afetou significativamente a capacidade de redistribuição de momentos.

2.5. PRÉ-ESFORÇO NOS MATERIAIS COMPÓSITOS PARA REFORÇO DE ESTRUTURAS EM BETÃO ARMADO

“Pré-esforço é uma técnica que consiste em introduzir, numa estrutura, um estado prévio de tensões, de modo a melhorar a sua resistência ou comportamento, sob ação de diversas condições de carga” (Oliveira, 2012).

A eficácia da técnica NSM com laminados sem pré-esforço no reforço à flexão de vigas de betão armado (Blaschko e Zilch, 1999; Barros e Fortes, 2005; Kotynia, 2007 e Dias *et al.*, 2012) e lajes (Bonaldo, 2008 e Dalfré e Barros, 2013) já foi objeto de aprofundada investigação. A partir destes estudos verificou-se que a aplicação de laminados de CFRP inseridos sem pré-esforço no reforço à flexão pode aumentar significativamente a capacidade de carga máxima dos elementos estruturais de betão armado. No entanto, também se verificou, que para níveis de deformação correspondentes a estados limites de serviço, a eficácia da solução de reforço em termos de acréscimo de capacidade de carga não é tão significativo. Por isso, para o reforço se tornar mais eficiente é necessário a aplicação de pré-esforço no CFRP. O pré-esforço no CFRP também contribuiu para diminuir a tensão de tração instalada nas armaduras longitudinais existentes, diminuir a largura ou até mesmo fecho das fendas e retardamento do aparecimento de novas fendas, resultando em benefícios em termos de integridade estrutural e durabilidade do betão (Hosseini *et al.*, 2014).

Nas Figuras 20 e 21 ilustram-se os dois diferentes métodos de aplicação do pré-esforço em laboratório aplicando a técnica NSM:

- pré-esforço indireto (Figura 20), a força do pré-esforço é induzida no reforço de CFRP incorporado dentro dos entalhes preenchidos com epóxi e por tensionamento, através do uso de macacos hidráulicos, das extremidades do CFRP contra uma estrutura de aço até provocar o nível de tensão pretendido. De seguida, o epóxi atinge a sua cura e, o sistema de pré-esforço é libertado e o efeito de pré-esforço é transferido indiretamente para a viga/laje;

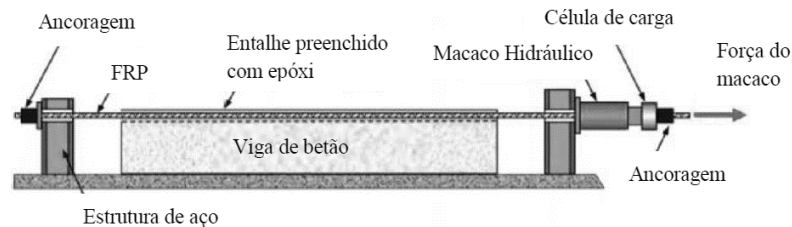


Figura 20 - Esquema do sistema de pré-esforço indireto (adaptado de El-Hacha e Soudki, 2013).

- pré-esforço direto, o reforço de CFRP é tensionado por reagir contra a viga/laje. A título de exemplo descreve-se o sistema proposto por El-Hacha e Gaafar (2011). De acordo com os autores, duas ancoragens de aço (Figura 21) são coladas às extremidades do reforço de CFRP com adesivo epóxi, uma está fixa a uma das extremidades da viga/laje e a outra encontra-se livre na extremidade oposta. Dois suportes de aço são temporariamente aparafusados à extremidade onde se encontra a ancoragem livre: um usado para transferir a carga do macaco hidráulico para a ancoragem livre e o outro é utilizado como apoio ao macaco hidráulico. Posteriormente, para se atingir a pré-tensão necessária, a ancoragem livre foi afixada ao betão através de parafusos e os suportes temporários são removidos. Neste sistema é de salientar que o entalhe é preenchido, primeiramente, em apenas 3/4 da sua profundidade e, só após a pré-tensão é que o mesmo é preenchido na sua totalidade. Salienta-se também que as ancoragens de aço nas extremidades do CFRP são embebidas nas vigas/lajes.

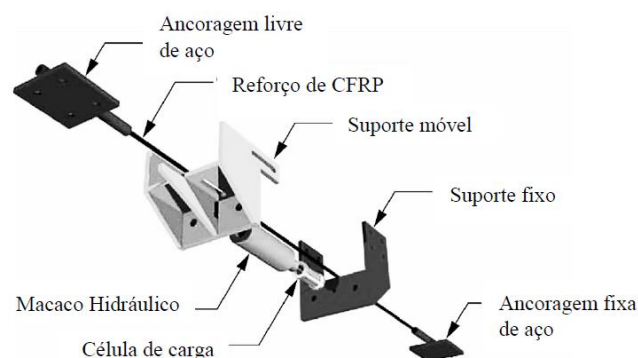


Figura 21 - Esquema do sistema de pré-esforço direto (adaptado de El-Hacha e Gaafar, 2011).

A aplicação da técnica de inserção (NSM) usando compósitos de FRP pré-esforçados para reforçar vigas de betão armado é ilustrada na Figura 22. Através de ancoragens são aplicadas reações iguais e opostas à viga, que originam tensões de compressão na parte inferior da viga,

causando o encurtamento da mesma, e tensões de tração na parte superior da viga. O encurtamento da viga depende do nível de pré-esforço aplicado no reforço de FRP e da rigidez axial e de flexão da viga. Assim, o reforço de FRP com pré-tensão gera tensões à viga que contrariam as solicitações induzidas na viga (El-Hacha e Soudki, 2013).

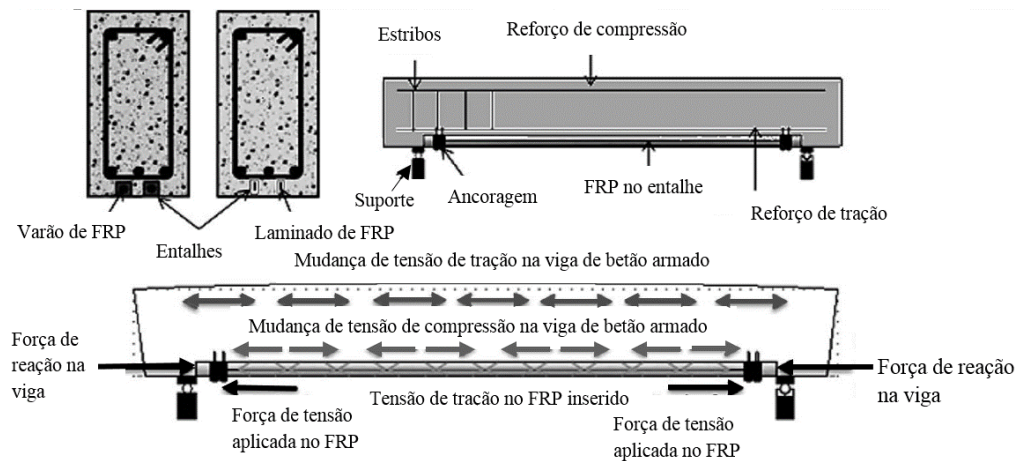


Figura 22 - Esquema da técnica NSM com FRP pré-tensionado (adaptado de Aslam *et al.*, 2015).

A Figura 23 demonstra, de forma genérica, o efeito da aplicação de pré-tensão no CFRP no comportamento das vigas. Assim, na Figura 23 são apresentadas as curvas de comportamento força vs flecha no meio-vão para: a) a viga sem reforço, b) viga reforçada com CFRP sem pré-tensão e c) viga reforçada com CFRP com pré-tensão. As duas elipses (E1) e (E2) identificam a fase correspondente ao início da fendilhação do betão e a fase correspondente ao início da cedência das armaduras do aço. A introdução de pré-esforço no reforço de FRP proporciona um aumento da carga de início de fendilhação e da carga de cedência das armaduras quando comparadas com elementos estruturais sem reforço e/ou sem pré-tensão. A ductilidade de um elemento de betão armado reforçado com pré-tensão diminui, em comparação com um elemento de betão armado reforçado sem pré-tensão (Figura 23), devido ao facto que parte da capacidade da força ou tensão no FRP já foi usado para pré-esforço (El-Hacha e Soudki, 2013).

A Figura 24 ilustra o efeito da percentagem de pré-tensão no comportamento de vigas reforçadas com CFRP, por intermédio das curvas de comportamento força vs deformação para uma viga de betão armado sem reforço, para uma viga reforçada com FRP sem pré-tensão e para vigas reforçadas com diferentes níveis de pré-tensão (P1, P2 e P3 em que $P1 < P2 < P3$). É notório que à medida que aumenta o nível de pré-tensão, existe um aumento da carga de início de fendilhação e da carga de cedência da armadura. Observa-se também que nas vigas pré-esforçadas, o aumento do nível de pré-tensão origina menores deformações em relação à viga

de referência. Com o aumento do nível de pré-tensão verifica-se uma diminuição da ductilidade da estrutura.

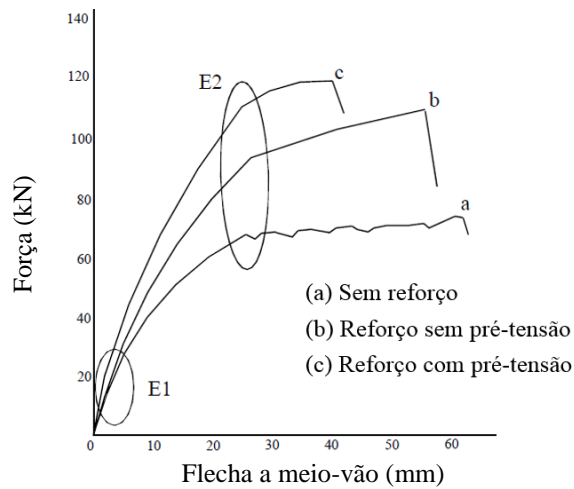


Figura 23 - Curvas de força vs flecha a meio-vão para: a) viga sem reforço; b) viga reforçada sem pré-tensão, e c) viga reforçada com pré-tensão (Escobar, 2003).

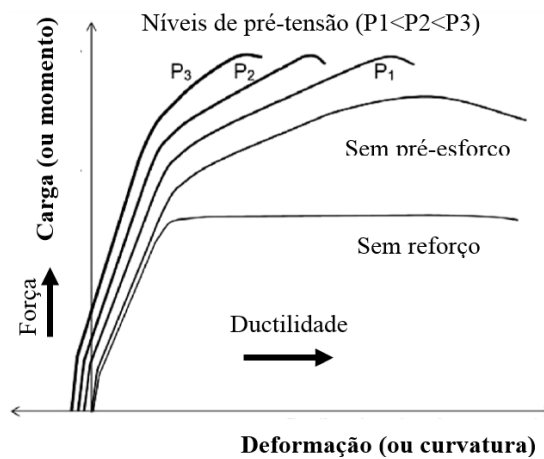


Figura 24 - Comportamento de vigas reforçadas com diversos níveis de pré-esforço no CFRP (P1, P2 e P3), viga não pré-esforçada e viga não reforçada (adaptado de El-Hacha e Soudki, 2013).

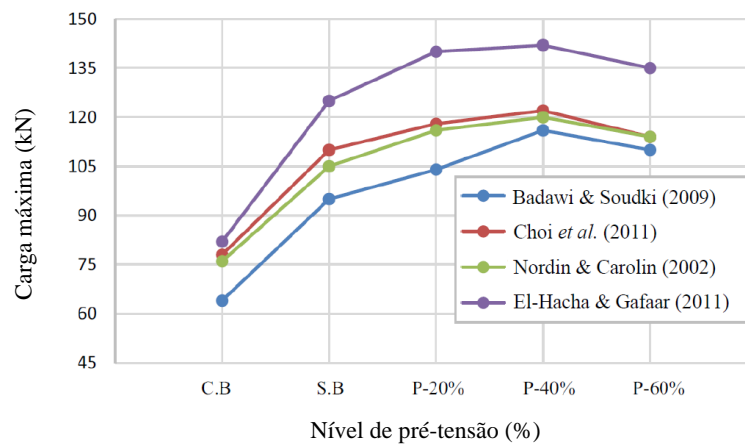


Figura 25 - Carga máxima vs nível de pré-esforço nos varões de CFRP inseridos em diferentes estudos realizados (adaptado de Aslam et al., 2015).

Ainda no que se refere ao efeito da percentagem de pré-tensão no CFRP, vários foram os investigadores (Nordin *et al.*, 2002; Badawi e Soudki, 2009, Choi *et al.*, 2011 e El-Hacha e Gafaar, 2011) que demonstraram, no caso de reforço à flexão de vigas de betão armado com varões de CFRP inseridos, que existe uma proporcionalidade entre o aumento do nível de pré-esforço e a carga máxima atingida pelas vigas, designadamente, até ao nível pré-esforço no CFRP de 40% (Figura 25). Com efeito, para valores de nível de pré-tensão superiores a 40%, registou-se uma tendência para uma diminuição dos valores da carga máxima obtidos nas vigas. Neste contexto, refere-se que a rotura das vigas reforçadas com pré-tensão ocorreu devido à cedência das armaduras de aço seguida da rotura do reforço de CFRP (Aslam *et al.*, 2015).

2.6. COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM LAMINADOS DE CFRP INSERIDOS PRÉ-TENSIONADOS

Nesta seção será apresentado, de forma resumida, um conjunto de resultados experimentais por forma a compreender o comportamento de estruturas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados.

2.6.1. Vigas de betão armado

Barros e Gomes (2008) exploraram o desempenho do reforço à flexão de vigas de betão armado com laminados de CFRP aplicados com um determinado nível de pré-tensão e segundo a técnica NSM. Nesse âmbito, efetuaram ensaios em três vigas de betão armado (V00, VLP, VRC20), com dimensões de 120×200×2000 mm³. O betão das vigas tinha uma resistência à compressão média de 37.5 MPa (aos 28 dias) e as vigas estavam armadas longitudinalmente com 2Ø12 na face inferior (tração) e 2Ø12 na face superior (compressão) e com estribos Ø8 afastados a 100 mm. As vigas VLP e VRC20 foram reforçadas com um laminado de CFRP com 1.2×10mm² de área de seção transversal. Na viga VLP o laminado foi aplicado sem qualquer nível de pré-tensão, enquanto na viga VRC20 o laminado foi aplicado com um nível de pré-tensão próximo dos 20% da resistência à tração do laminado.

Os principais resultados obtidos no programa experimental realizado por Barros e Gomes (2008) são apresentados na Tabela 9. De acordo com os resultados da Tabela 9, a aplicação de um nível de pré-tensão de 20% no laminado permitiu aumentar significativamente a carga de início de fendilhação e a carga máxima em 36.2% e 49.5%, respetivamente (tendo por base os correspondentes valores obtidos na viga de referência V00). Em comparação com a viga VLP, a viga VRC20 permitiu aumentar a carga de início de fendilhação e a carga máxima em 19.3%

e 6.6%, respetivamente. No que concerne ao modo de rotura, todas as vigas apresentaram modo de rotura por esmagamento do betão.

Tabela 9 - Resumo dos resultados obtidos por Barros e Gomes (2008).

Viga	F_{cr} (kN) ⁽¹⁾	F_{max} (kN) ⁽²⁾	Modo de rotura
V00	10.07	54.72	Esmagamento do betão
VLP	11.50 (14.2%)	76.72 (40.2%)	Esmagamento do betão
VRC20	13.72 (36.2%) { 19.3% }	81.80 (49.5%) { 6.6% }	Esmagamento do betão

⁽¹⁾ F_{cr} : carga de início da fendilhação; ⁽²⁾ F_{max} : carga máxima; ⁽³⁾ $u_{F_{max}}$: flecha correspondente à carga máxima; Valor (Variação em relação à viga V00); Valor {Variação em relação à viga VLP}.

El-Hacha e Gaafar (2011) realizaram uma investigação experimental para a avaliação da eficácia da técnica NSM com varões de CFRP para o reforço à flexão das vigas de betão armado. Concretamente, foi avaliado o efeito da variação do nível pré-esforço (de 0% a 60% da resistência à tração dos varões de CFRP) na eficácia da técnica em análise. Cinco vigas de betão armado, com dimensões de 200×400×5000 mm³, foram testadas monotonicamente até à rotura por intermédio de ensaios à flexão em quatro pontos de carga. Na Figura 26 estão representados detalhes da geometria e das armaduras das vigas ensaiadas por El-Hacha e Gaafar (2011). O betão das vigas tinha uma resistência à compressão de 40 MPa e o reforço de CFRP utilizado foi um varão com diâmetro nominal de 9 mm.

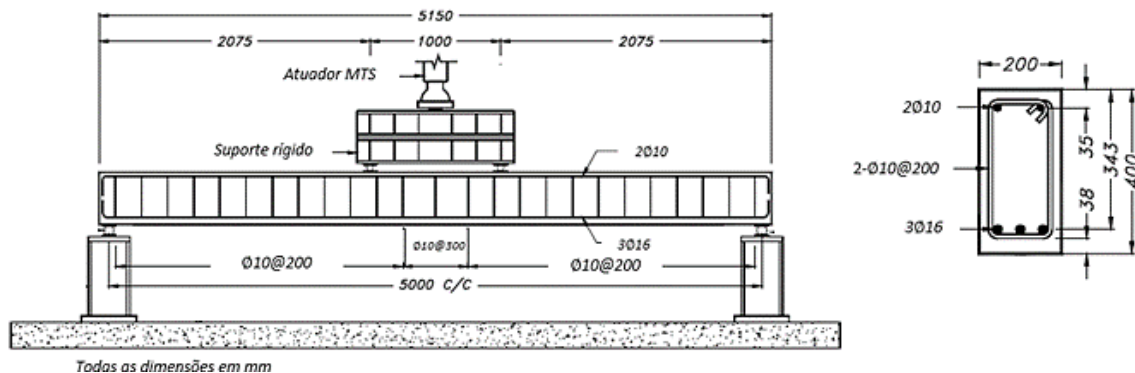


Figura 26 - Configuração do ensaio, geometria e armaduras das vigas ensaiadas (adaptado de El-Hacha e Gaafar, 2011).

Na Tabela 10 são apresentados os principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas, em termos, de valores das cargas de início de fendilhação (F_{cr}), de cedência de armaduras (F_{sy}) e da carga máxima (F_{max}), os valores da flecha a meio-vão para a carga de início de fendilhação ($u_{F_{cr}}$), para a carga de cedência de armaduras ($u_{F_{sy}}$) e para a carga máxima ($u_{F_{max}}$), assim como, os modos de rotura obtidos nas vigas ensaiadas. Na Figura 27 apresentam-se os diagramas força vs flecha a meio-vão das vigas ensaiadas por El-Hacha e Gaafar (2011).

Tabela 10 - Resumo dos resultados obtidos nas vigas ensaiadas por El-Hacha e Gaafar (2011).

Viga	F_{cr} (kN)	$u_{F_{cr}}$ (mm)	F_{sy} (kN)	$u_{F_{sy}}$ (mm)	F_{max} (kN)	$u_{F_{max}}$ (mm)	Modo de rotura
B00	12.5	1.3	78.9	25.1	83.8	109.9	Esmagamento do betão
B2-0%	18.4 (47.8%)	1.6 (31.4%)	90.2 (14.3%)	25.3 (0.5%)	136.4 (62.7%)	114.5 (-4.2%)	Rotura do CFRP
B2-20%	22.1 (77.0%)	1.5 (18.8%)	105.7 (34.0%)	27.7 (10.1%)	141.0 (68.2%)	92.5 (-15.8%)	Rotura do CFRP
B2-40%	27.9 (123.9%)	1.7 (36.2%)	114.5 (45.1%)	28.6 (13.8%)	141.7 (69.0%)	79.3 (-27.9%)	Rotura do CFRP
B2-60%	34.4 (176.4%)	2.4 (95.3%)	117.7 (49.1%)	28.2 (12.1%)	134.7 (60.8%)	49.7 (-54.8)	Rotura do CFRP

Valor (Variação em relação à viga B00).

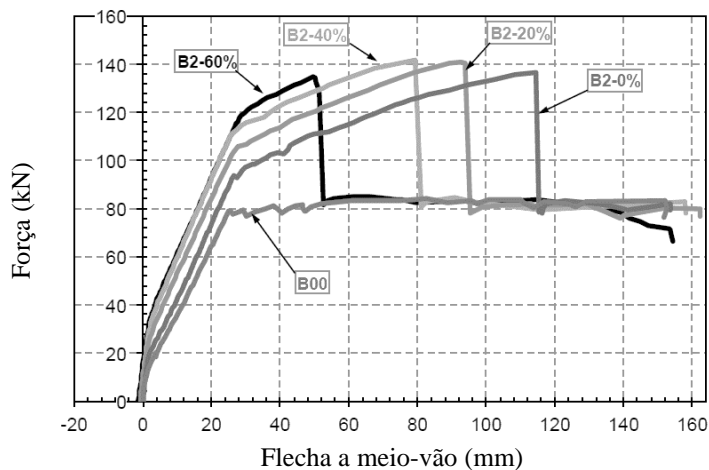


Figura 27 - Força vs flecha a meio-vão das vigas ensaiadas por El-Hacha e Gaafar (2011).

Com base na Tabela 10 e Figura 27, verifica-se que o reforço de CFRP com 0%, 20%, 40% e 60% de pré-tensão no varão de CFRP proporcionou aumentos de, respetivamente, 47.8%, 77.0%, 123.9% e 176.4% em termos de carga de início de fendilhação do betão (F_{cr}), e um aumento de, respetivamente, 14.3%, 34%, 45.1%, 49.1% em termos de carga de cedência das armaduras (F_{sy}). As vigas reforçadas com um varão de CFRP com níveis de pré-tensão de 0%, 20%, 40% e 60% apresentavam acréscimos de carga máxima (F_{max}) de 62.7%, 68.2%, 69% e 60.8%, respetivamente. A introdução de pré-esforço no varão de CFRP proporcionou, ainda, o retardamento da formação de novas fendas e uma diminuição da ductilidade das vigas reforçadas, quando comparadas com a viga de referência (B00). A aplicação de pré-tensão de 20%, 40% e 60% no varão de CFRP originou um acréscimo da flecha a meio-vão associada tanto à carga no início da fendilhação como à carga de cedência de armadura. No entanto, o aumento do nível de pré-esforço proporcionou uma diminuição da flecha a meio-vão associada à carga máxima (diminuição da ductilidade das vigas com o aumento da pré-tensão aplicada).

Costa (2014) realizou uma investigação experimental para avaliar a influência da aplicação de pré-tensão nos laminados de CFRP no comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com a técnica NSM. Três séries de vigas (S1, S2 e S3) foram ensaiadas à flexão sob quatro pontos de carga até à rotura (Figura 28). Todas as séries incluíram, além de duas vigas com CFRP pré-tensionado, duas vigas de referência, uma sem reforço de CFRP (chamada de “Referência”) e outra reforçada com CFRP sem pré-tensão, referida como 0% (precedida por S1, S2 e S3, no caso da série I, II ou III, respetivamente).

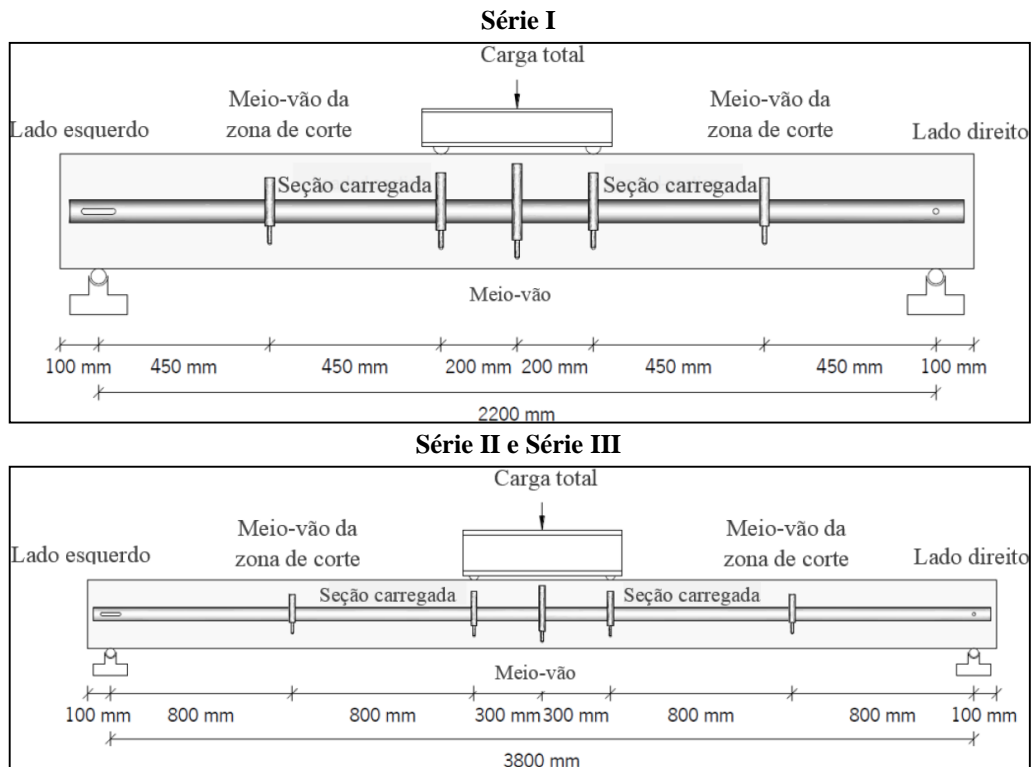


Figura 28 - Sistema de ensaio das vigas ensaiadas por Costa (2014).

Nas séries I, II e III, o betão utilizado na conceção das vigas tinha como valor de resistência à compressão 32 MPa, 48 MPa e 32 MPa, respetivamente. Para o reforço à flexão de todas as vigas foi usado um laminado de CFRP com seção transversal de $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$. Na Figura 29 estão representados detalhes da geometria e das armaduras das vigas ensaiadas por Costa (2014).

Na série I, das quatro vigas, com dimensões de $150 \times 300 \times 2400 \text{ mm}^3$, três foram reforçadas com um laminado de CFRP, sendo que em duas, o laminado de CFRP foi pré-tensionado com 20% e 30% da sua resistência à tração (vigas S1-20% e S1-30%). A série II era composta por seis vigas de betão armado, com dimensões de $150 \times 300 \times 4000 \text{ mm}^3$, onde quatro foram reforçadas com um laminado de CFRP pré-tensionado com 20%, 30%, 40% e 50% da sua resistência à tração (vigas S2-20%, S2-30%, S2-40% e S2-50%). Por fim, a série III, além do betão, apenas

se diferenciou da série II em termos de armadura longitudinal e transversal utilizada para a concepção das vigas de betão armado. Assim, o número de vigas reforçadas e o nível de pré-tensão utilizado no laminado de CFRP foram os mesmos da série II (vigas S3-20%, S3-30%, S3-40% e S3-50%).

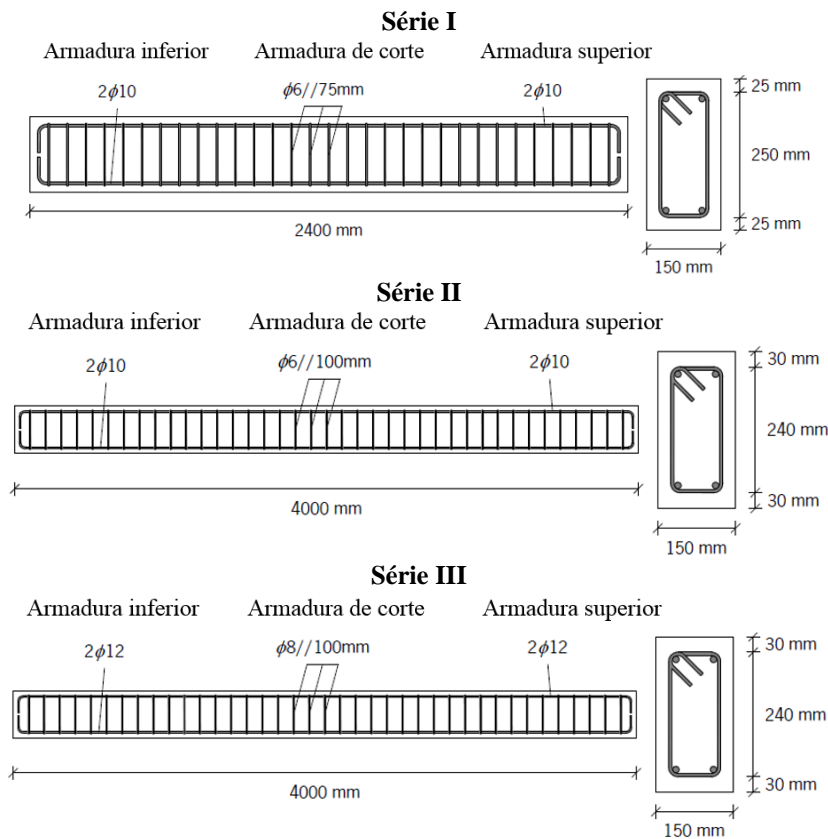


Figura 29 - Geometria e armaduras das vigas ensaiadas por Costa (2014).

Para aplicação da pré-tensão no laminado de CFRP, foi concebido um sistema que se encontra instalado no Laboratório de Estruturas (LEST) da Universidade Minho (Costa e Barros, 2012). Depois da correta instalação da viga na pista de pré-tensão, o laminado de CFRP foi colocado no entalhe e ancorado numa das extremidades (ancoragem passiva - ver Figura 30a)). Posteriormente, foram usados macacos hidráulicos, com capacidade máxima de 200 kN, de forma a que o laminado fosse tensionado pela outra extremidade (ancoragem ativa - Figura 30b)). A força de pré-esforço foi aplicada com incrementos de carga de 0.5 kN/min. Uma vez aplicada a totalidade da pré-tensão no laminado de CFRP, introduziu-se o adesivo no entalhe com o auxílio de uma espátula (Figura 30c)). Após o período de cura do adesivo, a carga de pré-tensão foi aliviada gradualmente (0.3 kN/min), de forma a evitar a ocorrência de elevados gradientes de tensão no processo de transferência de tensões dos laminados para o meio envolvente.

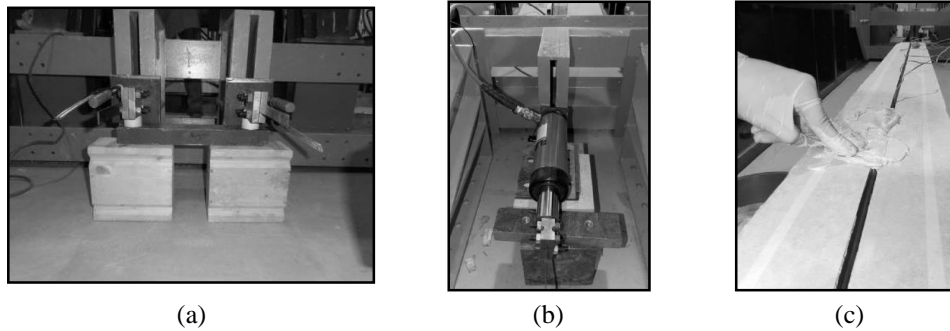


Figura 30 - Ilustração da ancoragem: a) passiva, b) ativa; c) aplicação do adesivo (Costa, 2014).

Na Tabela 11 são apresentados os principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas por Costa (2014). Os valores expostos são referentes às cargas de início de fendilhação do betão, de cedência das armaduras e carga máxima (F_{cr} , F_{sy} e F_{max} , respetivamente) e aos deslocamentos a meio-vão associados às cargas de início de fendilhação do betão, de cedência das armaduras e deformações máximas ($u_{F_{cr}}$, $u_{F_{sy}}$ e $u_{F_{max}}$, respetivamente). A Figura 31 representa, a título de exemplo, os diagramas força vs flecha a meio-vão das vigas da série III.

Tabela 11 - Principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas por Costa (2014).

Série	Viga	F_{cr} (kN)	$u_{F_{cr}}$ (mm)	F_{sy} (kN)	$u_{F_{sy}}$ (mm)	F_{max} (kN)	$u_{F_{max}}$ (mm)	Modo de rotura
I	SREF	15.5	0.389	51.3	6.319	61.5	-	Rotura por flexão
	S1-0%	18.7 [21%]	0.436 [12%]	62.5 [22%]	6.379 [1%]	93.0 [51%]	24.456	Rotura do CFRP
	S1-20%	27.1 [75%] {45%}	0.636 [64%] {46%}	69.9 [36%] {12%}	6.414 [2%] {1%}	94.0 [53%] {1%}	19.361 {-21%}	Rotura do CFRP
	S1-30%	28.5 [84%] {53%}	0.744 [91%] {71%}	75.4 [47%] {21%}	7.002 [11%] {10%}	95.2 [55%] {2%}	16.925 {-31%}	Rotura do CFRP
II	SREF	9.02	0.673	26.95	15.018	31.43	-	Rotura por flexão
	S2-0%	13.05 [45%]	2.279 [239%]	33.45 [24%]	15.642 [4%]	51.55 [64%]	60.668	Rotura do CFRP
	S2-20%	15.21 [69%] {17%}	1.150 [71%] {-50%}	37.99 [41%] {14%}	18.059 [20%] {15%}	51.00 [62%] {-1%}	45.003 {-26%}	Rotura do CFRP
	S2-30%	15.20 [69%] {16%}	1.278 [90%] {-44%}	39.52 [47%] {18%}	17.314 [15%] {11%}	50.30 [60%] {-2%}	37.467 {-38%}	Rotura do CFRP
	S2-40%	19.32 [114%] {48%}	1.487 [121%] {-35%}	41.59 [54%] {24%}	16.214 [8%] {4%}	48.5 [54%] {-6%}	29.14 {-52%}	Rotura do CFRP
	S2-50%	20.41 [126%] {56%}	1.651 [145%] {-28%}	45.1 [67%] {35%}	17.769 [18%] {14%}	49.53 [58%] {-4%}	25.214 {-58%}	Rotura do CFRP
III	SREF	9.76	1.117	37.90	15.052	48.85	-	Rotura por flexão
	S3-0%	10.07 [3%]	1.282 [15%]	44.78 [18%]	18.900 [26%]	63.55 [30%]	59.017	Rotura do CFRP
	S3-20%	12.19 [25%] {21%}	1.460 [31%] {14%}	47.75 [26%] {7%}	18.886 [25%] {0%}	61.63 [26%] {-3%}	45.422 {-23%}	Rotura do CFRP
	S3-30%	11.43 [17%] {14%}	1.557 [39%] {21%}	50.37 [33%] {12%}	18.848 [25%] {0%}	61.81 [27%] {-3%}	40.719 {-31%}	Rotura do CFRP
	S3-40%	15.31 [57%] {52%}	1.828 [64%] {43%}	54.77 [45%] {22%}	19.746 [31%] {4%}	64.51 [32%] {2%}	34.063 {-42%}	Rotura do CFRP
	S3-50%	15.04 [54%] {49%}	1.778 [59%] {39%}	55.75 [47%] {24%}	18.332 [22%] {-3%}	64.54 [32%] {2%}	28.559 {-52%}	Rotura do CFRP

Valor [Variação em relação à viga SREF de cada série].

Valor {Variação em relação à viga reforçada com CFRP sem pré-tensão para cada série}.

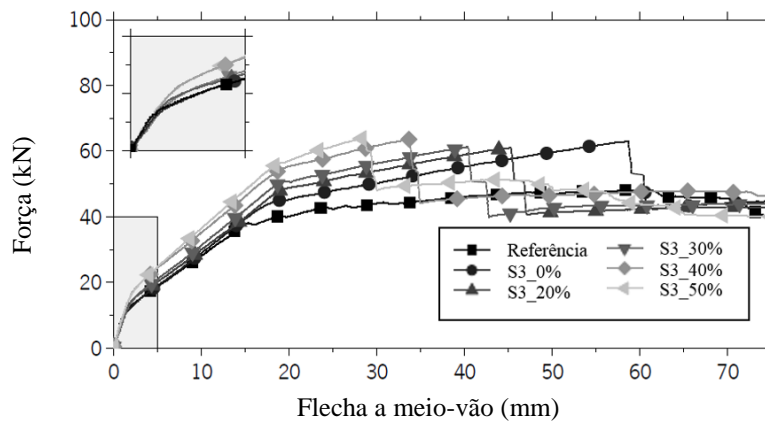


Figura 31 - Diagramas de força vs flecha a meio-vão das vigas da série III (Costa, 2014).

Analisando os principais resultados obtidos por Costa (2014), apresentados na Tabela 11 e pela análise da Figura 31, várias constatações relevantes podem ser feitas. Em todas as séries, a carga correspondente ao início de fendilhação do betão (F_{cr}) aumentou significativamente com o nível de pré-esforço no CFRP. Os acréscimos de carga de início de fendilhação do betão, em comparação com a viga SREF, variaram entre: na série I, 21% (viga S1-0%) e 84% (viga S1-30%); na série II, 45% (viga S2-0%) e 126% (viga S2-50%) e na série III, 3% (viga S3-0%) e 57% (viga S3-50%). No entanto, a resposta força vs flecha a meio-vão até ao início de fendilhação do betão não é perturbada pela percentagem de CFRP ou nível de pré-esforço, pois, como se pode visualizar na caixa existente na Figura 30 percebe-se que todas as vigas exibem a mesma rigidez antes do início da fendilhação do betão.

No que concerne à carga de cedência das armaduras (F_{sy}), em todas as séries se verificou um acréscimo do valor de F_{sy} com o nível de pré-esforço no CFRP. As vigas reforçadas com laminados de CFRP com níveis de pré-tensão, em comparação com a viga de referência, apresentaram acréscimos de carga de cedência das armaduras que variaram entre 22% e 47% para a série I, entre 24% e 67% para a série II e entre 18% e 47% para a série III. A deformação das vigas reforçadas com CFRP com pré-tensão, relativamente à viga reforçada com CFRP sem pré-tensão, não foi consideravelmente influenciada pelo nível de pré-esforço, ou seja, o aumento do nível de pré-tensão não influenciou a deformação das vigas na fase correspondente à cedência das armaduras ($u_{F_{sy}}$). Com efeito, a variação dos valores da deformação associada à cedência das armaduras foi: na série I, entre 1% (viga S1-20%) e 10% (viga S1-30%); na série II, entre 4% (viga S2-40%) e 15% (viga S2-20%) e na série III, entre 0% (vigas S3-20% e S3-30%) e 4% (viga S3-40%). Contudo, a viga S3-50% apresentou um decréscimo de deformação de 3%, em relação à viga S3-0%.

O nível de pré-tensão aplicado nos laminados de CFRP não teve qualquer influência sobre a carga máxima, pois o modo de rotura em todas as vigas reforçadas com CFRP, independentemente de ser ou não pré-tensionado, foi a rotura do laminado de CFRP. Assim, o incremento da carga máxima foi aproximadamente o mesmo em todas as vigas reforçadas (tanto no reforço sem pré-tensão como no reforço com pré-tensão). Em relação ao deslocamento máximo, $u_{F_{max}}$, este valor diminuiu significativamente com o aumento do nível de pré-esforço. O decréscimo do valor de $u_{F_{max}}$, em relação ao registado na viga reforçada com CFRP sem pré-tensão foi: na série I, de 21% (viga S1-20%) e 31% (viga S1-30%); na série II, entre 26% (viga S2-20%) e 58% (viga S2-50%) e na série III, entre 23% (viga S3-20%) e 52% (viga S3-50%).

O sistema de reforço, independentemente do nível de pré-esforço, também proporcionou uma redução do espaçamento médio das fendas, quando comparado com a viga de referência. Em termos de comprimento da zona de fendilhação, a viga reforçada com um laminado CFRP não pré-esforçado apresenta maiores comprimentos quando comparada com a viga de referência, contudo, o aumento do nível pré-esforço inverte esta tendência, ou seja, o aumento do nível de pré-tensão fez diminuir o comprimento da zona de fendilhação em comparação com a viga reforçada com CFRP não pré-esforçado.

2.6.2. Lajes de betão armado

Hosseini *et al.* (2014) realizaram um programa experimental onde foi avaliado o efeito do nível de pré-tensão aplicado nos laminados de CFRP quando aplicado no reforço à flexão em lajes de betão armado. O trabalho experimental englobou o ensaio de quatro lajes de betão armado: a de referência sem CFRP (laje SREF) e três reforçadas à flexão usando a técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados, diferenciados pela percentagem de pré-tensão nos laminados de CFRP: 0% (laje S2L-0), 20% (laje S2L-20) e 40% (laje S2L-40) da capacidade máxima resistente à tração do CFRP. De acordo com a Figura 32, as lajes de betão armado possuíam um comprimento de 2600 mm e seção transversal retangular de 600 mm de largura e 120 mm de altura (600×120 mm²) e uma distância entre apoios de 2400 mm, tendo sido submetidas a ensaios à flexão em quatro pontos de carga até rotura. A Figura 33 apresenta a seção transversal das lajes de betão armado reforçadas, usando a técnica NSM, com dois laminados de CFRP que apresentavam seção transversal de 1.4×20 mm². As lajes ensaiadas tinham uma percentagem de armadura longitudinal de ρ_{sl} igual a 0.35% e uma percentagem de reforço de CFRP de ρ_f igual a 0.08%.

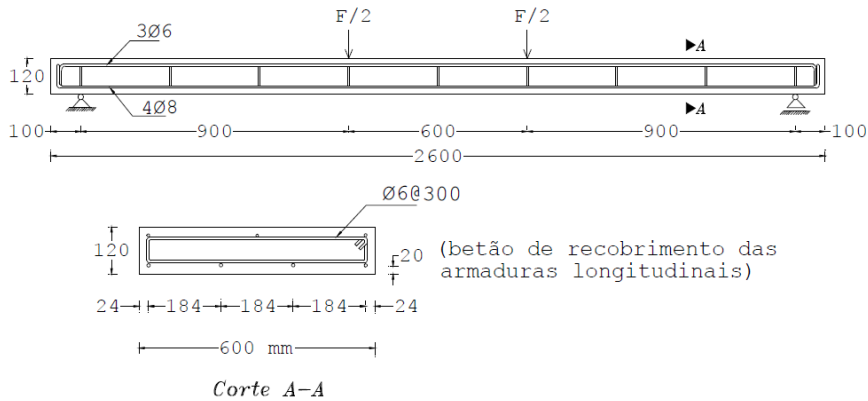


Figura 32 - Informação geral sobre as lajes de betão armado ensaiadas por Hosseini *et al.* (2014) (dimensões em mm).

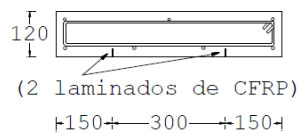


Figura 33 - Seção transversal das lajes de betão armado reforçadas, usando a técnica NSM, com laminados de CFRP (Hosseini *et al.*, 2014) (dimensões em mm).

O procedimento de aplicação dos níveis de pré-tensão nos laminados de CFRP nas lajes S2L-20 e S2L-40 foi semelhante ao realizado no trabalho experimental de Costa (2014), anteriormente referido.

Na Figura 34 apresenta-se as curvas força vs flecha a meio-vão das quatro lajes que foram ensaiadas com um carregamento monotónico até à rotura. Da análise desta figura é possível constatar que as lajes reforçadas com os laminados de CFRP inseridos, independentemente do nível de pré-tensão, apresentam três estados principais de comportamento, à semelhança do que foi referido anteriormente no âmbito da investigação de Barros e Fortes (2005). O aparecimento de um troço reto nas curvas das lajes reforçadas após a cedência das armaduras justifica-se pois nesta fase apenas o compósito contribui para o aumento da capacidade resistente da laje.

Na Tabela 12 são apresentados os principais resultados obtidos nas lajes testadas por Hosseini *et al.* (2014), em termos de valores da carga de serviço (F_{serv}), da carga correspondente à cedência das armaduras de aço (F_{sy}), da carga máxima (F_{max}) e da flecha a meio-vão correspondente às cargas F_{sy} ($u_{F_{sy}}$) e F_{max} ($u_{F_{max}}$). A Figura 35a) apresenta o efeito do nível de pré-tensão aplicado nos laminados de CFRP em termos do acréscimo de carga de serviço e de carga máxima, tendo como base o valor obtido para as referidas cargas na laje de referência sem CFRP. A Figura 35b) apresenta o efeito do aumento da pré-tensão dos laminados de CFRP na flecha a meio-vão correspondente à carga máxima, tendo como base o valor obtido para a referida flecha na laje de referência sem CFRP.

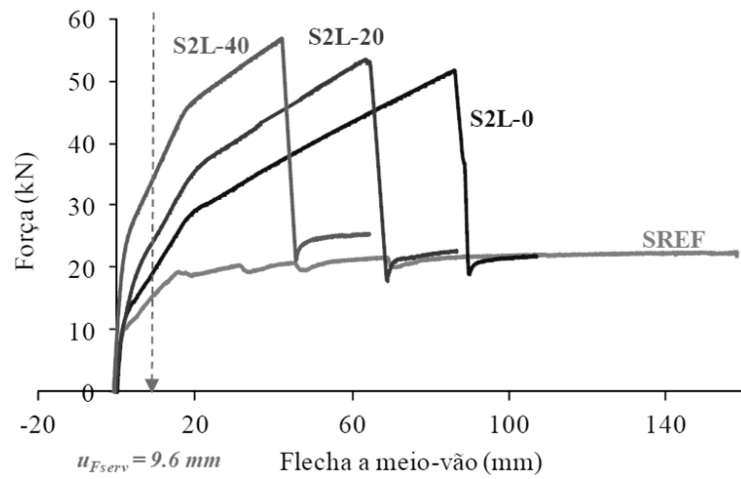
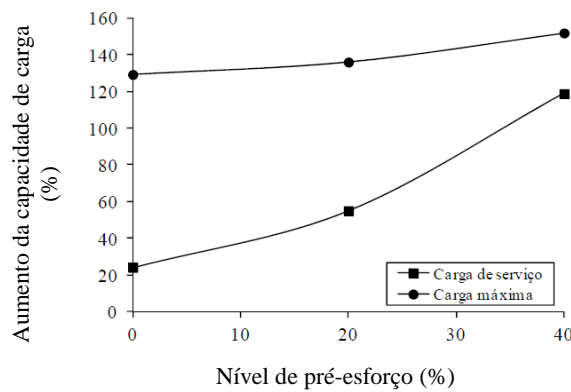


Figura 34 - Relação força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas por Hosseini *et al.* (2014).

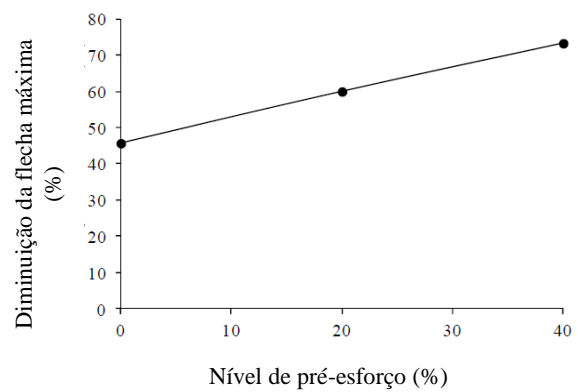
Tabela 12 - Compilação de resultados obtidos em termos de forças e flechas (Hosseini *et al.*, 2014).

Laje	Serviço		Cedência		Rotura			
	F_{serv} (kN) ⁽¹⁾	Acréscimo de carga de serviço (%)	F_{sy} (kN)	u_{Fsy} (mm)	F_{max} (kN)	u_{Fmax} (mm)	Acréscimo de carga máxima (%)	Diminuição da flecha máxima (%)
SREF	15.89	----	19.00	14.81	22.60	158.15	----	----
S2L-0	19.76	24.35	29.52	20.63	51.80	85.90	129.20	45.68
S2L-20	24.65	55.13	35.66	20.16	53.33	63.33	135.97	59.96
S2L-40	34.76	118.75	45.65	17.86	56.90	42.29	151.77	73.26

⁽¹⁾ F_{serv} : carga de serviço registada para a flecha correspondente a estados limites de serviço que de acordo com o Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010) vale $L/250$, em que L é o vão livre das lajes ($L/250 = 2400 \text{ mm}/250 = 9.6\text{mm}$).



(a)



(b)

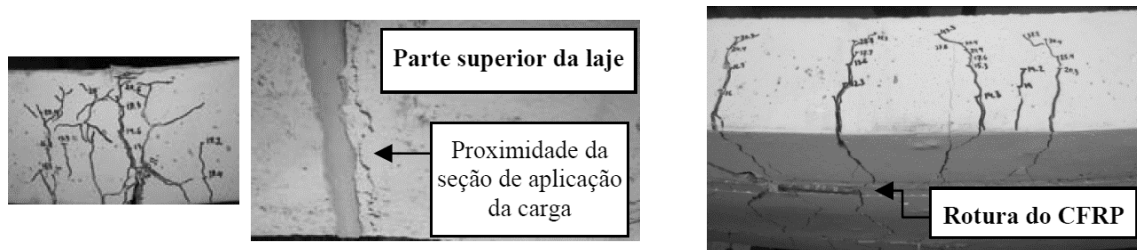
Figura 35 - a) Aumento da capacidade de carga vs nível de pré-esforço no CFRP; b) Diminuição da flecha máxima vs nível de pré-esforço no CFRP (Dias *et al.*, 2014a).

Com base na Tabela 12 e na Figura 35a) verificou-se que a aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados resultou em aumentos significativos na capacidade de carga em serviço e na rotura. O efeito da aplicação da pré-tensão nos laminados de CFRP foi

mais evidente em termos de carga de serviço. Com efeito, enquanto que os acréscimos de carga de serviço para lajes com 0%, 20% e 40% de pré-tensão nos laminados foram de, respetivamente, 24.35%, 55.13% e 118.75%, os acréscimos de carga máxima foram de, respetivamente, 129.20%, 135.97% e 151.77%. Relativamente à carga de cedência das armaduras (F_{sy}), esta aumentou com o acréscimo do nível de pré-tensão aplicado nos laminados de CFRP.

Em relação aos valores da flecha a meio-vão correspondente à carga máxima das lajes ($u_{F_{max}}$), da análise da Tabela 12 e da Figura 35b) verificou-se que a aplicação de 0%, 20% e 40% de pré-tensão nos laminados de CFRP, tendo como base a laje de referência sem CFRP, diminuiu a flecha máxima ($u_{F_{max}}$) em 45.68%, 59.96% e 73.26%, respetivamente. Desta forma verificou-se que com o aumento do nível de pré-tensão nos laminados ocorreu uma diminuição da capacidade deformacional na rotura das lajes.

Os modos de rotura que ocorreram nas lajes ensaiadas por Hosseini *et al.* (2014) foram: esmagamento do betão na zona comprimida com as armaduras longitudinais tracionadas em cedência, que ocorreu na laje SREF (Figura 36a)), e rotura dos laminados de CFRP com as armaduras longitudinais tracionadas em cedência, que ocorreu nas lajes reforçadas (Figura 36b)).



(a) Esmagamento do betão da laje SREF

(b) Rotura do CFRP nas lajes reforçadas com CFRP

Figura 36 - Modos de rotura nas lajes de betão armado ensaiadas (Dias *et al.*, 2014a).

Na Tabela 13 é apresentada uma compilação de resultados experimentais sobre o reforço à flexão de estruturas de betão armado com CFRP pré-tensionados aplicados com a técnica NSM. Assim, para cada programa experimental, são apresentadas as especificações dos modelos (elemento estrutural, designação dos modelos e dimensões dos modelos), a caracterização do betão (resistência à compressão do betão (f_{cm})), a caracterização das armaduras (quantidade e tensão de cedência (f_y)), a caracterização da solução de reforço de CFRP adotada (nível de pré-tensão no CFRP, quantidade, tensão de rotura (f_f) e módulo de elasticidade (E_f)) e, por fim, apresenta-se os resultados dos ensaios (carga de início de fendilhação do betão (F_{cr}), carga de

cedência das armaduras (F_{sy}), carga máxima (F_{max}), deslocamento associado à carga máxima e os modos de rotura ($u_{F_{max}}$). A Tabela 13, tem como objetivo avaliar o efeito da aplicação da técnica NSM com compósitos de CFRP pré-esforçados no reforço à flexão de elementos estruturais de betão armado, em termos de capacidade de carga, deformação, ductilidade e modos de rotura.

A partir dos resultados obtidos nos trabalhos experimentais analisados e das informações na Tabela 13, podem ser referidas as seguintes constatações sobre o efeito da aplicação da técnica NSM com CFRP pré-esforçado no reforço à flexão de elementos estruturais de betão armado:

- Em todos os elementos estruturais reforçados com CFRP houve um acréscimo em termos de capacidade de carga no início de fendilhação, de carga de cedência das armaduras e na carga máxima, independentemente do nível de pré-esforço aplicado ao laminado/varão de CFRP. O aumento das cargas de início de fendilhação e de cedência das armaduras foi tanto maior quanto maior o nível de pré-esforço no CFRP;
- Os resultados demonstraram que nos elementos estruturais reforçados com laminados/varões de CFRP pré-esforçados existe uma diminuição da flecha a meio-vão correspondente à carga máxima. Essa diminuição é tanto maior quanto maior o nível de pré-esforço;
- Existe uma diminuição do índice de ductilidade com o aumento do nível pré-esforço no CFRP. Com efeito, os resultados experimentais existentes sugerem a adoção de um limite superior do nível de pré-esforço para ser aplicado aos laminados/varões de CFRP, de modo a não comprometer a ductilidade da estrutura de betão armado reforçada à flexão de acordo com a técnica de reforço em análise;
- Os elementos estruturais reforçados com laminados/varões de CFRP pré-esforçados tiveram, na sua maioria, como modo de rotura o esgotamento da capacidade máxima resistente à tração do CFRP (rotura do CFRP);
- O comprimento da zona de fendilhação nas estruturas de betão armado reforçadas com laminados/varões de CFRP não pré-esforçados foi maior quando comparado com elementos estruturais sem reforço de CFRP. O aumento do nível pré-esforço no CFRP inverteu esta tendência, ou seja, quanto maior o nível de pré-tensão menos extensivo foi o padrão de fendilhação nos elementos estruturais.

Tabela 13 - Reforço à flexão usando a técnica NSM com CFRP pré-esforçados - compilação de resultados experimentais.

Ref.	Especificações dos modelos			Betão f_{cm} (MPa)	Armaduras		CFRP				Resultados dos ensaios				
	Elemento estrutural	Designação	$b \times h \times l$ (m ³)		Quantidade	f_y (MPa)	Nível de pré-esforço (%)	Quantidade	f_f (MPa)	E_f (GPa)	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	u_{Fmax} (mm)	Modo de rotura
[1]	Vigas	B00	0.2×0.4×5.15	46	3Ø16 (tração) e 2Ø10 (compressão)	475	----	2 laminados com 2×16 mm ² de seção transversal	2610	145	11	78	84	152	[a]
		B1 - 0%		46			0				16	92	135	118	[b]
		B1 - 20%		43			20				22	106	148	103	[b]
		B1 - 40%		40			40				30	112	149	77	[b]
		B1 - 60%	40	60	42	126	149	58	[b]						
[2]	Vigas	Control	0.152×0.254×3.5	45	2Ø15 (tração) e 2Ø11.2 (compressão)	440±4	----	1 varão com 9.5 mm de diâmetro	1970	136	10.20	55.10	65	85.30	[a]
		Prestress - 0					11 ⁽¹⁾				70 ⁽¹⁾	97	65.50	[a]	
		Prestress - 40					28 ⁽¹⁾				95 ⁽¹⁾	115	45 ⁽¹⁾	[b]	
		Prestress - 60					37.5 ⁽¹⁾				105 ⁽¹⁾	112	33 ⁽¹⁾	[b]	
[3]	Vigas	Control	0.2×0.3×3.4	31	3Ø9.53 (tração) e 3Ø12.7 (compressão)	426 (Ø9.53) 481 (Ø12.7)	----	1 varão com 9.5 mm de diâmetro	2500	135	19 ⁽²⁾	43.82	49.14	46.49	[d]
		SL90-E-0					22 ⁽²⁾				63.71	112.80	61.89	[d]	
		SL90-E-20					30 ⁽²⁾				79.10	119.13	53.78	[b]	
		SL90-E-40					31 ⁽²⁾				90.18	118.15	38.46	[b]	
[4]	Vigas	B00	0.2×0.4×5.15	46	3Ø16 (tração) e 2Ø10 (compressão)	475	----	1 varão com 9 mm de diâmetro	2810	165	11	78	84	152	[a]
		B2 - 0%		36			0				15	90	136	115	[b]
		B2 - 20%		41			20				22	105	138	82	[b]
		B2 - 40%		40			40				28	112	140	79	[b]
		B2 - 60%		36			60				35	115	135	50	[b]
[5]	Vigas	Control	0.15×0.3×3.5	53	2Ø16 (tração) e 4Ø8 (compressão)	473	----	1 varão com 7.9 mm de diâmetro	2800	155	13.37	68.13	79.39	108.70	[a]
		PBFB					40				27.70	94.44	123.78	48.06	[b]
		PBFB2					40				32.44	91.24	119.99	49.66	[b]
		PBFB3					40				33.55	90.49	119.73	56.35	[b]
		PBFB4					40				32.63	87.17	115.77	63.51	[b]
		PBFB5					40				32.06	86.85	109.66	55.22	[c]
		PBPF - 60					60				39.84	105.85	124.55	30.76	[b]
		PBFB4 - 60					60				37.87	93.53	116.26	52.65	[b]
[6]	Vigas	B00	0.2×0.4×5.15	40	3Ø16 (tração) e 2Ø10 (compressão)	500 (Ø10) 475 (Ø16)	----	1 varão com 9.0 mm de diâmetro	2068	124	12.5	78.9	83.9	109.9	[a]
		B2 - 0%					0				18.4	90.2	136.4	114.5	[b]
		B2 - 20%					20				22.1	105.7	141.0	92.5	[b]
		B2 - 40%					40				27.9	114.5	141.7	79.3	[b]
		B2 - 60%					60				34.4	117.7	134.7	49.7	[b]
[7]	Vigas	NS-NP	0.3×0.33×3.30	31	5Ø20 (tração) e 2Ø14 (compressão)	423	----	2 laminados com 2×25 mm ² de seção transversal	2066	140	23.5	233.2	254.8	86.45	[a]
		S-NP					0				23.5	236.5	280.8	79.88	[c]
		S-PS					5				25	245	284	46.55	[b]
		S-P20					20				30	245.1	292.2	71.36	[b]
		S-P30					30				34	254.4	293	64.04	[b]
[8]	Vigas	SREF	0.15×0.3×2.4	32	2Ø10 (tração) e 2Ø10 (compressão)	516 (Ø10)	----	1 laminado com 1.4×20 mm ² de seção transversal	2000	150	15.5	51.3	61.5	----	[d]
		S1-0%					0				18.7	62.5	93.0	24.456	[b]
		S1-20%					20				27.1	69.9	94.0	19.361	[b]
		S1-30%					30				28.5	75.4	95.2	16.925	[b]
		SREF	0.15×0.3×4.0	48	2Ø10 (tração) e 2Ø10 (compressão)	538 (Ø10)	----	1 laminado com 1.4×20 mm ² de seção transversal	1933	169	9.02	26.95	31.43	----	[d]
		S2-0%					0				13.05	33.45	51.55	60.668	[b]
		S2-20%					20				15.21	37.99	51.00	45.003	[b]
		S2-30%					30				15.20	39.52	50.30	37.467	[b]
		S2-40%					40				19.32	41.59	48.5	29.14	[b]
		S2-50%	50	20.41	45.1	49.53	25.214	[b]							
		SREF	0.15×0.3×4.0	32	2Ø12 (tração) e 2Ø12 (compressão)	520 (Ø12)	----	1 laminado com 1.4×20 mm ² de seção transversal	2021	184	9.76	37.90	48.85	----	[d]
		S3-0%					0				10.07	44.78	63.55	59.017	[b]
		S3-20%					20				12.19	47.75	61.63	45.422	[b]
S3-30%	30	11.43					50.37				61.81	40.719	[b]		
S3-40%	40	15.31					54.77				64.51	34.063	[b]		
S3-50%	50	15.04	55.75	64.54	28.559	[b]									
[9]	Lajes	SREF	0.6×0.12×2.6	47	4Ø8 (tração) e 3Ø6 (compressão)	486 (Ø8) 464 (Ø6)	----	2 laminados com 1.4×20 mm ² de seção transversal	2484	153.2	15.89	19.00	22.60	158.15	[a]
		S2L - 0					0				19.76	29.52	51.80	85.90	[b]
		S2L - 20					20				24.65	35.66	53.33	63.33	[b]
		S2L - 40					40				34.76	45.65	56.90	42.29	[b]

^[1] Gaafar e El-Hacha (2008); ^[2] Badawi e Soudki (2009); ^[3] Jung *et al.* (2009); ^[4] Gaafar e El-Hacha (2009); ^[5] Choi *et al.* (2011); ^[6] El-Hacha e Gaafar (2011); ^[7] Hajhashemi *et al.* (2011); ^[8] Costa (2014); ^[9] Hosseini *et al.* (2014); ⁽¹⁾ Valores retirados diretamente dos gráficos disponíveis por Badawi e Soudki (2009); ⁽²⁾ Valores retirados diretamente dos gráficos disponíveis por Jung *et al.* (2009); ^[a] Esmagamento do betão; ^[b] Rotura do CFRP; ^[c] Descolagem do CFRP; ^[d] Rotura por flexão.

Ao longo deste capítulo procurou-se reunir um conjunto de informação sobre a eficácia da técnica NSM com materiais compósitos de CFRP no reforço à flexão de estruturas de betão armado. Neste contexto foram, também, analisados trabalhos experimentais com o intuito de avaliar o efeito da pré-fendilhação no betão antes da aplicação do reforço de CFRP. O efeito do pré-esforço no CFRP quando aplicado no reforço à flexão de elementos estruturais de betão armado com laminados/varões de CFRP inseridos (técnica NSM) foi também analisado no âmbito do presente capítulo.

No Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho tem vindo a ser feito uma ampla investigação sobre a aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados no reforço à flexão de lajes de betão armado. Nesta linha de investigação está inserido o estudo realizado no âmbito da presente dissertação referente ao comportamento de lajes de betão armado pré-fendilhadas e reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados.

Capítulo 3

Programa experimental

No presente capítulo é apresentado de forma detalhada o programa experimental realizado na presente dissertação com a finalidade de, no âmbito da análise da viabilidade da aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados no reforço de estruturas de betão armado que tendo vindo a ser desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, avaliar experimentalmente o efeito da pré-fendilhação do betão no comportamento de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados. Assim, no presente capítulo apresentam-se os modelos das lajes ensaiados, os resultados da caracterização mecânica dos materiais envolvidos, a descrição da aplicação do reforço de CFRP, assim como, dos sistemas de ensaio usados e a instrumentação utilizada nas lajes. Posteriormente, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no presente programa experimental.

O programa experimental é constituído por quatro lajes de betão armado, que numa primeira fase foram pré-fendilhadas e, posteriormente, reforçadas à flexão com dois laminados de CFRP inseridos pré-tensionados. Com efeito, foram testados dois níveis de pré-tensão no CFRP (20% e 40% da capacidade máxima resistente à tração dos laminados) e, para cada um dos referidos níveis de pré-tensão, foram analisados dois níveis de pré-fendilhação do betão (dois níveis de dano) que foram impostos antes da aplicação do reforço de CFRP. Após se proceder ao reforço das lajes, estas foram sujeitas a ensaios à flexão em quatro pontos de carga com carregamento monotónico até à rotura.

Por forma a atingir os objetivos estabelecidos para a presente dissertação, os resultados experimentais obtidos foram comparados com os que foram alcançados por Dias *et al.* (2014b), em lajes semelhantes às testadas no presente programa experimental (uma laje reforçada à flexão com dois laminados com pré-tensão de 20% e uma laje reforçada à flexão com dois laminados com pré-tensão de 40%) com a diferença de não haver pré-fendilhação no betão. Na análise dos resultados também foi considerada a laje de referência sem reforço de CFRP testada por Dias *et al.* (2014b).

3.1. CONCEÇÃO DOS MODELOS

De acordo com o que foi referido anteriormente, foi elaborado um programa experimental constituído por quatro lajes de betão armado (lajes S2L-20-PC1, S2L-20-PC2, S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2). Na designação das lajes, a sigla S2L refere-se ao facto da laje ser reforçada com dois laminados de CFRP, os números 20 e 40 representam o nível de pré-tensão instalado nos laminados de CFRP e 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). Assim, no programa experimental foram estudados dois níveis de pré-tensão e para cada nível de pré-tensão foram analisados dois níveis de dano (pré-fendilhação) que foram impostos antes da aplicação do reforço de CFRP.

As lajes apresentavam uma seção transversal de 600 mm de largura e 120 mm de altura ($600 \times 120 \text{ mm}^2$), um comprimento de 2600 mm e uma distância entre apoios de 2400 mm (Figura 37). Todas as lajes apresentavam, em termos de armadura longitudinal de tração, quatro varões de aço nervurado de 8 mm de diâmetro ($4\text{Ø}8$) e, em termos de armadura longitudinal de compressão, três varões de aço nervurado de 6 mm de diâmetro ($3\text{Ø}6$). Para armadura transversal foram adotados varões de aço nervurado de 6 mm de diâmetro espaçados de 300 mm ($\text{Ø}6@300\text{mm}$). O betão de recobrimento das armaduras longitudinais foi de 31 mm.

Os laminados de CFRP aplicados, de acordo com a técnica NSM, tinham uma seção transversal de $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ e o comprimento de colagem do CFRP ao betão foi de 2300 mm. Os laminados foram colocados com um espaçamento entre eles de 300 mm de acordo com a disposição representada na Figura 38.

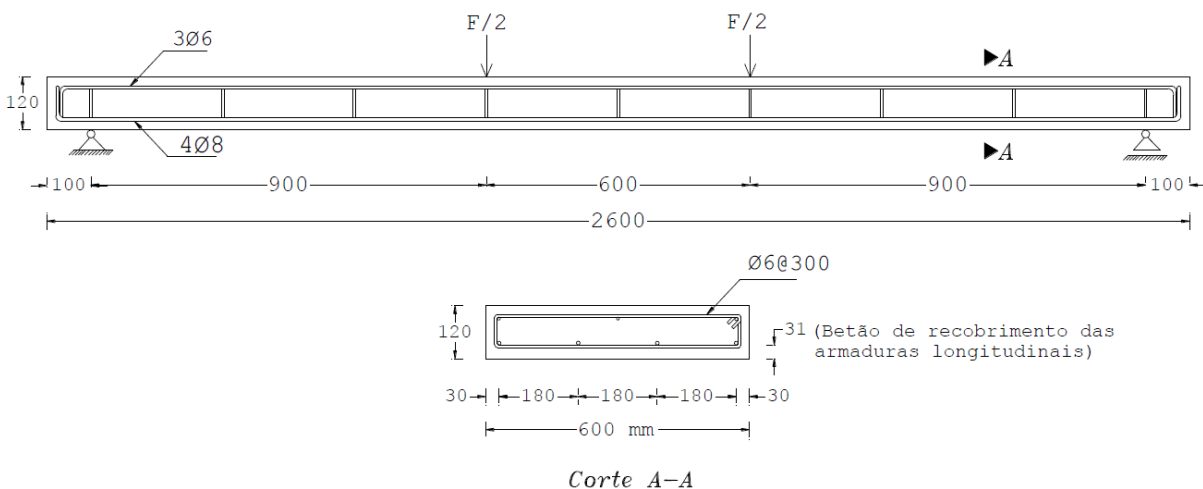


Figura 37 - Geometria das lajes ensaiadas (dimensões em mm).

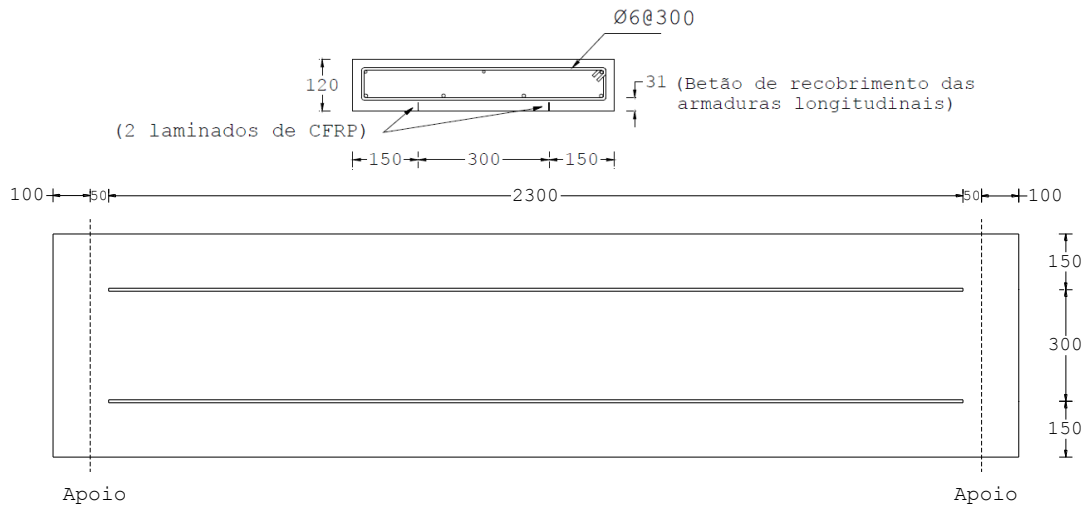


Figura 38 - Solução de reforço de CFRP das lajes testadas (dimensões em mm).

A percentagem de armadura longitudinal (ρ_{sl}) das lajes, obtida por intermédio da equação (1), era de 0.39%. Na equação (1), A_{sl} é a área de aço correspondente às armaduras longitudinais de tração (4Ø8), ou seja, $A_{sl} = 201.06 \text{ mm}^2$, $b_w = 600 \text{ mm}$ é a largura da seção transversal da laje e d é a distância da fibra de betão mais comprimida ao baricentro dos varões de aço da armadura longitudinal de tração ($d = 85 \text{ mm}$).

$$\rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \times 100 \tag{1}$$

As lajes apresentavam uma percentagem de reforço de CFRP (ρ_f) de 0.08%, que foi obtida por intermédio da equação (2), onde 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 seção transversal das lajes ($A_c = 600 \times 120 = 72000 \text{ mm}^2$):

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

Na Tabela 14 apresentam-se as principais informações relativas às lajes ensaiadas no presente programa de ensaios.

Tabela 14 - Informações gerais das lajes ensaiadas.

Laje	ρ_{sl} (%) ⁽¹⁾	Reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos		Nível de pré-esforço (%) ⁽³⁾	Nível de dano
		Quantidade	ρ_f (%) ⁽²⁾		
S2L-20-PC1	0.39	2 laminados com seção de $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ ($A_f = 56 \text{ mm}^2$)	0.08	20	1
S2L-40-PC1				40	
S2L-20-PC2				20	2
S2L-40-PC2				40	

⁽¹⁾ Percentagem de armadura longitudinal tracionada; ⁽²⁾ Percentagem de reforço de CFRP; ⁽³⁾ Percentagem da capacidade máxima resistente à tração dos laminados de CFRP.

Na Figura 39 apresenta-se alguns detalhes relativamente à conceção das lajes, designadamente:

- i) após a montagem das armaduras e posterior colocação das armaduras nas cofragens (Figura 39a));
- ii) instrumentação das armaduras com extensómetros elétricos e posicionamento dos espaçadores nas armaduras de modo a garantir a espessura do betão de recobrimento pretendida (31 mm) (Figura 39b));
- iii) a betonagem, em que foram betonados em simultâneo as lajes (Figura 39c)) e respetivos provetes cilíndricos para posterior caracterização do betão (Figura 39d));
- iv) o aspeto final das lajes após a descofragem (Figura 39e)).

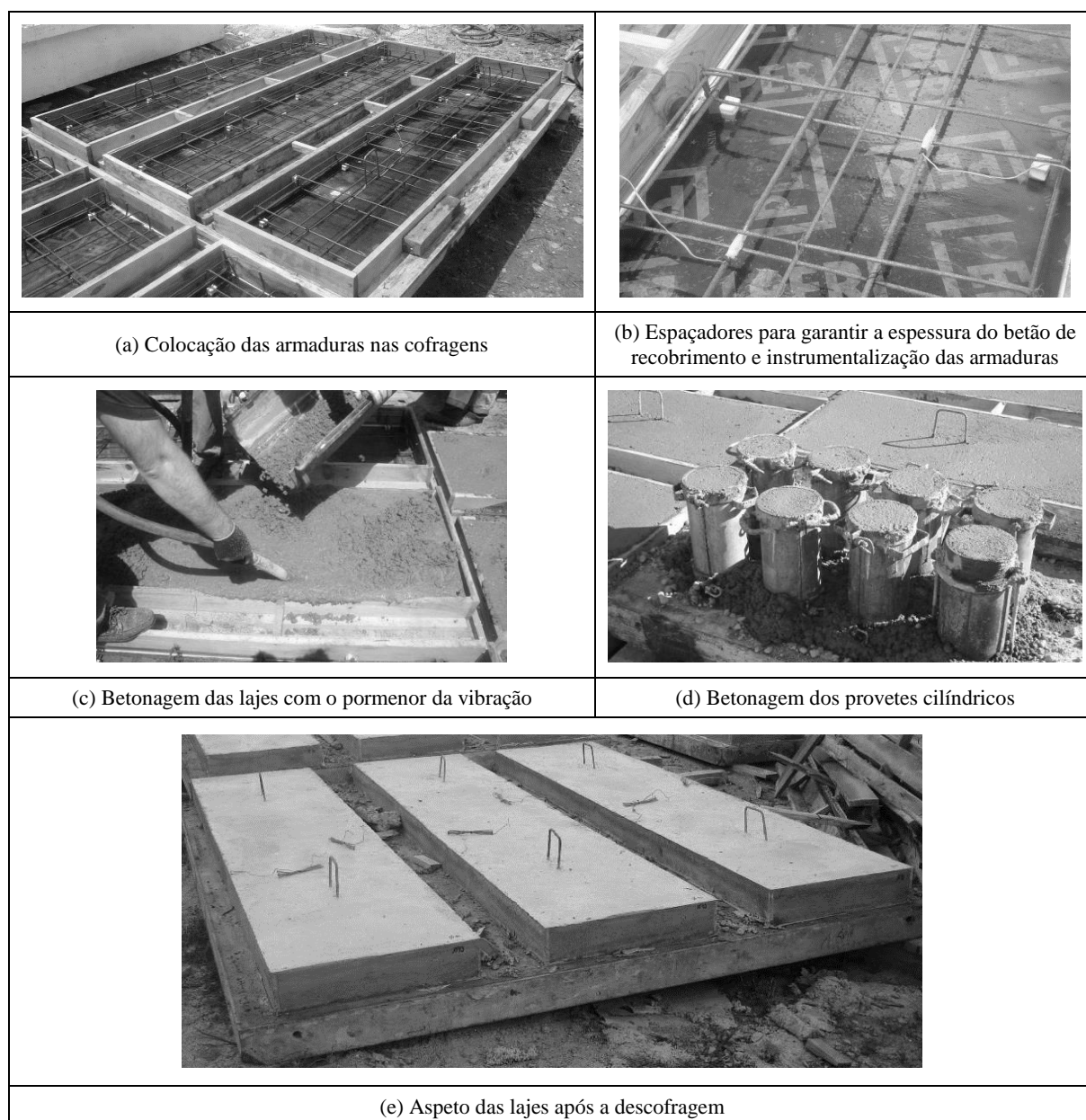


Figura 39 - Execução das lajes de betão armado utilizadas no programa experimental.

3.2. CARATERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta seção apresentam-se os resultados dos ensaios realizados no âmbito da caracterização das principais propriedades dos materiais utilizados no presente programa experimental, nomeadamente, o betão, o aço, os laminados de CFRP e o adesivo epoxídico. No âmbito da presente dissertação apenas foram realizados, no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, os ensaios de caracterização do betão à data dos ensaios das quatro lajes (Tabela 14). A caracterização do aço das armaduras e dos laminados de CFRP foi feita por Dias *et al.* (2014b) e a do adesivo epoxídico foi efetuada por Costa e Barros (2013).

De forma a caracterizar o betão utilizado na conceção das lajes, à data da realização dos ensaios das lajes, em termos do valor médio de resistência à compressão (f_{cm}) e de módulo de elasticidade (E_{cm}) foram efetuados ensaios experimentais seguindo o estipulado nas normas NP EN 206-1 (2007) e LNEC E397-1993 (1993), respetivamente. Nestes ensaios foram usados dois provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura (Figura 40). Na Tabela 15 estão registados os valores médios obtidos para as propriedades do betão que foram avaliadas experimentalmente (f_{cm} e E_{cm}).

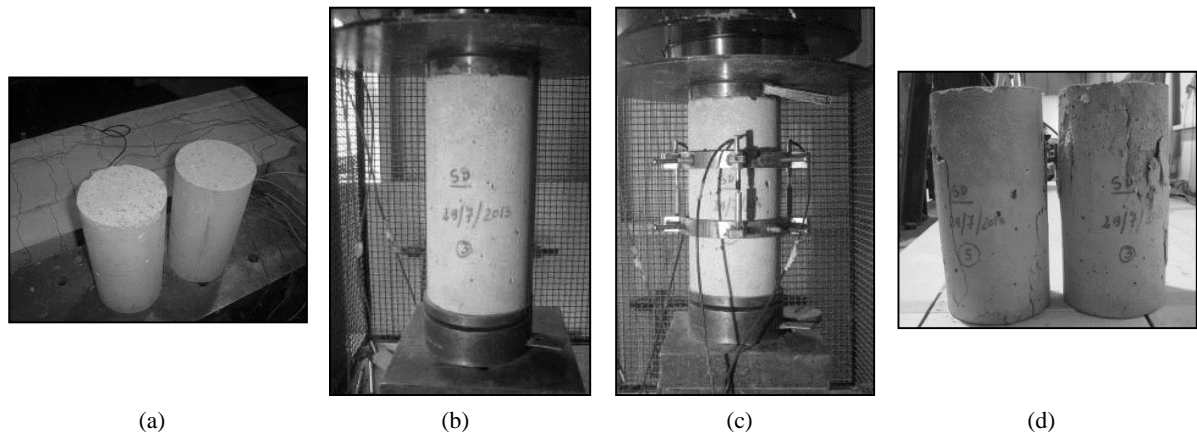


Figura 40 - Caraterização do betão: a) Provetes de betão; b) Ensaio para determinação da resistência à compressão; c) Ensaio para determinação do módulo de elasticidade; d) Modo de rotura dos provetes.

As lajes de betão armado ensaiadas continham varões de aço nervurado de duas gamas de diâmetro, 6 mm e 8 mm. Para avaliar as principais propriedades de cada tipo de aço efetuaram-se experimentalmente ensaios de tração uniaxial segundo o estipulado na NP EN 10002-1 (1990). Na Figura 41 apresentam-se fotografias ilustrativas dos ensaios de tração uniaxial efetuados para a caracterização do aço das armaduras e os modos de rotura dos provetes de aço (foram testados para cada tipo de aço cinco provetes, cada um com 500 mm de comprimento).

Na Tabela 15 estão apresentados, para cada tipo de aço, os valores médios das propriedades mecânicas obtidos experimentalmente.

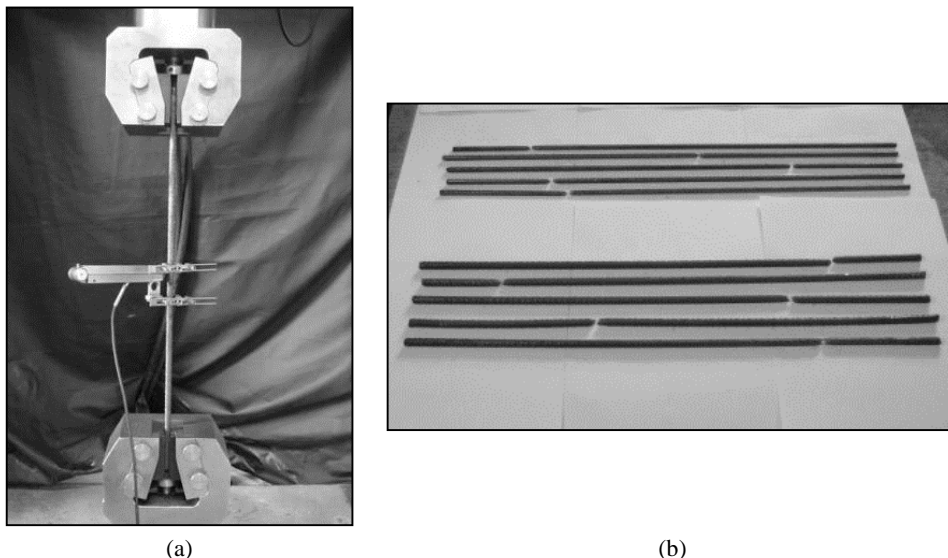


Figura 41 - Caracterização do aço: a) Ensaio de tração uniaxial; b) Modo de rotura dos provetes.

Os laminados de CFRP utilizados para o reforço à flexão das lajes ensaiadas apresentavam uma seção transversal de $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$, com a designação de S&P CFK150/2000 e que foram fornecidos em rolos de 150 m de comprimento. As propriedades dos laminados de CFRP foram obtidos por intermédio da realização de ensaios de tração uniaxial, segundo a ISO 527-5 (1997). Na Figura 42 apresenta-se o ensaio de tração uniaxial de um provete de laminado de CFRP e o modo de rotura típico ocorrido. Na Tabela 15 estão registados os valores médios das propriedades do laminado de CFRP usado para o reforço das lajes, concretamente, da resistência máxima à tração, do módulo de elasticidade e da extensão máxima.

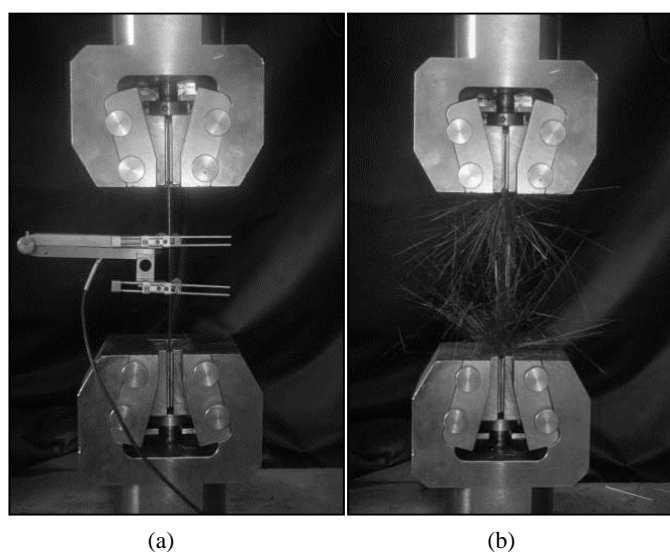


Figura 42 - Caracterização dos laminados de CFRP: a) ensaio de tração uniaxial; b) modo de rotura.

Para fixar os laminados de CFRP ao betão, utilizou-se um adesivo epoxídico do mesmo fornecedor dos laminados de CFRP, cuja designação comercial é “S&P Resin 220 epoxy adhesive” (Figura 43). Este material é constituído por duas componentes: a resina (Componente A) e o endurecedor (Componente B). A razão recomendada para o fabrico do adesivo é de quatro unidades de componente A por cada unidade de componente B, ou seja, para a fabrico de 100gr. de adesivo é necessário efetuar uma mistura que contenha 80gr. da componente A e 20gr. da componente B. Os valores médios das principais propriedades do adesivo epoxídico usado no reforço das lajes foram obtidos por Costa e Barros (2013) e estão apresentados na Tabela 15.

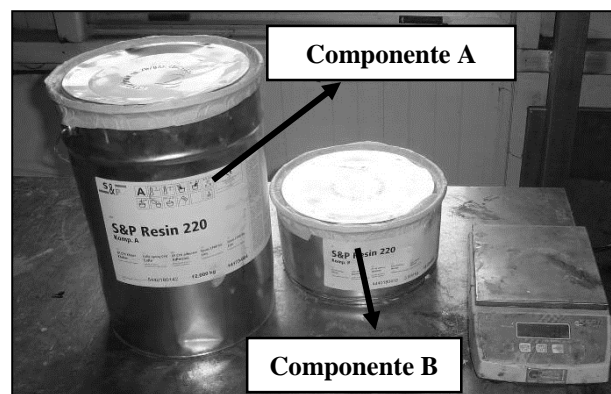


Figura 43 - Adesivo epoxídico utilizado para colagem dos laminados de CFRP.

Tabela 15 - Principais propriedades do betão, do aço, dos laminados de CFRP e do adesivo epoxídico.

Betão	Resistência à compressão $f_{cm} = 39.9 \text{ MPa}$	Módulo de elasticidade $E_{cm} = 33.4 \text{ GPa}$	
Aço	Resistência à tração f_{sym} (Tensão de cedência)	Ø6 527.6 MPa	Ø8 556.4 MPa
	f_{sum} (Tensão última)	651.4 MPa	679.9 MPa
Laminado de CFRP	Resistência à tração $f_{fum} = 2770.1 \text{ MPa}$ (Tensão última)	Módulo de elasticidade $E_{fm} = 175.7 \text{ GPa}$	Extensão última $\varepsilon_{fum} = 15.8 \%$
Adesivo epoxídico	Resistência à tração $f_{fa} = 20.0 \text{ MPa}$	Módulo de elasticidade $E_a = 7.0 \text{ GPa}$	

3.3. APLICAÇÃO DO REFORÇO À FLEXÃO COM LAMINADOS DE CFRP INSERIDOS PRÉ-TENSIONADOS

Para aplicação do reforço à flexão (laminados de CFRP pré-tensionados) nas quatro lajes de betão armado foi usado o sistema de aplicação de pré-tensão no CFRP instalado no Laboratório

de Estruturas (LEST) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Minho. As tarefas que foram executadas no âmbito da aplicação do reforço das lajes foram:

- execução dos entalhes no betão de recobrimento da face tracionada de cada laje, recorrendo a uma máquina de corte. Os entalhes tinham cerca de 5 mm de largura e 25 mm de profundidade;
- limpeza das lajes com jato de ar-comprimido, procurando-se retirar todo o pó provocado pela abertura dos entalhes;
- pintura das lajes de cor branca para uma melhor observação do desenvolvimento do padrão de fendilhação ao longo dos ensaios;
- marcação na laje da posição dos pontos de aplicação da carga e dos apoios, assim como da localização dos transdutores de deslocamentos usados (LVDT's - *Linear Variable Differential Transformer*);
- introdução da laje na pista de pré-tensão, que ficou colocada em cima de rolos de aço, usados quer para facilitar o manuseamento das lajes no interior da pista como para garantir que mais tarde a libertação do pré-tensionamento seja feita em simultâneo em ambas as extremidades da laje (Figura 44a));
- alinhamento da laje na pista de pré-tensão, de forma a que o laminado de CFRP, após pré-tensão, fique posicionado a meio da largura do entalhe (Figura 44b));

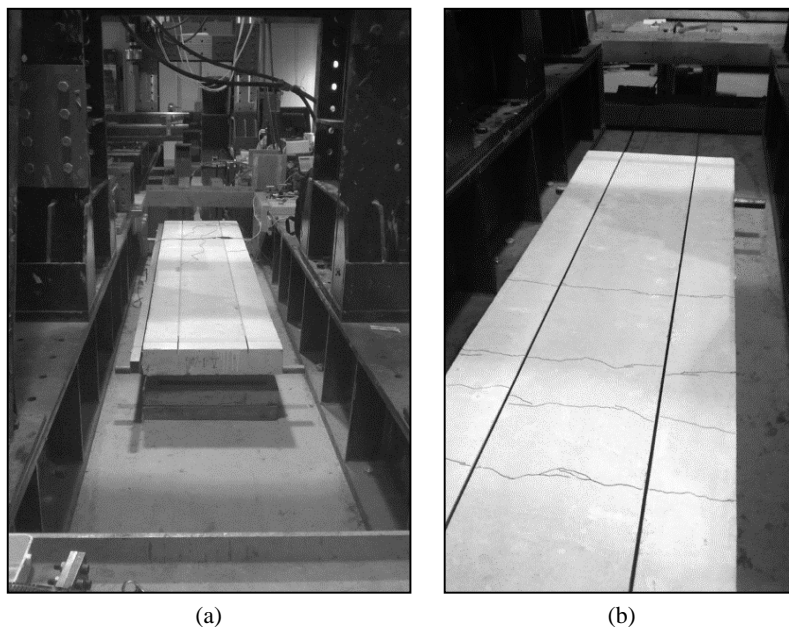


Figura 44 - Posicionamento de uma laje pré-fendilhada na pista de pré-tensão.

- após correta instalação da laje na pista de pré-tensão, procedeu-se à limpeza dos entalhes por intermédio da aplicação de jatos de ar-comprimido (Figura 45a)) por forma a garantir as melhores condições de aderência na ligação betão-adesivo;

- os laminados de CFRP, fornecidos em rolo com seção transversal de $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$, foram cortados, de acordo com o representado na Figura 45b), transversalmente ao eixo das fibras com o comprimento desejado. Após este corte, os laminados de CFRP, já ancorados num dos lados, foram inseridos na extremidade passiva (Figura 45c)). De seguida, efetuou-se a regularização da superfície dos laminados nas zonas onde foram colados os extensómetros elétricos, com recurso a uma lixa e posterior limpeza com acetona (Figura 45d)), eliminando-se assim qualquer tipo de sujidade que os laminados poderiam conter (pó, gorduras, etc.). Posteriormente à secagem da acetona, os extensómetros elétricos, em posições previamente definidas, foram colados aos laminados com “super-cola 3” com vista à medição das extensões nos mesmos (Figura 45e));
- na extremidade ativa, os laminados foram tensionados por intermédio de macacos hidráulicos (Figura 45f)). Tal como referido anteriormente, a força de pré-tensão aplicada nos laminados das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 e das lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 foi a correspondente a cerca de, respetivamente, 20% e 40% da tensão máxima resistente à tração dos laminados de CFRP. A força de pré-esforço foi aplicada com incrementos de carga de 0.5 kN/min;

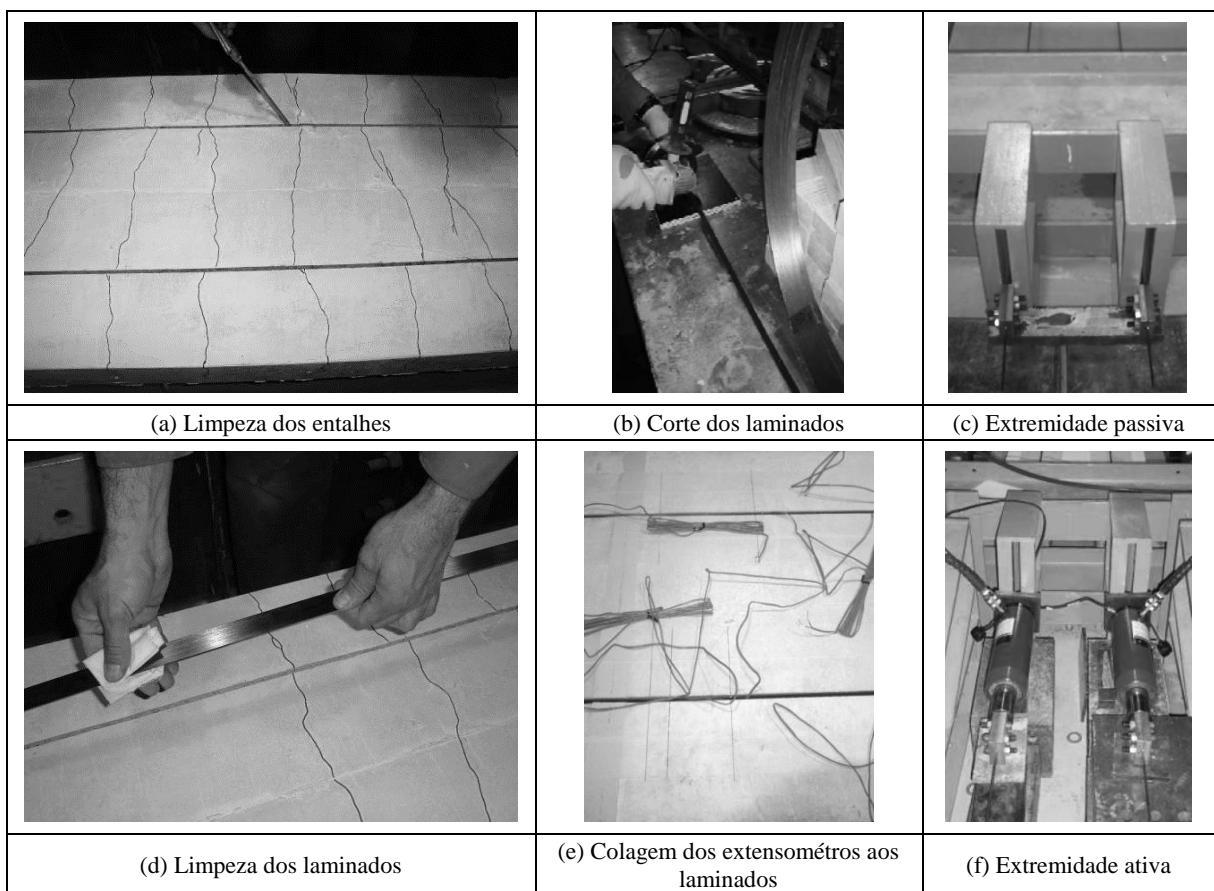


Figura 45 - Alguns dos procedimentos da aplicação do reforço à flexão de uma laje pré-fendilhada com laminados de CFRP pré-tensionados usando a técnica NSM.

- uma vez aplicada a totalidade da pré-tensão nos laminados de CFRP, procedeu-se à preparação do adesivo epoxídico de acordo com as especificações do fabricante (Figura 46a)) e aplicou-se o mesmo nos entalhes com o auxílio de uma espátula (Figura 46b)). Passados cerca de seis dias, a força de pré-tensão foi aliviada gradualmente (0.3 kN/min), de forma a evitar a ocorrência de elevados gradientes de tensão no processo de transferência de tensões dos laminados para o meio envolvente.

Na Figura 47 é apresentado o aspeto final de uma laje pré-fendilhada e reforçada posteriormente à flexão, usando a técnica NSM, com dois laminados de CFRP pré-tensionados.

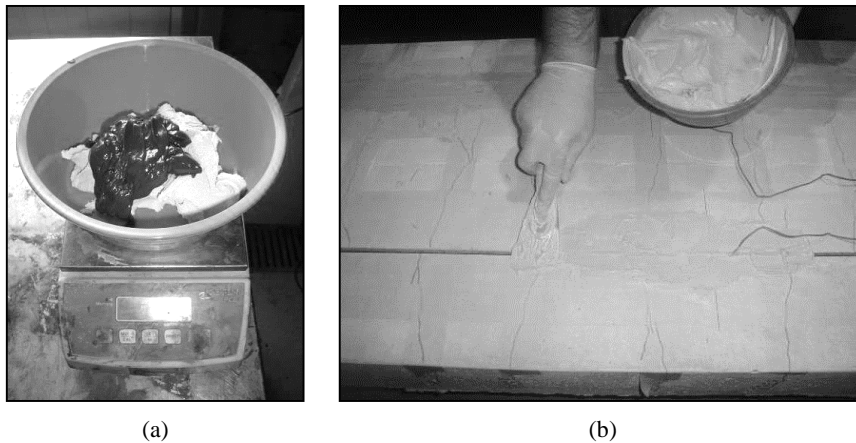


Figura 46 - Procedimentos da aplicação do reforço à flexão aplicando a técnica NSM: a) preparação do adesivo epoxídico e b) aplicação do adesivo epoxídico nos entalhes.

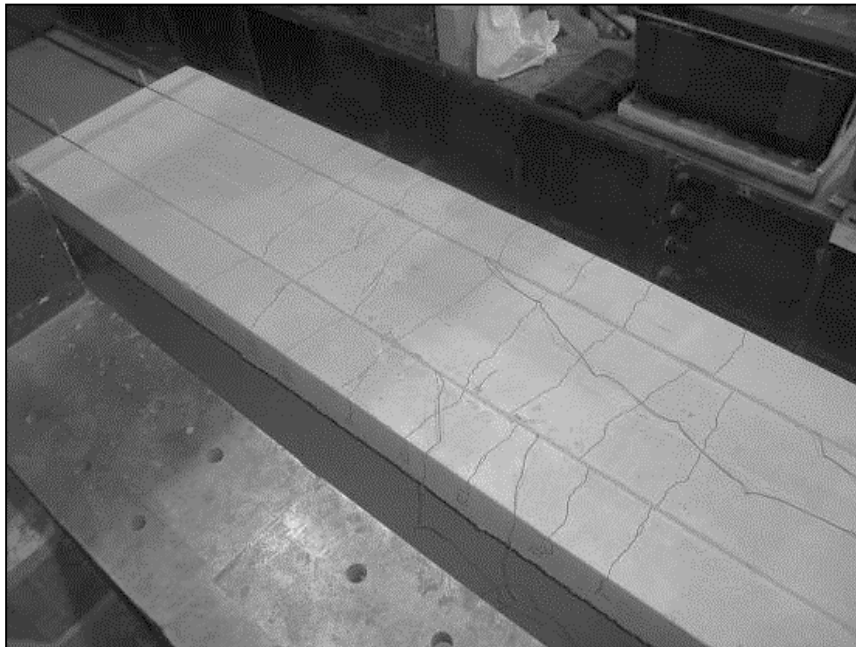


Figura 47 - Aspeto final de uma laje pré-fendilhada e reforçada à flexão com laminados de CFRP inseridos e pré-tensionados.

3.4. SISTEMA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO DAS LAJES

Na realização do presente programa experimental efetuaram-se dois tipos de ensaios à flexão sob quatro pontos de carga (Figura 48). O primeiro tipo de ensaio (ensaio de pré-fendilhação), correspondeu ao carregamento das lajes, previamente à aplicação do reforço de CFRP, até atingirem um determinado nível de dano. Numa fase seguinte, as lajes foram reforçadas à flexão com dois laminados de CFRP pré-tensionados e, posteriormente, foram sujeitas ao segundo tipo de ensaio (ensaio de rotura), que consistiu na solicitação das lajes com um carregamento monotónico até à rotura.

Em ambos os ensaios (pré-fendilhação e rotura) utilizou-se o mesmo pórtico constituído por perfis metálicos, com a aplicação de cargas efetuada através de um macaco comandado por uma bomba hidráulica (Figura 48). Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamentos com uma velocidade de deformação de 0.02 mm/s.

Todas as lajes foram instrumentadas para que fosse possível quantificar a carga aplicada durante o ensaio (utilizada uma célula de carga com capacidade máxima de 500 kN), a deformação das lajes e as extensões, quer nos laminados de CFRP como nas armaduras longitudinais tracionadas. Para medir a deformação ao longo do eixo longitudinal das lajes utilizaram-se cinco transdutores de deslocamentos (LVDT's) posicionados nas seguintes seções: na seção a meio vão, nas duas seções de aplicação da carga e nas duas seções a meio dos vãos de corte, tal como representado na Figura 49. Os LVDT's ficaram suportados num sistema que evita o registo de deslocamentos parasitas (*“Japanese Yoke”*), que se encontra representado na Figura 49.

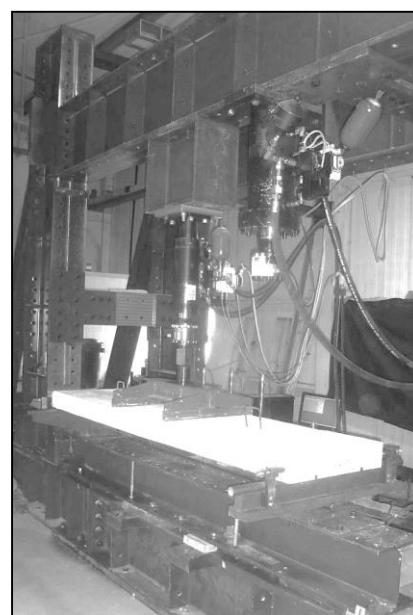
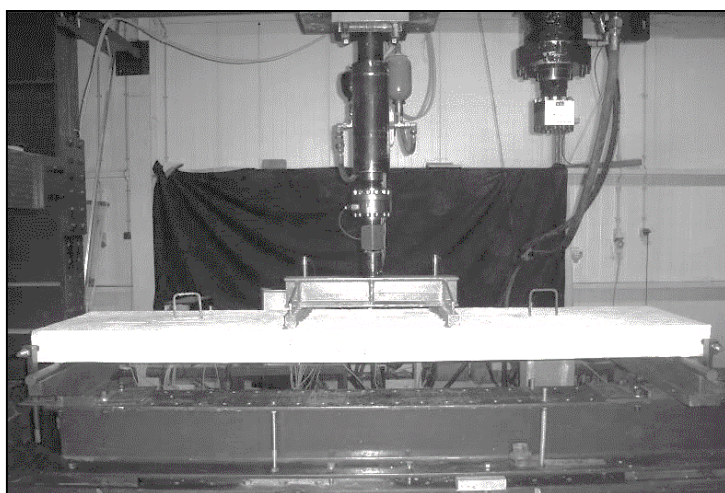


Figura 48 - Esquema geral do ensaio das lajes de betão armado.

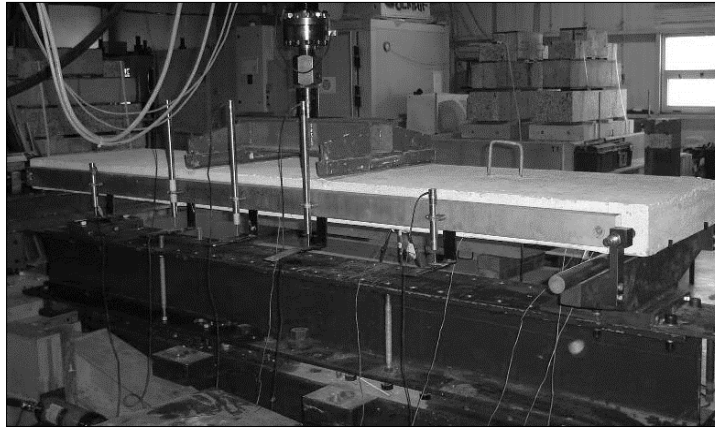
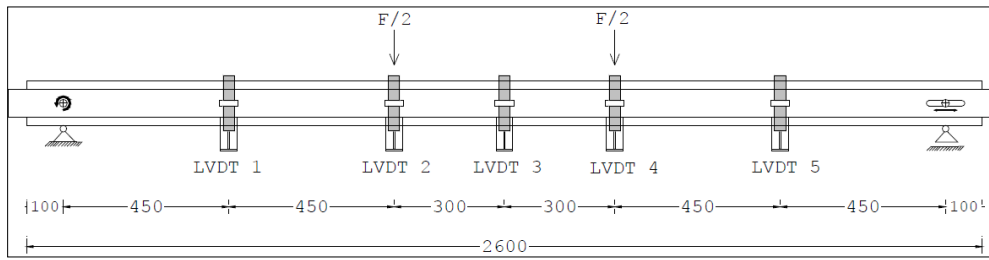
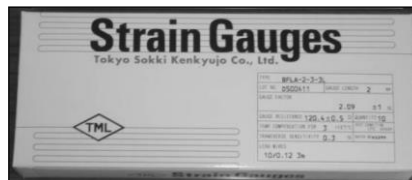
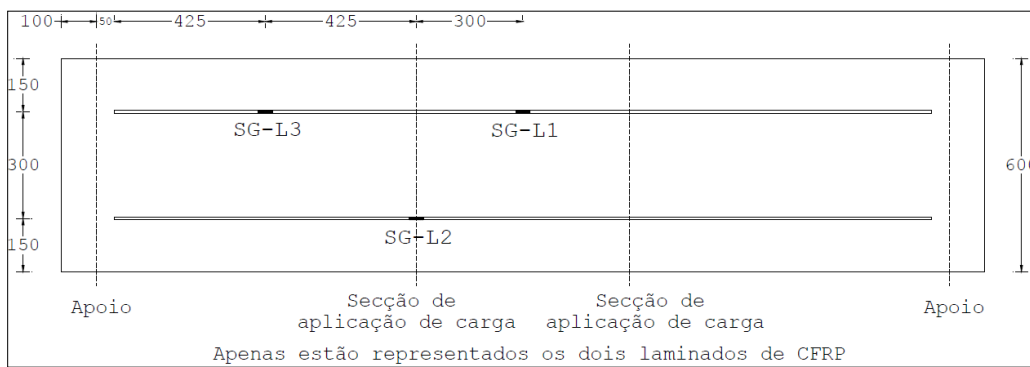


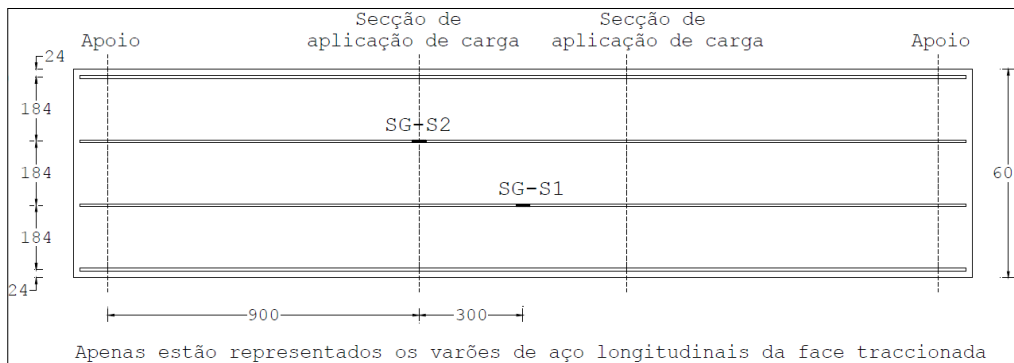
Figura 49 - Posição dos LVDT's nas lajes ensaiadas (dimensões em mm).



(a) Extensômetros elétricos utilizados na instrumentação dos laminados e nos varões de aço



(b) Posição dos extensômetros nos laminados de CFRP (dimensões em mm)



(c) Posição dos extensômetros nos varões de aço longitudinais (dimensões em mm)

Figura 50 - Instrumentação dos laminados de CFRP e dos varões de aço longitudinais.

De modo a obter informações relativas às extensões nos dois laminados utilizados no reforço das lajes ensaiadas, os CFRP foram instrumentados com três extensômetros elétricos (SG-L1, SG-L2 e SG-L3) do tipo representado na Figura 50a). Na Figura 50b) estão identificadas as seções dos laminados de cada laje onde foram colados os SG-L1, SG-L2 e SG-L3. Para avaliar as extensões da armadura longitudinal de tração foram instalados dois extensômetros elétricos (SG-S1 e SG-S2), tal como representado na Figura 39b) e de acordo com a disposição representada na Figura 50c).

3.5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios efetuados em termos de capacidade de carga das lajes de betão armado, dos respectivos padrões de fendilhação e dos modos de rotura. Em primeiro lugar serão expostos os resultados dos ensaios de pré-fendilhação e, posteriormente, os dos ensaios de rotura. Na análise dos resultados das lajes ensaiadas à rotura será tido em consideração, tal como já foi referido anteriormente, o resultado do ensaio de três das lajes testadas por Dias *et al.* (2014b), designadamente: a laje de referência sem CFRP (SREF) e duas lajes reforçadas com laminados de CFRP pré-tensionados, com percentagem de pré-tensão no CFRP de 20% e 40% (lajes S2L-20 e S2L-40).

3.5.1. Ensaio de Pré-fendilhação

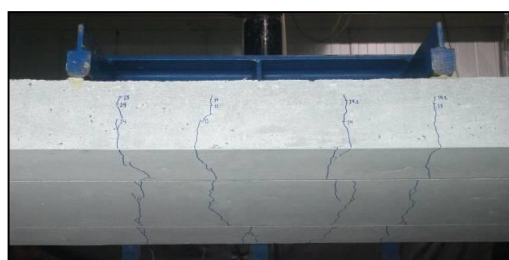
As quatro lajes foram, como anteriormente referido, pré-fendilhadas previamente à aplicação do reforço de CFRP. No ensaio de pré-fendilhação impôs-se uma flecha máxima a meio-vão dependendo do nível de dano (Tabela 16). O valor da flecha máxima imposta, para o primeiro nível de dano (lajes S2L-20-PC1 e S2L-40-PC1), está associado ao valor máximo de flecha a meio-vão permitido regularmente (NP EN 1992-1-1, 2010) para estados limites de serviço ($L/250 = 9.6$ mm, em que L é o vão livre da laje, de valor igual a 2400 mm). O segundo nível de dano foi imposto solicitando as lajes S2L-20-PC2 e S2L-40-PC2 até alcançarem um flecha máxima de 15 mm, que é cerca de 1.5 vezes superior à flecha máxima imposta na instalação do primeiro nível de dano. O valor da flecha máxima a meio-vão de 15 mm corresponde na laje de referência SREF testada por Dias *et al.* (2014b), semelhante às lajes em que foram executados os ensaios de pré-fendilhação antes da aplicação do CFRP, a um valor da força aplicada de cerca de 80% da carga correspondente à cedência das armaduras longitudinais.

Nas Figuras 51 e 52 estão representados os padrões de fendilhação observados nas lajes com 20% de pré-tensão (S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2) e com 40% de pré-tensão (S2L-40-PC1 e S2L-

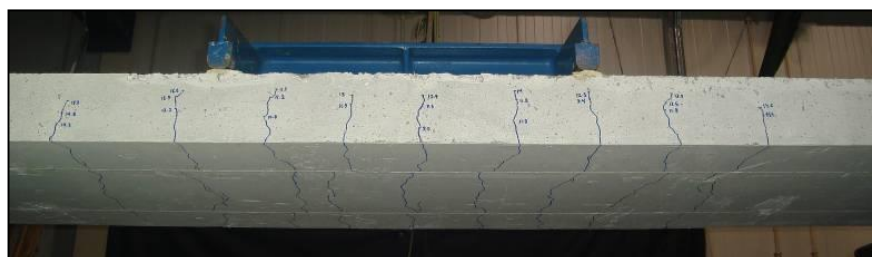
40-PC2) respetivamente, após a realização do ensaio de pré-fendilhação. As primeiras fendas identificadas durante o ensaio de pré-fendilhação, em todas as lajes ensaiadas, foram fendas de flexão pura e surgiram entre os pontos de aplicação de carga. Em comparação com as lajes sujeitas ao primeiro nível de dano no ensaio de pré-fendilhação (lajes S2L-20-PC1 e S2L-40-PC1), visualiza-se a partir das Figuras 51 e 52, que a solicitação das lajes S2L-20-PC2 e S2L-40-PC2 (segundo nível de dano) originou ainda o aparecimento de fendas fora da zona entre os pontos de carga. Com efeito, efetuando uma análise comparativa entre as lajes pré-fendilhadas com o primeiro nível de dano (S2L-20-PC1 e S2L-40-PC1) e as lajes pré-fendilhadas com o segundo nível de dano (S2L-20-PC2 e S2L-40-PC2) verificou-se que houve uma duplicação do número de fendas do primeiro para o segundo nível de dano, ou seja, para este último nível de dano o padrão de fendilhação foi mais extensivo. Desta forma é possível concluir que o padrão de fendilhação final instalado nas lajes foi tanto mais extensivo quanto maior foi a flecha máxima imposta no ensaio de pré-fendilhação.

Tabela 16 - Dados referentes ao ensaio de pré-fendilhação.

Laje	Nível de pré-esforço (%)	Nível de dano	Flecha máxima imposta no ensaio de pré-fendilhação (mm)
S2L-20-PC1 S2L-40-PC1	20 40	1	9.6
S2L-20-PC2 S2L-40-PC2	20 40	2	15

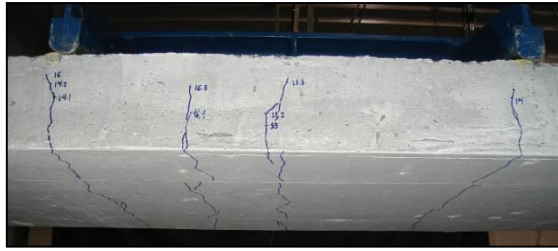


(a) S2L-20-PC1

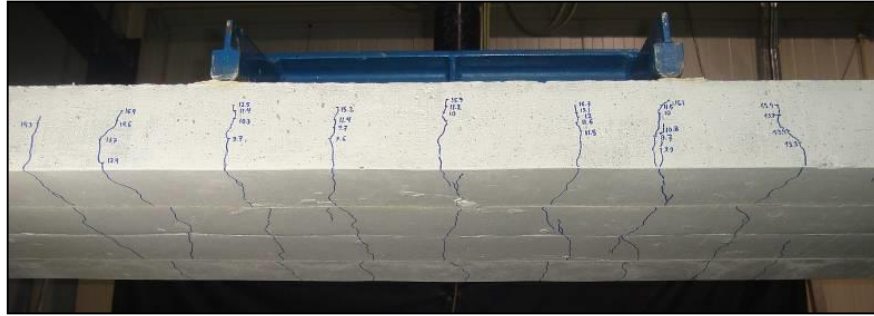


(b) S2L-20-PC2

Figura 51 - Padrão de fendilhação das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 após a realização do ensaio de pré-fendilhação.



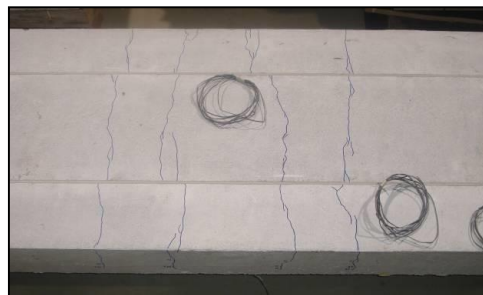
(a) S2L-40-PC1



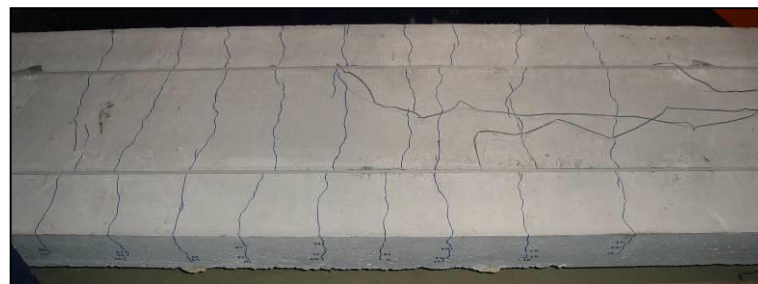
(b) S2L-40-PC2

Figura 52 - Padrão de fendilhação das lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 após a realização do ensaio de pré-fendilhação.

O ensaio de pré-fendilhação das lajes de betão armado terminou com a descarga das mesmas. Posteriormente, procedeu-se à intervenção de reforço das lajes de acordo com o procedimento descrito na seção 3.3 deste capítulo. As Figuras 53 e 54 apresentam o aspeto final das lajes com 20% de pré-tensão (S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2) e com 40% de pré-tensão (S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2), pré-fendilhadas e reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados.



(a) S2L-20-PC1

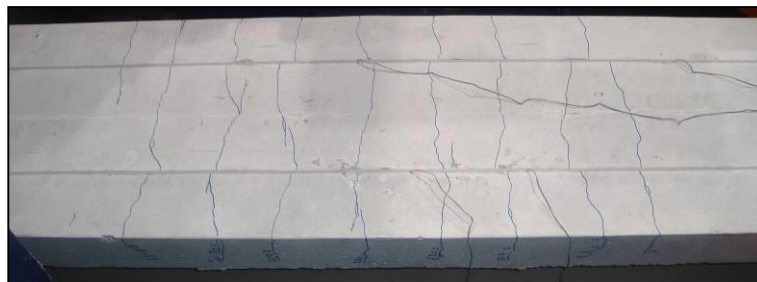


(b) S2L-20-PC2

Figura 53 - Aspeto final das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 após a execução do reforço.



(a) S2L-40-PC1



(b) S2L-40-PC2

Figura 54 - Aspeto final das lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 após a execução do reforço.

3.5.2. Ensaio de Rotura

3.5.2.1. Desenvolvimento do padrão de fendilhação e modos de rotura

Após a aplicação do reforço à flexão com os dois laminados de CFRP inseridos pré-tensionados, as lajes foram sujeitas a um carregamento monotónico até à rotura (ensaio de rotura) de acordo com o descrito na seção 3.4.

As Figuras 55 e 56 ilustram, respetivamente, o padrão de fendilhação das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 (ambas as lajes foram pré-fendilhadas e posteriormente reforçadas com nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20%) nos seguintes instantes: imediatamente antes do início do ensaio de rotura (Figura 55a) e Figura 56a), respetivamente, para as lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2) e no momento em que as lajes atingiram sua capacidade de carga máxima (Figura 55b) e Figura 56b), respetivamente, para as S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2). Nas Figuras 55 e 56 é, também, possível comparar a diferença do nível de deformação das lajes entre o início do ensaio à rotura e quando estas atingiram a sua capacidade de carga máxima. Após o início do ensaio das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2, as fendas resultantes 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 afastadas dos pontos de aplicação da carga. Estas novas fendas surgiram apenas para cargas superiores à máxima atingida no ensaio de pré-fendilhação. A carga máxima registada nas lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 foi de 61.01 kN e de 64.24 kN, respetivamente. Quando a

capacidade de carga máxima das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 foi alcançada a flecha a meio-vão era de 65.92 mm e 69.21 mm, respetivamente.

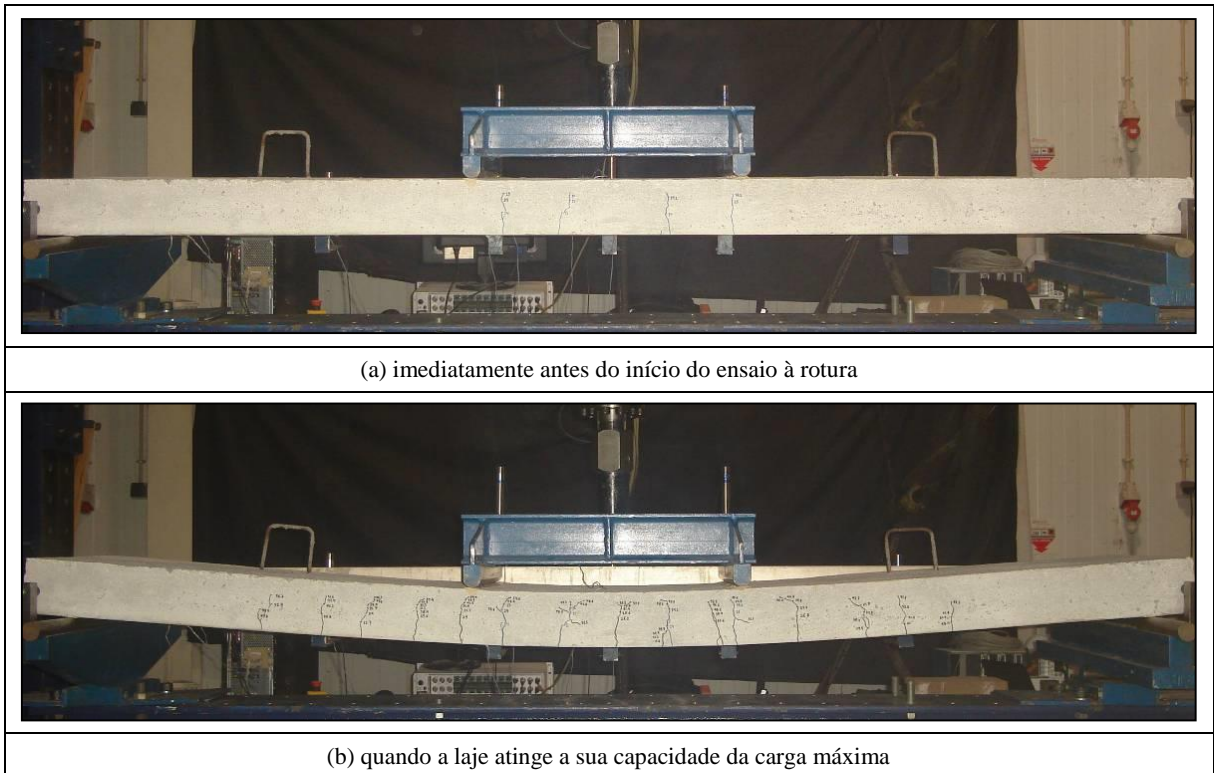


Figura 55 - Padrão de fendilhação da laje S2L-20-PC1 antes do ensaio de rotura e quando atinge a capacidade da carga máxima.

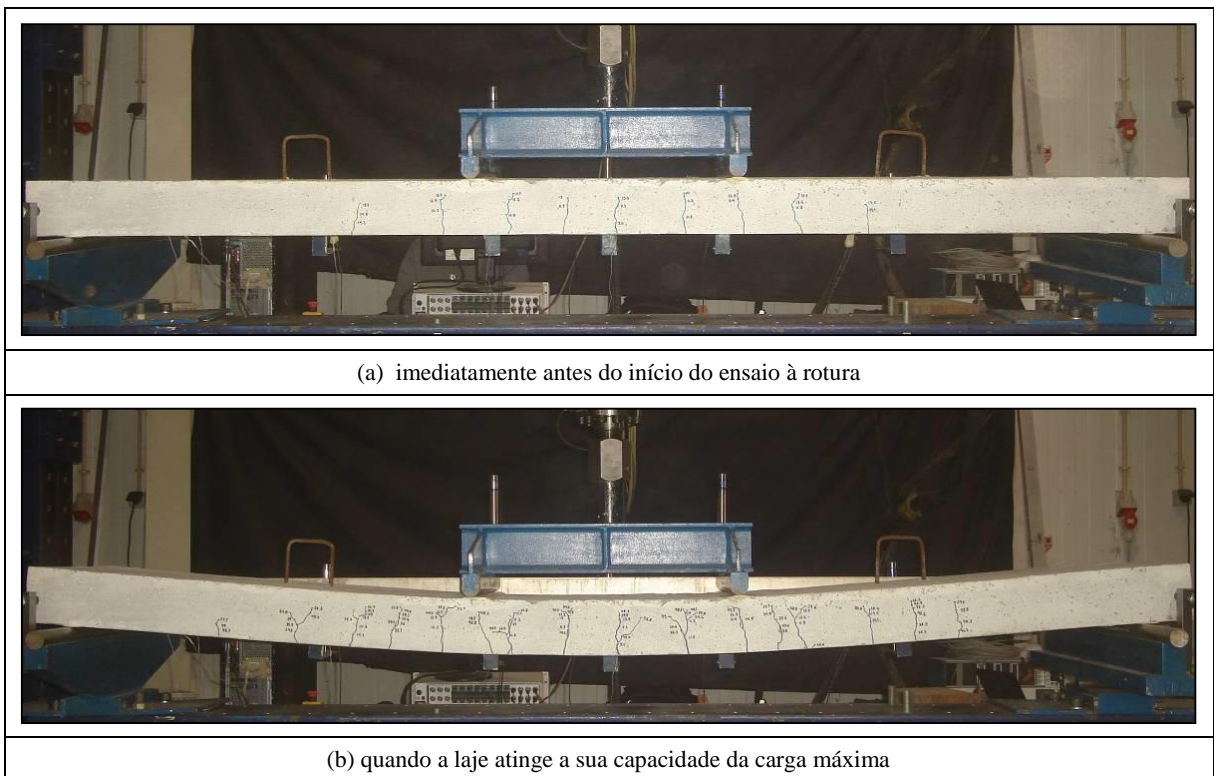
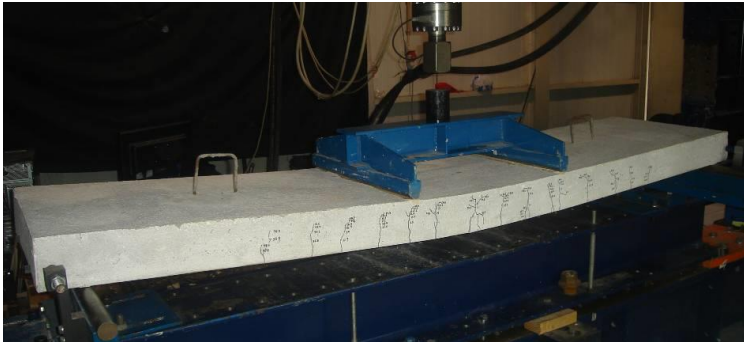
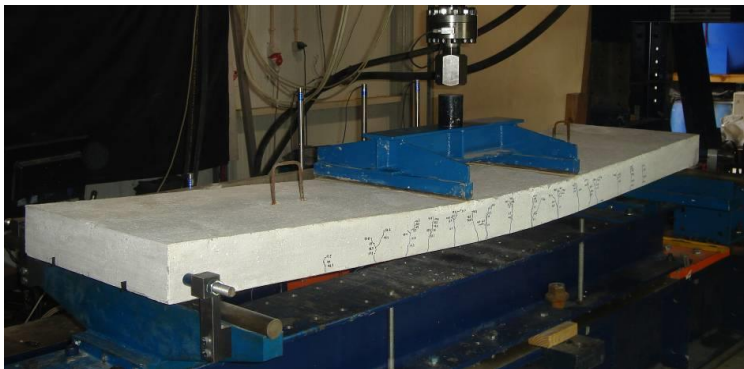
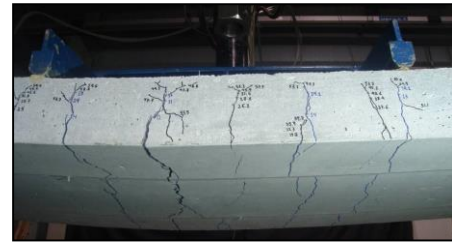


Figura 56 - Padrão de fendilhação da laje S2L-20-PC2 antes do ensaio de rotura e quando atinge a capacidade da carga máxima.

A Figura 57 apresenta o aspeto geral das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 após o ensaio à rotura assim como o detalhe da zona onde ocorreu o modo de rotura das lajes. É de salientar que na Figura 57 as fendas a azul referem-se às fendas registadas no ensaio de pré-fendilhação e as fendas a preto são as que foram registadas no ensaio à rotura das lajes. O modo de rotura das lajes reforçadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20%, independentemente do nível de pré-fendilhação aplicado, foi o esgotamento da capacidade máxima resistente do CFRP (rotura do CFRP).



(a) S2L-20-PC1



(b) S2L-20-PC2



Figura 57 - Lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 após o ensaio à rotura e pormenor dos modos de rotura.

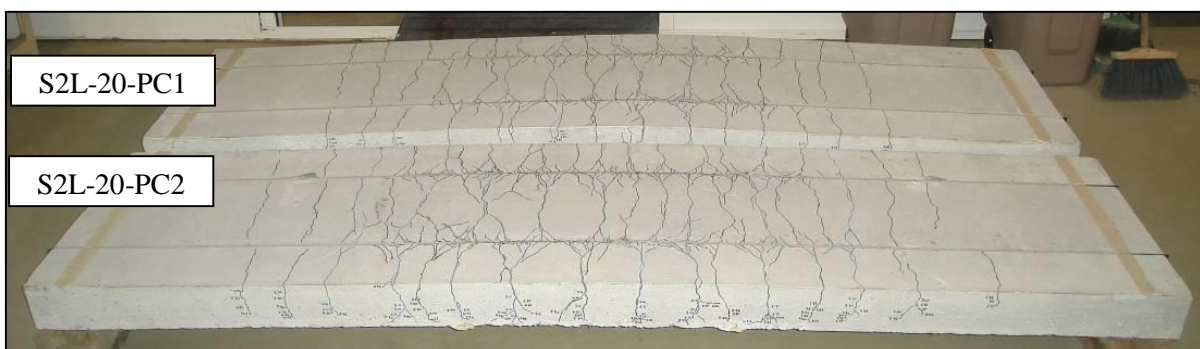


Figura 58 - Padrão de fendilhação final registado para as lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2.

A Figura 58 ilustra o padrão de fendilhação final das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2, onde é possível verificar que o padrão de fendilhação da laje S2L-20-PC2 foi ligeiramente mais extensivo. Esta laje, relativamente à laje S2L-20-PC1, tinha um maior dano e registou uma

maior capacidade de carga máxima e uma maior flecha a meio-vão correspondente à carga máxima.

As Figuras 59 e 60 ilustram, respetivamente, o padrão de fendilhação das lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 (ambas as lajes foram pré-fendilhadas e posteriormente reforçadas com nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 40%) nos seguintes instantes: imediatamente antes do início do ensaio de rotura (Figura 59a) e Figura 60a), respetivamente, para as lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2) e no momento em que as lajes atingiram sua capacidade de carga máxima (Figura 59b) e Figura 60b), respetivamente, para as S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2). Nas Figuras 59 e 60 é, também, possível comparar a diferença do nível de deformação das lajes entre o início do ensaio à rotura e quando estas atingiram a sua capacidade de carga máxima. Após o início do ensaio das lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2, as fendas resultantes 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 afastadas dos pontos de aplicação da carga. Estas novas fendas surgiram apenas para cargas superiores à máxima atingida no ensaio de pré-fendilhação. A carga máxima registada nas lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 foi de 63.50 kN e de 61.94 kN, respetivamente. Quando a capacidade de carga máxima das lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 foi alcançada a flecha a meio-vão era de 46.76 mm e 49.00 mm, respetivamente.

A Figura 61 apresenta o aspeto geral das lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 após o ensaio à rotura assim como o detalhe da zona onde ocorreu o modo de rotura das lajes. É de salientar que na Figura 61 as fendas a azul referem-se às fendas registadas no ensaio de pré-fendilhação e as fendas a preto são as que foram registadas no ensaio à rotura das lajes. Tal como nas lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2, o modo de rotura das lajes reforçadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 40%, independentemente do nível de pré-fendilhação aplicado, foi o esgotamento da capacidade máxima resistente do CFRP (rotura do CFRP).

A Figura 62 ilustra o padrão de fendilhação final das lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 e, da sua observação conclui-se que, independentemente do nível de dano, o padrão de fendilhação das lajes foi similar. A laje S2L-40-PC2, relativamente à laje S2L-40-PC1, tinha um maior dano, registou uma maior flecha a meio-vão correspondente à carga máxima e obteve uma menor capacidade de carga máxima.

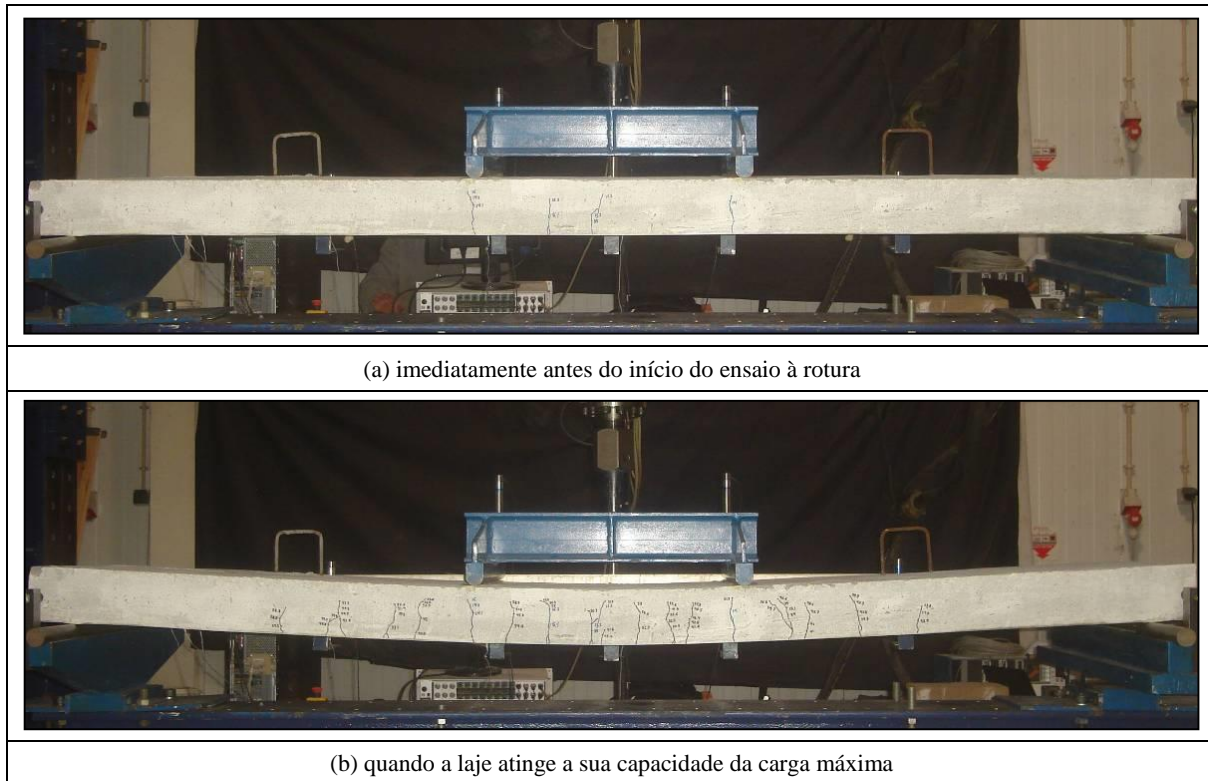


Figura 59 - Padrão de fendilhação da laje S2L-40-PC1 antes do ensaio de rotura e quando atinge a capacidade da carga máxima.

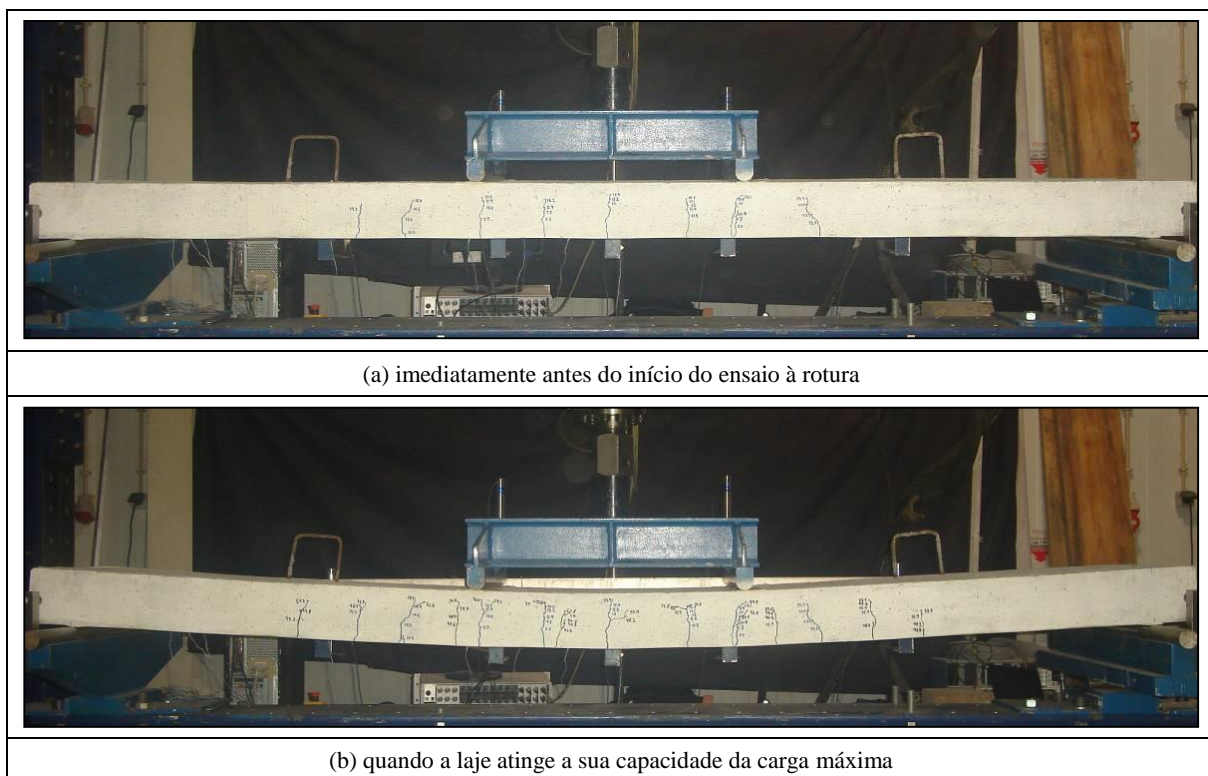


Figura 60 - Padrão de fendilhação da laje S2L-40-PC2 antes do ensaio de rotura e quando atinge a capacidade da carga máxima.

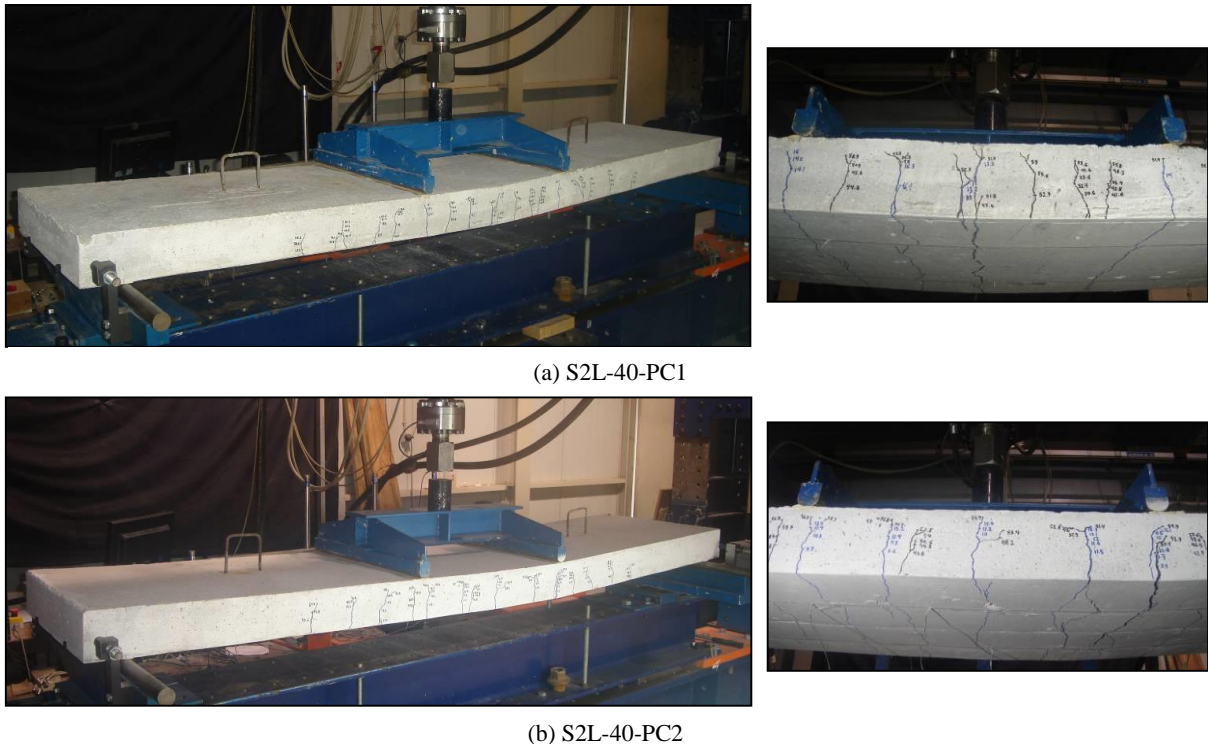


Figura 61 - Lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 após o ensaio à rotura e pormenor dos modos de rotura.

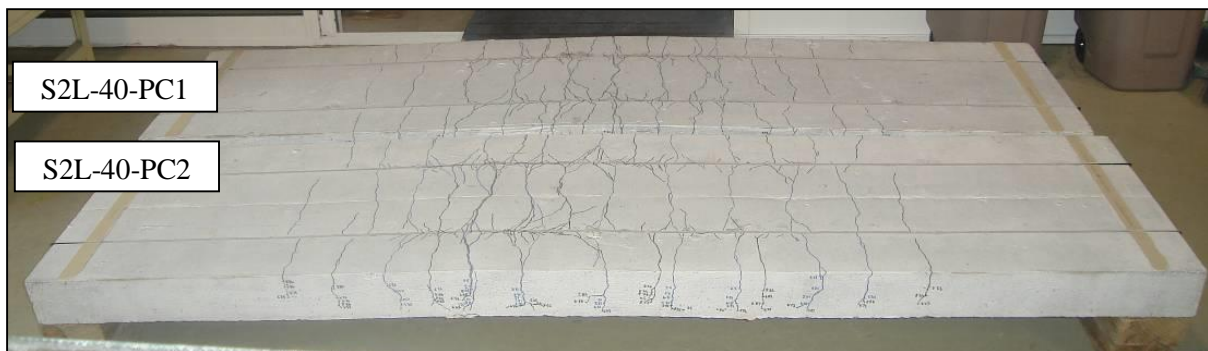


Figura 62 - Padrão de fendilhação final registado para as lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2.

A Figura 63 ilustra o padrão de fendilhação final das lajes pré-fendilhados com o primeiro nível de dano e reforçadas com níveis de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20% (S2-20-PC1) e 40% (S2L-40-PC1). Nesta figura é possível constatar que o acréscimo do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP provocou um menor comprimento da zona de fendilhação. Com efeito, a laje S2L-40-PC1 apresenta um padrão de fendilhação menos extensivo do que a laje S2L-20-PC1.

Na Figura 64 é comparada a deformação final das lajes S2L-20-PC1 e S2L-40-PC1 (ambas com o mesmo nível de dano), sendo possível verificar que a laje S2L-40-PC1 (40% de pré-tensão) apresenta menor deformação que a laje S2L-20-PC1 (20% de pré-tensão).

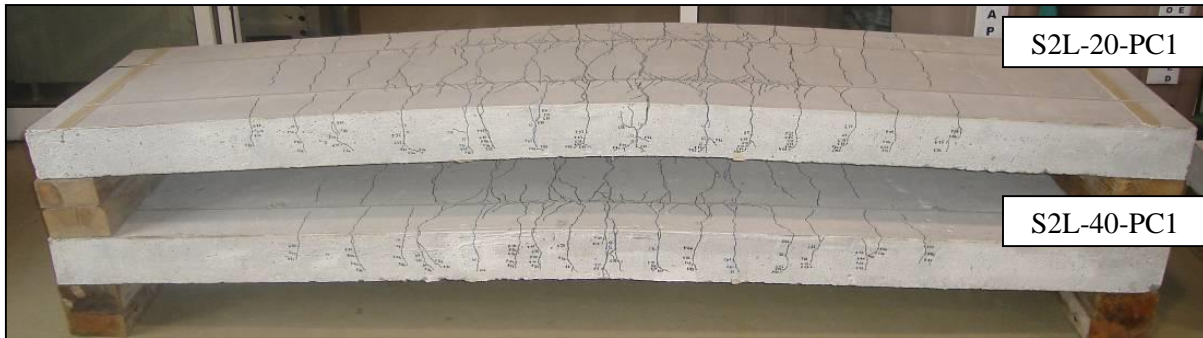


Figura 63 - Padrão de fendilhação final das lajes pré-fendilhadas com o primeiro nível de dano e reforçadas com níveis de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20% e 40%.

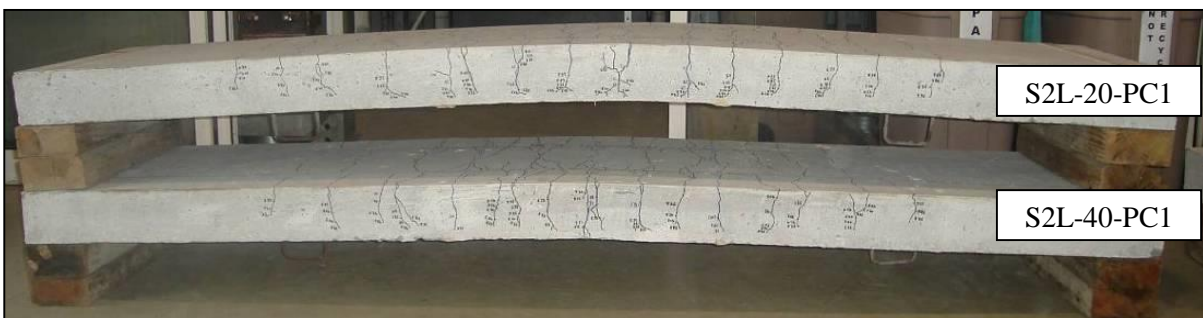


Figura 64 - Pormenor da deformação final das lajes ensaiadas (posição das lajes invertida).

A Figura 65 apresenta o padrão de fendilhação final registado para as lajes pré-fendilhadas com o segundo nível de dano e reforçadas com níveis de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20% (laje S2L-20-PC2) e 40% (laje S2L-40-PC2). Da análise desta figura pode-se concluir que, tal como na Figura 63, o aumento do nível de pré-tensão de 20% para 40% nos laminados de CFRP proporcionou o surgimento de um padrão de fendilhação menos extensivo.

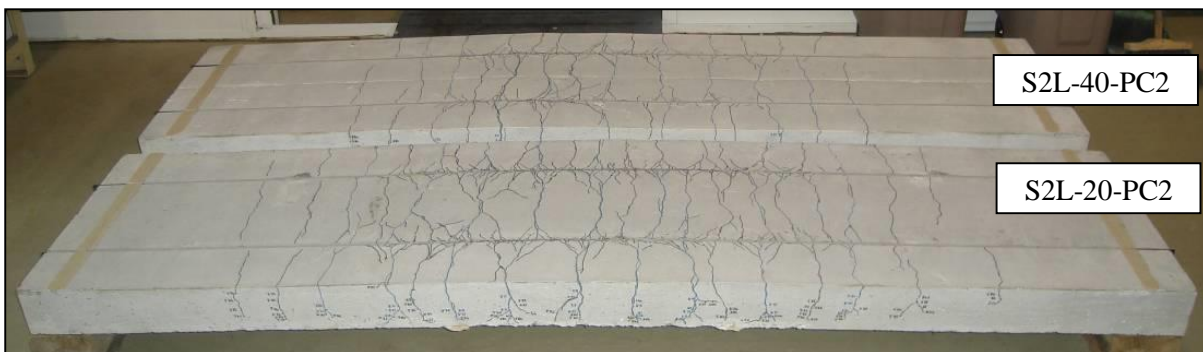
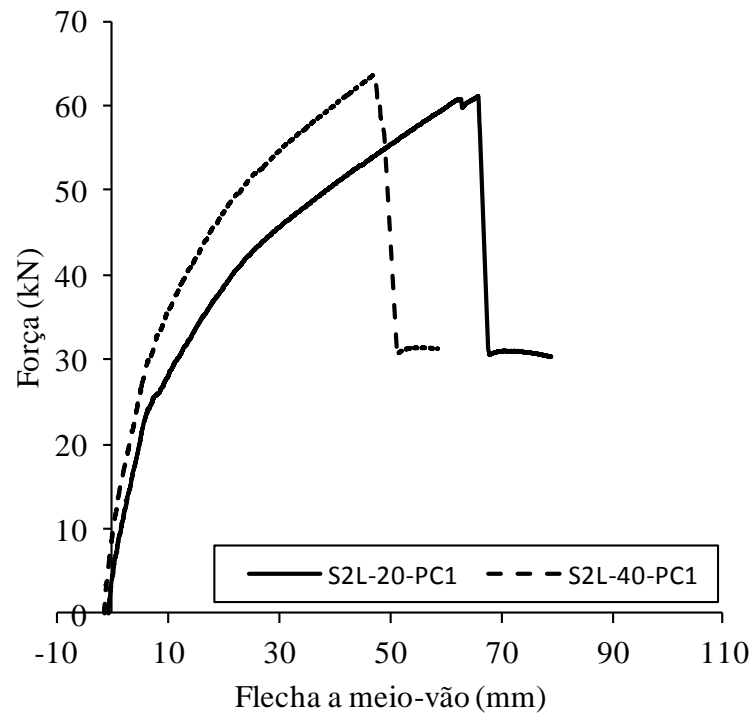


Figura 65 - Padrão de fendilhação final das lajes pré-fendilhadas com o segundo nível de dano e reforçadas com níveis de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20% e 40%.

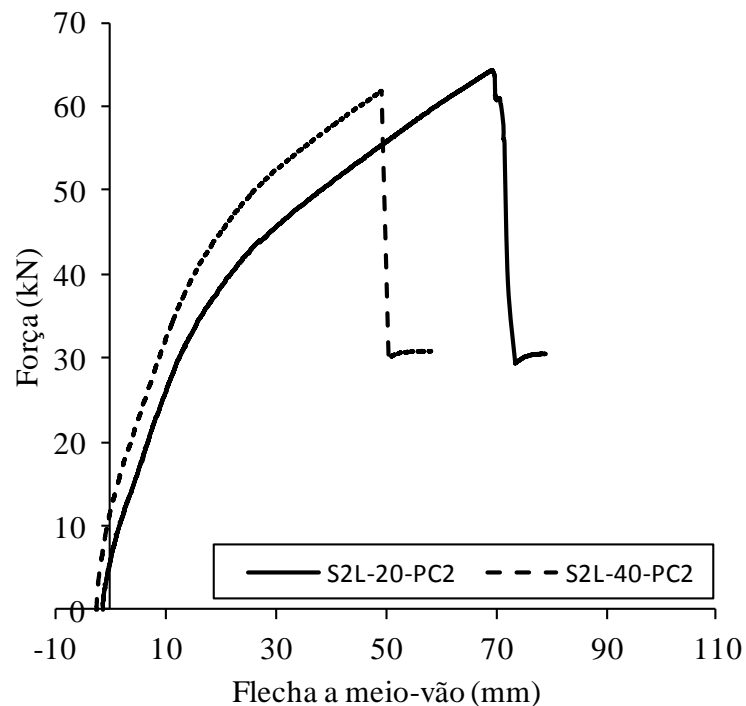
3.5.2.2. Capacidade de carga e capacidade deformacional

A Figura 66 apresenta as curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas no presente programa experimental. Concretamente, a Figura 66a) apresenta as curvas de comportamento das lajes que foram reforçadas com laminados pré-tensionados após

a imposição do primeiro nível de dano e a Figura 66b) apresenta as curvas de comportamento das lajes que foram reforçadas com laminados pré-tensionados após a imposição do segundo nível de dano.



(a) Lajes onde foi imposto o nível de dano 1 no ensaio de pré-fendilhação



(b) Lajes onde foi imposto o nível de dano 2 no ensaio de pré-fendilhação

Figura 66 - Força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas no presente programa experimental: a) nível de dano 1; b) nível de dano 2.

A análise da Figura 66 permite verificar que, independentemente do nível de dano, verificou-se que com o aumento do nível da pré-tensão há um incremento de rigidez inicial, um aumento da carga de serviço (F_{serv} - carga obtida para um valor da flecha igual ao correspondente estados limites de serviço, que de acordo com o Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010) vale $L/250$, em que L é o vão livre das lajes ($L/250 = 2400 \text{ mm}/250 = 9.6 \text{ mm}$) e uma diminuição da flecha correspondente à capacidade de carga máxima ($u_{F_{max}}$), o que implica uma diminuição da ductilidade. Este tipo de constatação já tinha sido feito em lajes reforçadas com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados sem pré-fendilhação no betão. Da Figura 66 é visível que, independentemente do nível de dano e da percentagem de pré-tensão no CFRP, os valores da carga máxima (F_{max}) foram semelhantes para as quatro lajes testadas. Isto é, devido ao facto do modo de rotura, tal como referido anteriormente, ter sido nas quatro lajes a rotura do CFRP.

Tabela 17 - Principais resultados obtidos nas lajes ensaiadas com o primeiro nível de dano.

Laje	Serviço		Rotura			
	F_{serv} (kN)	Variação da carga de serviço (%)	F_{max} (kN)	Variação da carga máxima (%)	$u_{F_{max}}$ (mm)	Variação da flecha máxima (%)
S2L-20-PC1	27.64	-	61.01	-	65.92	-
S2L-40-PC1	35.25	27.53	63.50	4.08	46.76	- 29.07

Tabela 18 - Principais resultados obtidos nas lajes ensaiadas com o segundo nível de dano.

Laje	Serviço		Rotura			
	F_{serv} (kN)	Variação da carga de serviço (%)	F_{max} (kN)	Variação da carga máxima (%)	$u_{F_{max}}$ (mm)	Variação da flecha máxima (%)
S2L-20-PC2	25.31	-	64.24	-	69.21	-
S2L-40-PC2	31.20	23.27	61.94	- 3.58	49.00	- 29.20

As Tabelas 17 e 18 apresentam os principais resultados obtidos nas lajes ensaiadas associadas ao nível de dano 1 e 2, respetivamente. Assim, para cada uma das lajes são apresentados os valores da carga de serviço (F_{serv}), da carga máxima (F_{max}) e da flecha a meio-vão correspondente à força F_{max} ($u_{F_{max}}$). Tendo como base a laje S2L-20-PC1 (primeiro nível de dano e pré-tensão de 20%), na Tabela 17 apresentam-se, para o mesmo nível de dano, as variações em termos percentuais de F_{serv} , F_{max} e da flecha $u_{F_{max}}$ proporcionadas pela solução de reforço com pré-tensão de 40%. Tendo como base a laje S2L-20-PC2 (segundo nível de dano e pré-tensão de 20%), na Tabela 18 apresentam-se, para o mesmo nível de dano, as variações em termos percentuais de F_{serv} , F_{max} e da flecha $u_{F_{max}}$ proporcionadas pela solução de reforço com pré-tensão de 40%.

A análise das Tabelas 17 e 18 permite verificar que os valores do acréscimo da carga de serviço (F_{serv}) e da diminuição da flecha ($u_{F_{max}}$) proporcionados pelo aumento da pré-tensão de 20% para 40% foram semelhantes independentemente do nível de dano aplicado nas lajes antes da execução do reforço.

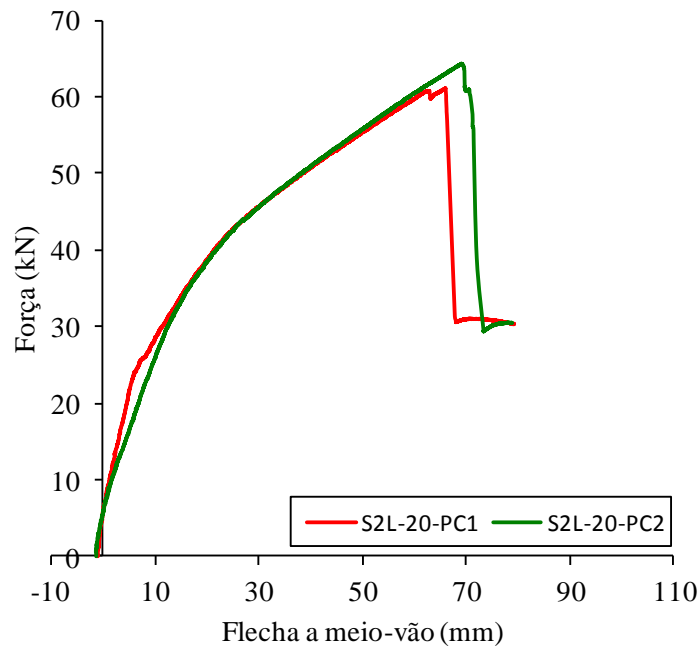
De acordo com a Tabela 17 e a Figura 66a), a carga de serviço aumentou com o nível de pré-tensão instalado nos laminados de CFRP (os valores de F_{serv} das lajes S2L-20-PC1 e S2L-40-PC1 foram, respetivamente, 27.64 kN e 35.25 kN), verificando-se que, relativamente à laje S2L-20-PC1, a laje S2L-40-PC1 registou um acréscimo de carga de serviço de 27.53%. A carga máxima (F_{max}) da laje S2L-40-PC1, de valor igual a 63.50 kN, foi ligeiramente superior à da laje S2L-20-PC1 (61.01 kN), o que representa um acréscimo de carga máxima de 4.08%. Os valores da flecha a meio-vão correspondentes à carga máxima das lajes ($u_{F_{max}}$) com 20% e 40% de pré-tensão nos laminados de CFRP foram, respetivamente, 65.92 mm e 46.76 mm, o que evidencia que o aumento do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP diminui consideravelmente (decrécimo de 29.07%) o nível de deformação do elemento estrutural na rotura (diminuição da ductilidade).

A análise da Tabela 18 e da Figura 66b) permite concluir que o aumento do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP proporciona um acréscimo da carga de serviço. Com efeito, os valores de F_{serv} das lajes S2L-20-PC2 e S2L-40-PC2 foram, respetivamente, 25.31 kN e 31.20 kN. Assim, em comparação com a laje S2L-20-PC2, a laje S2L-40-PC2 apresenta um acréscimo da carga de serviço de 23.27%. Os valores da carga máxima (F_{max}) das lajes S2L-20-PC2 e S2L-40-PC2 foram, respetivamente, 64.24 kN e 61.94 kN, verificando-se que com o aumento do nível de pré-tensão se verificou um ligeiro decréscimo da carga máxima (3.58%). Relativamente à laje S2L-20-PC2, o reforço de CFRP com 40% de pré-tensão nos laminados de CFRP (laje S2L-40-PC2) originou um decréscimo da flecha a meio-vão $u_{F_{max}}$ de 29.20%, verificando-se assim uma diminuição da ductilidade com o aumento do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP.

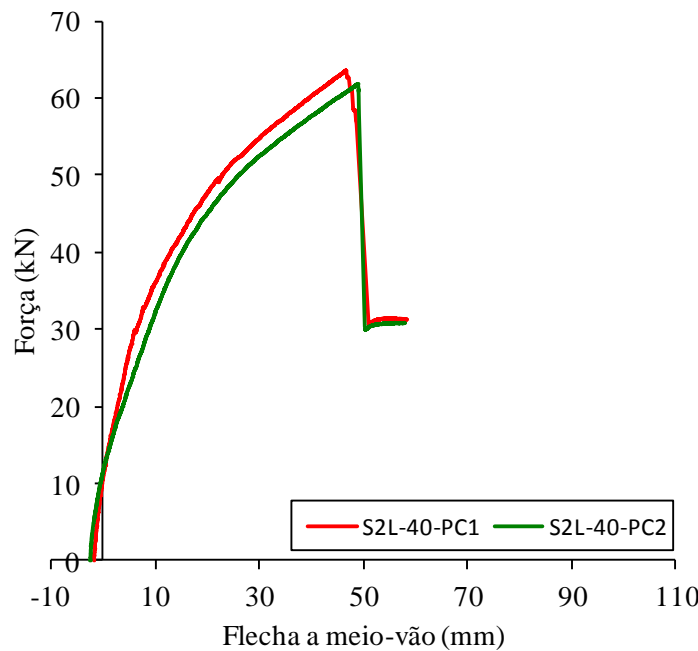
A Figura 67a) apresenta, para os dois níveis de dano analisados, as curvas de comportamento das lajes reforçadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20%. A Figura 67b) apresenta, para os dois níveis de dano analisados, as curvas de comportamento das lajes reforçadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 40%.

Por análise da Figura 67 visualiza-se que, independentemente do nível de pré-tensão, verificou-se que o aumento do nível de dano se refletiu essencialmente numa quebra da rigidez que

motivou uma diminuição nos valores da carga de serviço (F_{serv}). A Figura 67 permite concluir que, independentemente do nível de pré-tensão, as consequências em termos de carga máxima (F_{max}) e da flecha associada à carga máxima ($u_{F_{max}}$) foram pouco significativas (no máximo cerca de 5%). De acordo com as Figuras 67a) e 67b) é notório que as curvas de comportamento das lajes ensaiadas apresentam um desenvolvimento similar, apesar do nível de pré-fendilhação imposto previamente à aplicação do reforço ter sido diferente.



(a) Lajes com nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20%



(b) Lajes com nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 40%

Figura 67 - Força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas no presente programa experimental: a) 20% de pré-tensão; b) 40% de pré-tensão.

Tabela 19 - Principais resultados obtidos nas lajes ensaiadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20%.

Laje	Serviço		Rotura			
	F_{serv} (kN)	Variação da carga de serviço (%)	F_{max} (kN)	Variação da carga máxima (%)	u_{Fmax} (mm)	Variação da flecha máxima (%)
S2L-20-PC1	27.64	-	61.01	-	65.92	-
S2L-20-PC2	25.31	- 8.43%	64.24	5.30%	69.21	5.00%

Tabela 20 - Principais resultados obtidos nas lajes ensaiadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 40%.

Laje	Serviço		Rotura			
	F_{serv} (kN)	Variação da carga de serviço (%)	F_{max} (kN)	Variação da carga máxima (%)	u_{Fmax} (mm)	Variação da flecha máxima (%)
S2L-40-PC1	35.25	-	63.50	-	46.76	-
S2L-40-PC2	31.20	- 11.49%	61.94	- 2.52%	49.00	4.79

As Tabelas 19 e 20 apresentam os principais resultados obtidos nas lajes ensaiadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20% e 40%, respetivamente. Assim, para cada uma das lajes são apresentados os valores da carga de serviço (F_{serv}), da carga máxima (F_{max}) e da flecha a meio-vão correspondente à força F_{max} (u_{Fmax}). Tendo como base a laje S2L-20-PC1 (primeiro nível de dano e pré-tensão de 20%), na Tabela 19 apresentam-se, para o mesmo nível de pré-tensão, as variações em termos percentuais de F_{serv} , F_{max} e da flecha u_{Fmax} proporcionadas pelo segundo nível de dano (laje S2L-20-PC2). Tendo como base a laje S2L-40-PC1 (primeiro nível de dano e pré-tensão de 40%), na Tabela 20 apresentam-se, para o mesmo nível de pré-tensão, as variações em termos percentuais de F_{serv} , F_{max} e da flecha u_{Fmax} proporcionadas pelo segundo nível de dano (laje SL-40-PC2).

De acordo com a Tabela 19 e a Figura 67a) verificou-se um decréscimo da carga de serviço (F_{serv}) com o aumento do nível de dano imposto no ensaio de pré-fendilhação das lajes. Com efeito, os valores de F_{serv} foram de 27.64 kN e 25.31 kN para as lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2, respetivamente, o que corresponde a um decréscimo de 8.43% de F_{serv} com o aumento do nível de dano, que se refletiu numa quebra de rigidez da laje S2L-20-PC2 nesta fase (Figura 67a)). Os valores da carga máxima (F_{max}) das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 foram muito semelhantes (61.01 kN e 64.24 kN, respetivamente), verificando-se que a carga máxima da laje S2L-20-PC2 foi 5.30% superior à da laje S2L-20-PC1. Em relação à flecha a meio-vão associado à carga máxima das lajes (u_{Fmax}) constata-se que, em relação à laje S2L-20-PC1, a laje com nível de dano 2 (laje S2L-20-PC2) teve um valor 5.00% superior.

A análise da Tabela 20 e as curvas de comportamento da Figura 67b) permite constatar que, no caso das lajes com 40% de pré-tensão, o aumento do nível de dano motivou uma redução da carga de serviço de 11.49% (os valores de F_{serv} obtidos nas lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 foram, respetivamente, 35.25 kN e 31.20 kN), que se refletiu numa quebra da rigidez da laje S2L-40-PC2 nesta fase (Figura 67b)). A carga máxima (F_{max}) da laje S2L-40-PC1 (sujeita ao menor nível de pré-fendilhação), de valor igual a 63.50 kN, foi ligeiramente superior à da laje S2L-40-PC2 (61.94 kN), verificando-se assim na laje S2L-40-PC2 um decréscimo de 2.52%. Os valores da flecha a meio-vão $u_{F_{max}}$ para as lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 também foram muito semelhantes (46.76 mm e 49.00 mm, respetivamente). À semelhança do ocorrido no caso da pré-tensão de 20%, também no caso da pré-tensão de 40% se verificou um ligeiro aumento da flecha correspondente a F_{max} (4.79%) com o aumento do nível de dano na laje.

3.5.2.3. Extensões no CFRP e grau de mobilização do CFRP

Na Tabela 21 apresenta-se na coluna “Total”, para cada uma das lajes ensaiadas, o valor da extensão máxima registada nos três extensómetros (SG-L1, SG-L2 e SG-L3 - ver Figura 50b)) aplicados nos laminados de CFRP até ao instante em que as lajes alcançaram a sua capacidade de carga máxima. Cada um dos referidos valores corresponde à adição do valor da extensão correspondente à pré-tensão (coluna “Pré-tensão”) com o valor da máxima extensão registada durante o ensaio à rotura até a laje atingir a sua capacidade de carga máxima (coluna “Ensaio à rotura”). Na Tabela 22 apresenta-se o valor das extensões máximas registadas no CFRP (ε_{CFRP}^{max}) até ao momento em que as lajes atingiram a sua capacidade de carga máxima (corresponde, por laje, ao valor máximo das colunas “Total” da Tabela 21), o grau de mobilização do reforço de CFRP e o modo de rotura observado. O grau de mobilização do CFRP foi obtido através da razão percentual entre o valor da extensão máxima registada nos laminados de CFRP (ε_{CFRP}^{max}) e o valor médio da extensão máxima registada nos ensaios de tração uniaxial dos laminados de CFRP.

Tabela 21 - Valores máximos das extensões registadas nos extensómetros até as lajes alcançarem a sua capacidade de carga máxima.

Laje	SG-L1 (%)			SG-L2 (%)			SG-L3 (%)		
	Pré-tensão	Ensaio à rotura	Total	Pré-tensão	Ensaio à rotura	Total	Pré-tensão	Ensaio à rotura	Total
S2L-20-PC1	3.06	12.05	15.11	3.25	10.73	13.98	3.28	2.53	5.81
S2L-40-PC1	5.54	9.53	15.07	5.32	8.89	14.21	6.27	2.60	8.87
S2L-20-PC2	2.65	11.93	14.68	2.99	11.01	14.00	3.12	4.30	7.42
S2L-40-PC2	5.46	9.58	15.04	5.78	8.60	14.38	6.07	1.91	7.98

Tabela 22 - Extensões máximas registadas nos laminados de CFRP e grau de mobilização do CFRP.

Laje	ε_{CFRP}^{max} (‰)	Grau de mobilização do CFRP (%)	Modo de rotura
S2L-20-PC1	15.11	95.63	Rotura do CFRP
S2L-40-PC1	15.07	95.38	Rotura do CFRP
S2L-20-PC2	14.68	92.91	Rotura do CFRP
S2L-40-PC2	15.04	95.20	Rotura do CFRP

De acordo com os dados da Tabela 21 é possível verificar que os valores mais altos e mais baixos das extensões registadas nos laminados de CFRP (coluna “Total”), independentemente do nível de pré-fendilhação e do nível de pré-tensão nos laminados, ocorreram no extensómetro SG-L1 e no extensómetro SG-L3, respetivamente. Isto aconteceu devido ao facto do extensómetro SG-L1 ser o que se encontrava mais próximo onde ocorreu a rotura do CFRP e o extensómetro SG-L3 estar numa zona mais afastada onde ocorreu a rotura (o SG-L3 estava situado aproximadamente a meio do vão de corte).

Da Tabela 22 é possível verificar que os valores das extensões máximas registadas no CFRP (ε_{CFRP}^{max}) nas quatro lajes ensaiadas são próximos do valor médio da extensão máxima registada nos ensaios de tração uniaxial dos laminados (15.8‰ - ver Tabela 15). Com efeito, as extensões ε_{CFRP}^{max} registadas nas lajes S2L-20-PC1, S2L-40-PC1, S2L-20-PC2 e S2L-40-PC2 foram, respetivamente, 15.11‰, 15.07‰, 14.68‰ e 15.04‰. Assim, verifica-se a existência de elevados níveis de mobilização do reforço de CFRP, independentemente do nível de pré-fendilhação e o nível de pré-tensão. Estes níveis (cerca de 100%) estão diretamente associados aos modos de rotura das lajes (rotura do CFRP) e demonstram o elevado desempenho da técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados quando aplicada no reforço à flexão de lajes pré-fendilhadas de betão armado.

Na Figura 68 apresenta-se, para as lajes S2L-20-PC1, S2L-20-PC2, S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2, a relação entre a variação das extensões registada nos extensómetros colados nos laminados de CFRP (Figura 50b)) e a força aplicada nas lajes durante o ensaio à rotura até ao momento em que as lajes atingiram a sua capacidade de carga máxima.

A Figura 68 ilustra, de forma clara, os valores mais elevados das extensões nos extensómetros SG-L1 e SG-L2 em relação ao extensómetro SG-L3. Ao mesmo tempo, verifica-se que a zona do laminado onde o extensómetro SG-L3 foi colado foi mobilizada para cargas superiores às que levaram à mobilização de SG-L1 e SG-L2. Nos extensómetros SG-L1 e SG-L2 é notório que a partir de uma certa zona verifica-se um acréscimo mais acentuado das extensões com o

aumento da carga, o que esta diretamente associado à ocorrência da cedência das armaduras longitudinais.

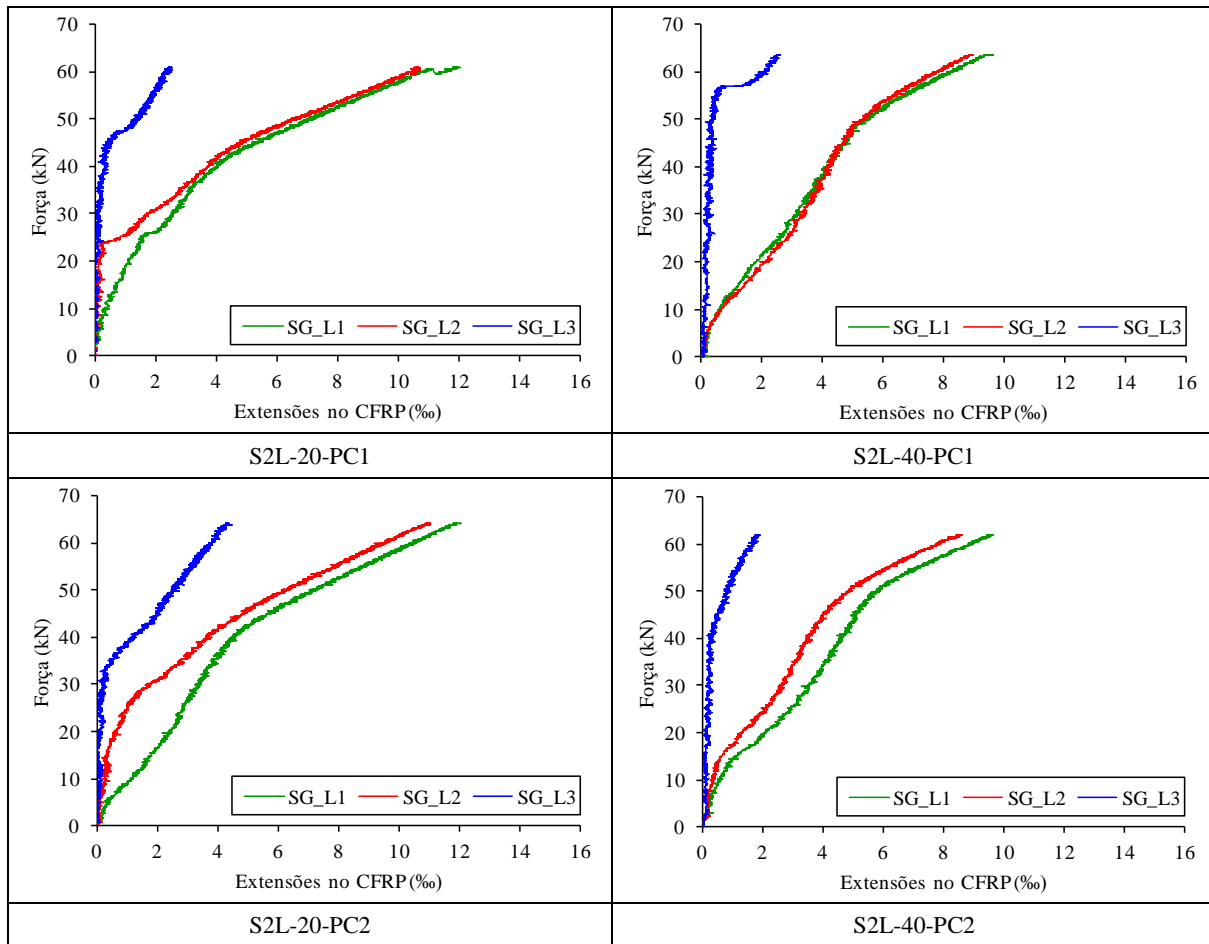


Figura 68 - Variação das extensões nos laminados de CFRP no ensaio à rotura.

3.5.3. Efeito da pré-fendilhação

Para se poder 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 pré-tensionados, os resultados experimentais obtidos no presente programa experimental serão comparados com os que foram alcançados por Dias *et al.* (2014b), quando testaram as três seguintes lajes: uma de referência sem CFRP (laje SREF) e duas reforçadas com laminados de CFRP pré-tensionados, com percentagem de pré-tensão no CFRP de 20% (laje S2L-20) e 40% (laje S2L-40). Estas últimas eram semelhantes às que foram ensaiadas no presente programa experimental, no entanto apresentam a diferença de não terem sido pré-fendilhadas antes da aplicação do reforço. É de salientar que o modo de rotura das lajes S2L-20 e S2L-40 foi a rotura do CFRP à semelhança do que ocorreu nas lajes S2L-20-PC1, S2L-20-PC2, S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2. Desta forma, verifica-se que os níveis de dano introduzidos nas lajes não influenciaram

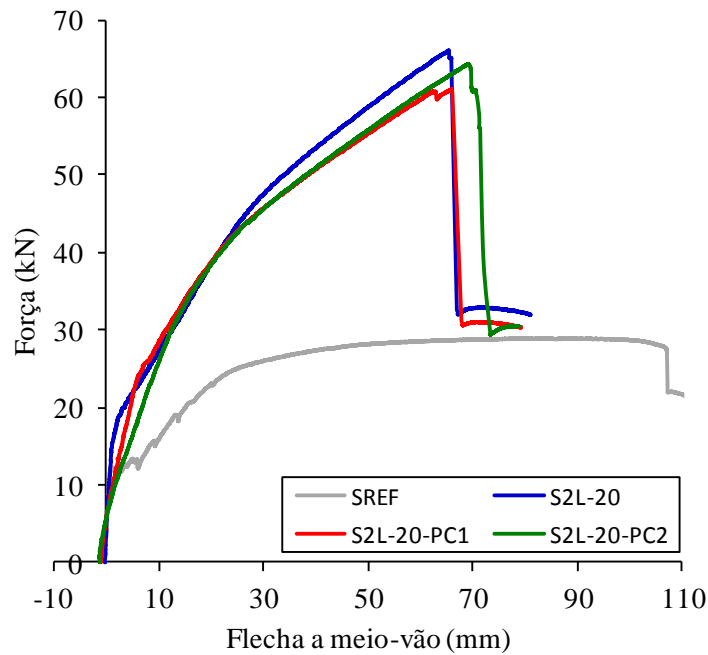
o modo de rotura. Assim, independentemente da existência ou não de dano, o modo de rotura das lajes foi o mesmo e foi a rotura do CFRP.

A Figura 69a) apresenta as curvas de comportamento das lajes reforçadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20%: uma sem pré-fendilhação (laje S2L-20) e duas pré-fendilhadas (lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2). Nesta figura também foi introduzido o comportamento da laje de referência sem reforço de CFRP (laje SREF). A Figura 69b) apresenta as curvas de comportamento das lajes reforçadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 40%: uma sem pré-fendilhação (laje S2L-40) e duas pré-fendilhadas (lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2). Nesta figura também foi introduzido o comportamento da laje de referência sem reforço de CFRP (laje SREF).

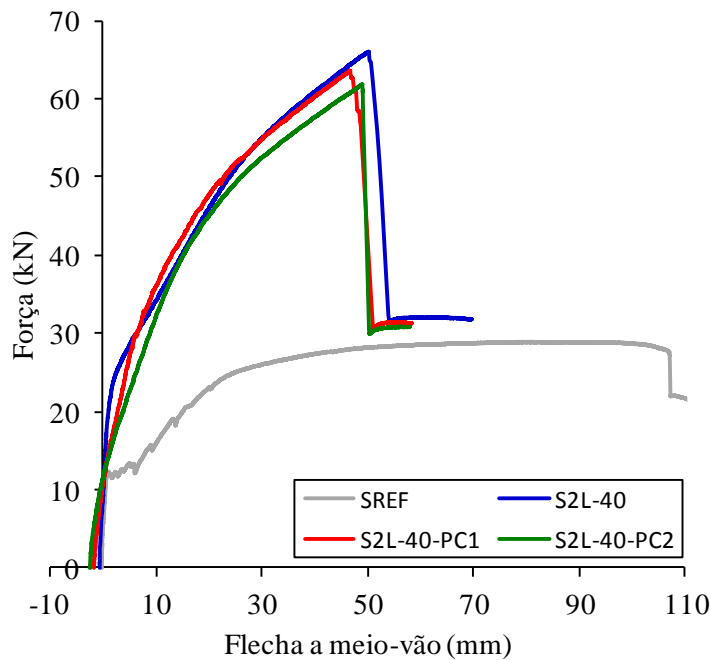
As Figuras 69a) e 69b) permitem verificar que, ao contrário da laje de referência (SREF) e das lajes reforçadas com os laminados de CFRP inseridos sem pré-fendilhação (S2L-20 e S2L-40), em que registaram três estados principais de comportamento até atingirem a sua capacidade de carga máxima (betão não fendilhado, betão fendilhado com o aço não plastificado e betão fendilhado após cedência do aço das armaduras longitudinais), nas lajes pré-fendilhadas e, posteriormente, reforçadas com laminados de CFRP pré-tensionados só são observados dois estados: betão fendilhado com o aço não plastificado e o betão fendilhado após a cedência das armaduras. Nas lajes reforçadas sem pré-fendilhação (S2L-20 e S2L-40) e nas lajes reforçadas com pré-fendilhação (S2L-20-PC1, S2L-20-PC2, S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2), após a cedência das armaduras, verifica-se que apenas os laminados de CFRP contribuem para o aumento da capacidade resistente da laje. Isto justifica o aparecimento do troço reto nas curvas das lajes reforçadas após a cedência das armaduras, em consequência do comportamento linear elástico dos laminados de CFRP até à rotura.

A partir das curvas de comportamento das Figuras 69a) e 69b) é possível constatar, relativamente à laje de referência (SREF), benefícios notórios devido à aplicação do reforço de CFRP pré-tensionado, com ou sem pré-fendilhação do betão, quer em termos de carga de serviço quer em termos de capacidade de carga máxima. No entanto, em relação às lajes S2L-20 e S2L-40, o facto de se ter imposto um nível de dano (pré-fendilhação) não proporcionou benefícios em termos de capacidade de carga máxima, ou seja, as lajes sem pré-fendilhação (S2L-20 e S2L-40) apresentam valores de capacidade de carga máxima ligeiramente superiores aos das lajes pré-fendilhadas (S2L-20-PC1, S2L-20-PC2, S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2). Em termos de carga de serviço, verifica-se que, relativamente às lajes sem pré-fendilhação (S2L-20 e S2L-40), apenas as lajes sujeitas ao primeiro nível de dano apresentam acréscimos de carga

de serviço. As curvas de comportamento da Figura 69 permitem verificar que, independentemente do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP, as lajes com pré-fendilhação (S2L-20-PC1, S2L-20-PC2, S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2) apresentam, numa fase inicial, uma natural perda de rigidez comparativamente às lajes sem pré-fendilhação (S2L-20 e S2L-40). Tal facto é devido à pré-fendilhação instalada nas lajes antes da aplicação do reforço de CFRP.



(a) nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20%



(b) nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 40%

Figura 69 - Curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão das lajes ensaiadas no presente programa experimental e por Dias *et al.* (2014b).

A Tabela 23 apresenta os principais resultados obtidos nas lajes, cujo comportamento se apresenta na Figura 69, em termos de carga de serviço (F_{serv}), carga máxima (F_{max}) e flecha a meio-vão correspondente a F_{max} ($u_{F_{max}}$). Na Tabela 23 são, também, apresentadas as variações em termos percentuais de F_{serv} , F_{max} e $u_{F_{max}}$ em relação à laje de referência (SREF) e em relação às lajes reforçadas com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados sem pré-fendilhação do betão (lajes S2L-20 e S2L-40).

Tabela 23 - Efeito da pré-fendilhação na eficácia do reforço à flexão com laminados inseridos pré-tensionados.

Laje	Serviço	Rotura	
	F_{serv} (kN)	F_{max} (kN)	$u_{F_{max}}$ (mm)
SREF	15.20	28.85	81.06
S2L-20	26.79 (76.25%)	66.07 (129.01%)	65.44 (-19.27%)
S2L-20-PC1	27.64 (81.84%) [3.17%]	61.01 (111.47%) [-7.66%]	65.92 (-18.68%) [0.73%]
S2L-20-PC2	25.31 (66.51%) [-5.52%]	64.24 (122.67%) [-2.77%]	69.21 (-14.62%) [5.76%]
SREF	15.20	28.85	81.06
S2L-40	33.81 (122.43%)	66.00 (128.77%)	50.32 (-37.92%)
S2L-40-PC1	35.25 (131.91%) [4.26%]	63.50 (120.10%) [-3.79%]	46.76 (-42.31%) [-7.08%]
S2L-40-PC2	31.20 (105.26%) [-7.72%]	61.94 (114.70%) [-6.15%]	49.00 (-39.55%) [-2.62%]

Valor (Variação em relação à laje SREF); Valor [Variação em relação às lajes reforçadas com CFRP com pré-tensão (sem pré-fendilhação)].

Os resultados apresentados na Tabela 23 e a análise da Figura 69a) permitem constatar que, tendo como base o comportamento da laje de referência sem CFRP (laje SREF), as soluções de reforço de CFRP com 20% de pré-tensão das lajes com pré-fendilhação (S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2) proporcionaram acréscimos de carga de serviço (F_{serv}) e, esse acréscimo foi tanto menor quanto maior o nível de dano aplicado no ensaio de pré-fendilhação. As lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 apresentaram um acréscimo de 81.84% e 66.51%, respetivamente, em relação à laje SREF. Nas lajes pré-fendilhadas e reforçadas com um nível de pré-tensão de 20%, em relação à laje semelhante reforçada sem pré-fendilhação (S2L-20), o valor de F_{serv} foi 3.17% superior para a laje S2L-20-PC1 e 5.52% inferior para a laje S2L-20-PC2.

Em termos de carga máxima (F_{max}), verifica-se que as lajes pré-fendilhadas e, posteriormente, reforçadas com nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20% apresentam um aumento percentual, relativamente à laje SREF, de 111.47% e 122.67%, respetivamente, para as lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2. Tendo como base o comportamento da laje S2L-20, as lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 tiveram valores de carga máxima ligeiramente inferiores (7.66% e 2.77%, respetivamente, para as lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2).

Em relação à flecha a meio-vão associada à carga máxima ($u_{F_{max}}$) verificou-se que, independentemente do nível de dano, nas lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 o valor de $u_{F_{max}}$ foi superior ao da laje de S2L-20, respetivamente, 0.73% e 5.76%. Em comparação com a laje de referência (SREF), as lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 apresentam decréscimos de valores de $u_{F_{max}}$ de 18.68% e 14.62%, respetivamente.

A análise dos resultados da Tabela 23 e da Figura 69b) permite afirmar que o que foi referido, em termos de carga de serviço (F_{serv}) na análise das lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2 (lajes pré-fendilhadas e reforçadas com 20% de pré-tensão), se repete nas lajes pré-fendilhadas e reforçadas com nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 40%. Assim, as soluções de reforço das lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 proporcionaram acréscimos de carga de serviço (F_{serv}), relativamente à laje SREF. Com efeito, às lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 está associado um acréscimo de F_{serv} , em relação à laje SREF, de 131.91% e 105.26%, respetivamente. Nas lajes pré-fendilhadas e reforçadas com um nível de pré-tensão de 40%, em relação à laje semelhante reforçada sem pré-fendilhação (laje S2L-40), o valor de F_{serv} foi 4.26% superior na laje S2L-40-PC1 e 7.72% inferior na laje S2L-40-PC2.

A carga máxima (F_{max}) das lajes pré-fendilhadas e reforçadas com nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 40% foi de 63.50 kN para a laje S2L-40-PC1 e 61.94 kN para a laje S2L-40-PC2, verificando-se assim que, quando se comparam estes valores com o valor da carga máxima da laje de SREF (28.85 kN), a presença de reforço de CFRP pré-tensionado, independentemente do nível de dano, proporcionou um aumento significativo em termos de capacidade resistente máxima (entre os 115% e 120%). Em comparação com a laje S2L-40, as lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 registaram valores de carga máxima (F_{max}) ligeiramente menores: 3.79% para a laje S2L-40-PC1 e 6.15% para a laje S2L-40-PC2.

Em termos dos valores da flecha a meio-vão ($u_{F_{max}}$) verificou-se que, independentemente do nível de dano, houve elevados decréscimos do deslocamento a meio-vão relativamente à laje SREF. Com efeito, as lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 apresentam decréscimos de valores de $u_{F_{max}}$ de 42.31% e 39.55%, respetivamente. Contrariamente às lajes S2L-20-PC1 e S2L-20-PC2, as lajes pré-fendilhadas e, posteriormente, reforçadas com nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 40% (lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2) apresentaram diminuição de flecha a meio-vão em relação à laje sem pré-fendilhação (laje S2L-40). Nas lajes S2L-40-PC1 e S2L-40-PC2 o valor de $u_{F_{max}}$ foi inferior, respetivamente, em 7.08% e 2.62% do valor de $u_{F_{max}}$ da laje de S2L-40.

A Figura 70 apresenta o efeito do nível de pré-tensão aplicado nos laminados de CFRP (20% ou 40% da sua resistência máxima à tração) e do nível de pré-fendilhação (sem dano, dano 1 e dano 2) em termos do acréscimo de carga de serviço (F_{serv}), tendo como base o valor obtido para a referida carga na laje de referência sem CFRP (laje SREF).

Da análise da Figura 70 é possível concluir que, independentemente do nível de pré-tensão e da aplicação ou não de pré-fendilhação antes da solução de reforço, houve acréscimos de carga de serviço (F_{serv}) consideráveis (entre os 67% e os 132%). A análise desta figura permite verificar, em comparação com as lajes reforçadas com um nível de pré-tensão nos laminados de CFRP de 20%, o melhor desempenho em termos do acréscimo da carga de serviço das soluções com laminados de CFRP pré-tensionados com 40% (em termos médios o acréscimo de carga de serviço foi de 75% e 120%, respetivamente, para as soluções com 20% e 40% de pré-tensão). Independentemente do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP, as lajes pré-fendilhadas com o primeiro nível de dano são as que apresentam maiores acréscimos (o acréscimo de carga de serviço foi de 81.84% e 131.91%, respetivamente, para as lajes S2L-20-PC1 e S2L-40-PC1). Para além disso, é possível verificar que as lajes pré-fendilhadas com o segundo nível de dano (lajes S2L-20-PC2 e S2L-40-PC2) apresentam valores de carga de serviço inferiores às lajes pré-fendilhadas com o primeiro nível de dano e às lajes sem pré-fendilhação (lajes S2L-20 e S2L-40).

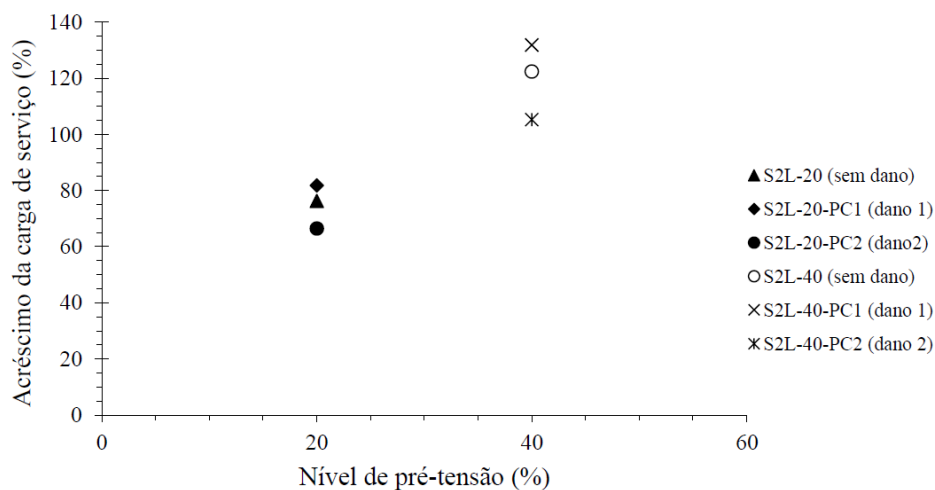


Figura 70 - Acréscimo da carga de serviço vs nível de pré-tensão no CFRP.

A Figura 71 apresenta efeito do nível de pré-tensão aplicado nos laminados de CFRP (20% ou 40% da sua resistência à tração) e o nível de pré-fendilhação (sem dano, dano 1 e dano 2) em termos do acréscimo de carga máxima, tendo como base o valor obtido para a referida carga na laje de referência sem CFRP (laje SREF).

Da Figura 71 visualiza-se que, independentemente do nível de dano e da percentagem de pré-tensão nos laminados, os acréscimos de carga máxima foram semelhantes para as seis lajes em análise. Da Figura 71 conclui-se também que, independentemente do nível de pré-tensão e da aplicação ou não de pré-fendilhação antes da aplicação do reforço, houve acréscimos de carga máxima (F_{max}) consideráveis (o aumento médio F_{max} foi de 121%). Independentemente do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP, foram as lajes sem pré-fendilhação que apresentaram os maiores acréscimos de carga máxima (o acréscimo de carga máxima foi de 129.01% e 128.77%, respetivamente, para as lajes S2L-20 e S2L-40).

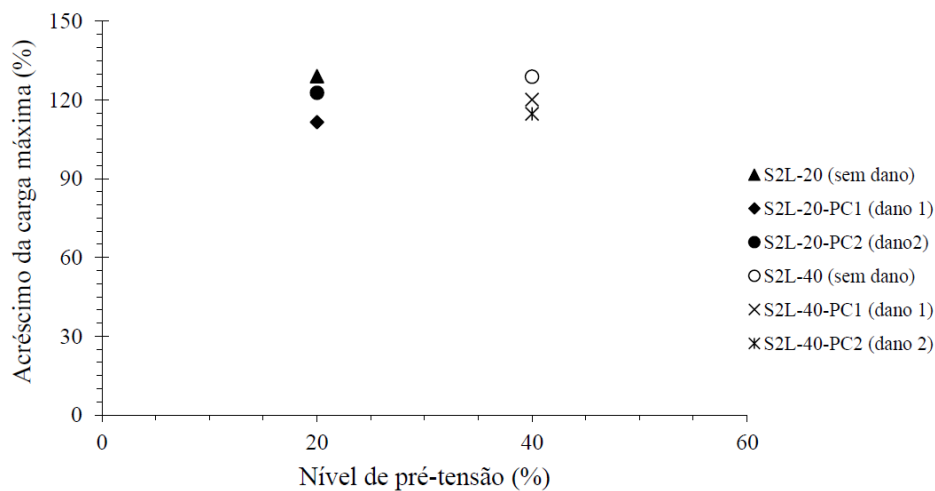


Figura 71 - Acréscimo da carga máxima vs nível de pré-tensão no CFRP.

Capítulo 4

Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros

No presente capítulo apresentam-se, de modo resumido, os aspetos mais importantes da investigação experimental desenvolvida na presente dissertação bem como as principais conclusões que a mesma permitiu alcançar. Do mesmo modo, apresentam-se ainda propostas para possíveis desenvolvimentos futuros.

4.1. CONCLUSÕES GERAIS

Na presente dissertação foi desenvolvida uma investigação experimental no âmbito do reforço à flexão de lajes de betão armado pré-fendilhadas utilizando laminados de CFRP inseridos pré-tensionados (técnica NSM). Fundamentalmente, esta dissertação teve como principal objetivo avaliar o efeito da pré-fendilhação do betão no reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados. Para tal, foi realizado um programa experimental com quatro lajes de betão armado que tinham uma seção transversal de 600×120 mm² e um comprimento de 2600 mm. Foram testados dois níveis de pré-tensão e para cada nível de pré-tensão foram analisados dois níveis de dano (pré-fendilhação). O comportamento das lajes ensaiadas na presente dissertação foi comparado com o de lajes semelhantes, com a diferença de não ter existido pré-fendilhação antes da execução do reforço.

A realização do programa experimental associado à presente dissertação permitiu extrair as seguintes conclusões:

- Independentemente do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP e independentemente do nível de pré-fendilhação instalado antes da aplicação do reforço das lajes, o modo de rotura que se observou em todas as lajes pré-fendilhadas e reforçadas com CFRP pré-tensionado foi o esgotamento da capacidade máxima resistente do CFRP (rotura do CFRP) com as armaduras longitudinais tracionadas em cedência. Este modo de rotura foi também o registado em lajes semelhantes com a diferença de não ter existido pré-fendilhação antes da execução do reforço. Desta forma verifica-se que os níveis de dano (pré-fendilhação) testados não modificaram o modo de rotura das lajes reforçadas com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados.
- Independentemente do nível de pré-fendilhação, o aumento do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP inseridos proporcionou um incremento de rigidez inicial, um aumento da

carga de serviço e uma diminuição da flecha correspondente à capacidade de carga máxima, o que implicou uma diminuição da ductilidade.

- Em termos de carga máxima, os valores foram semelhantes para as quatro lajes testadas, independentemente do nível de dano e da percentagem de pré-tensão. Para tal contribui o facto do modo de rotura das quatro lajes ter sido o esgotamento da capacidade máxima resistente do CFRP (rotura do CFRP).
- Independentemente do nível de pré-tensão, o aumento do nível de dano (do dano 1 para o dano 2) proporcionou uma quebra da rigidez que motivou uma diminuição nos valores da carga de serviço (F_{serv}). Com efeito, os valores de F_{serv} foram de 27.64 kN e 25.31 kN para as lajes S2L-20-PC1 (nível de dano 1 e 20% de pré-tensão) e S2L-20-PC2 (nível de dano 2 e 20% de pré-tensão), respetivamente, o que corresponde a um decréscimo de 8.43% de F_{serv} com o aumento do dano. Os valores de F_{serv} foram de 35.25 kN e 31.20 kN para as lajes S2L-40-PC1 (nível de dano 1 e 40% de pré-tensão) e S2L-40-PC2 (nível de dano 2 e 40% de pré-tensão), respetivamente, o que corresponde a um decréscimo de 11.5% de F_{serv} com o aumento do dano. Independentemente do nível de pré-tensão, as variações da carga máxima e da flecha correspondente à capacidade de carga máxima não foram significativas (no máximo cerca de 5%) com o aumento do nível de pré-fendilhação (nível de dano) instalado antes da aplicação do reforço nas lajes.
- As extensões máximas registadas, nos extensómetros elétricos aplicados nos laminados de CFRP, variaram entre 14.68‰ e 15.11‰. Tendo em consideração que o valor médio da extensão máxima do laminado (ensaio de tração uniaxial) era de 15.80‰, verifica-se a existência de elevados níveis de mobilização do reforço de CFRP nas configurações de reforço testadas, independentemente do nível de pré-fendilhação e do nível de pré-tensão. Estes níveis (cerca dos 100%) estão diretamente relacionados aos modos de rotura das lajes (rotura do CFRP) e demonstram o elevado desempenho da técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados quando aplicada no reforço à flexão de lajes pré-fendilhadas de betão.
- As curvas de comportamento força vs flecha a meio-vão correspondentes ao ensaio à rotura das lajes permitiram concluir que, independentemente do nível de pré-tensão, numa fase inicial, as lajes pré-fendilhadas e posteriormente reforçadas com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados apresentaram menor rigidez do que as lajes semelhantes mas sem pré-fendilhação do betão. Com efeito, tipicamente as lajes pré-fendilhadas e posteriormente reforçadas com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados apresentaram dois estados principais de comportamento: betão fendilhado com o aço não plastificado e betão fendilhado após a

cedência das armaduras (nas lajes reforçadas com CFRP sem pré-fendilhação existe ainda o estado associado à fase inicial em que o betão não se encontra fendilhado).

- A aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados no reforço à flexão de lajes de betão armado proporcionou benefícios notórios, independentemente da instalação ou não de uma pré-fendilhação previamente à aplicação do reforço nas lajes, quer em termos de carga de serviço quer em termos de capacidade de carga máxima. Com efeito, em termos médios, a aplicação de uma pré-tensão de valor igual a 20% e 40% da capacidade máxima resistente à tração do CFRP, e tendo como base a laje de referência sem CFRP, motivou um aumento na carga de serviço de, respetivamente, 75% e 120%. Para ambos os níveis de pré-tensão (20% e 40%), e tendo como base a laje de referência sem CFRP, a carga máxima aumentou 121%.
- Em termos de carga de serviço, e tendo como base as lajes reforçadas sem pré-fendilhação, verificou-se que, independentemente do nível de pré-tensão no CFRP, apenas as lajes sujeitas ao segundo nível de dano é que apresentaram valores ligeiramente inferiores. Independentemente do nível de pré-tensão no CFRP, as lajes reforçadas sem pré-fendilhação apresentaram valores de carga máxima ligeiramente superiores aos das lajes reforçadas após terem sido pré-fendilhadas.

4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados obtidos no âmbito da presente dissertação são uma contribuição para o nível do conhecimento do comportamento estrutural de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados. Assim, os desenvolvimentos futuros devem contemplar os seguintes aspetos:

- Avaliar o comportamento a longo prazo dos reforços de CFRP pré-tensionados aplicados de acordo com a técnica NSM;
- Avaliar o efeito de uma maior percentagem de laminados de CFRP no reforço à flexão de lajes de betão armado com e sem pré-fendilhação do betão;
- Definição de estratégias tendo em vista controlar a diminuição da ductilidade que se verificou existir com o aumento do nível de pré-tensão instalado no CFRP;
- Desenvolvimento de um dispositivo apropriado que permita a aplicação do reforço com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados em situações correntes de obra.

Capítulo 5

Referências Bibliográficas

- Appleton, J. e Costa, A., 2012, “*Apontamentos das disciplinas de Reabilitação e Reforço de Estruturas*”, Aula 10.2 - Técnicas de Reforço, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa, 215 pp.
- Aslam, M., Shafigh, P., Jumaat, M.Z. e Shah, S.N.R., 2015, “*Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers – A review*”, *Construction and Building Materials*, 82, pp. 235-256.
- Badawi M, e Soudki K., 2009, “*Flexural strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRP rods – experimental and analytical investigation*”, *Construction and Building Materials*, 23(10), pp. 3292-3000.
- Barros, J.A.O., 2004, “*Materiais compósitos no reforço de estruturas*”, Jornadas de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, 14 pp.
- Barros, J.A.O., 2007, “*Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão – Parte I: propriedades e técnicas*”, *Revista Construção Magazine*, nº22, pp. 26-35.
- Barros, J.A.O. e Fortes, A.S., 2005, “*Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits*”, *Journal Cement and Concrete Composites*, 27(4), pp. 471-480.
- Barros, J.A.O. e Gomes, A., 2008, “*Laminados de CFRP pré-tensionados para o reforço à flexão de vigas de betão armado*”, BE2008 - Encontro Nacional de Betão Estrutural 2008, Guimarães, 5-7 de Novembro, 10 pp.
- Barros, J.A.O., Dias, S.J.E. e Fortes, A.S., 2005, “*Near surface mounted technique for the flexural and shear strengthening of concrete beams*”, *International Conference on Concrete for Structures - INCOS 05*, Coimbra, Portugal, 7-8 July, pp. 229-236.

- Barros, J.A.O., Dias, S.J.E. e Lima, J.L.T., 2007, “*Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams*”, *Journal Cement and Concrete Composites*, 29(3), pp. 203-217.
- Blaschko, M. e Zilch, K., 1999, “*Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits*”, 12th International Conference on Composite Materials - ICCM-12, Paris, France, 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, Setembro, 417 pp.
- Bonaldo, E., Barros, J.A.O. e Lourenço, P.B., 2007, “*Influence of the spacing between NSM-CFRP laminates on the flexural strengthening efficacy of RC slabs*”, 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), University of Patras, Patras, Grécia, 16-18 July, 11 pp.
- Choi H.T., West J.S. e Soudki, K.A., 2011, “*Effect of partial unbonding on prestressed nearsurface-mounted CFRP-strengthened concrete T-Beams*”, *Journal of Composite for Construction*, 15(1), pp. 93-102.
- Costa, I., 2014, “*Prestressed carbon fibre laminates applied according to near surface mounted technique to increase the flexural resistance of reinforced concrete beams*”, Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Janeiro, 324 pp.
- Costa, I. e Barros, J.A.O., 2012, “*Design and development of hydraulic-electro-mechanical system to apply pre-stressed CFRP laminates according to the NSM technique in laboratory conditions*”, Technical report 12.DEC/E-10, March.
- 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, 26-28 June (CD-ROM).

- Dalfré, G.M. e Barros, J.A.O., 2013, “*NSM technique to increase the load carrying capacity of continuous RC slabs*”, Engineering Structures, 56, November, 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: Engineering, 38(2), pp. 119-143.
- Dias, S.J.E., 2001, “*Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Porto, Março, 203 pp.
- Dias, S.J.E., 2008, “*Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com técnica de inserção de laminados de CFRP*”, Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, Julho, 391 pp.
- Dias, S.J.E., Juvandes, L. e Figueiras, J., 2006, “*Estruturas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas de CFRP*”, Revista IBRACON de Estruturas, 2(2), Junho, pp. 252-275.
- Dias, S.J.E., Barros, J.A.O. e Azevedo, C., 2012, “*Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos*”, BE2012 - Encontro Nacional de Betão Estrutural, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 24-26 de Outubro, 9 pp.
- Dias, S.J.E., Hosseini, M.R.M. e Barros, J.A.O., 2014a, “*Comportamento de lajes de betão armado reforçadas à flexão usando a técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados*”, 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Aveiro, 15-17 de Outubro, 10 pp.
- Dias, S.J.E., Hosseini, M.R.M. e Barros, J.A.O., 2014b, “*Aplicação da técnica MSM com laminados de CFRP pré-tensionados no reforço à flexão de lajes de betão armado*”, 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, Lisboa, 26-28 de Novembro, 14 pp.

- El-Hacha, R. e Rizkalla, S.H., 2004, “*Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures*”, ACI Structural Journal, 101(5), September-October, pp. 717-726.
- El-Hacha, R. e Gaafar, M., 2011, “*Flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed, mounted CFRP bars*”, PCI Journal, 56(4), pp. 134-151.
- El-Hacha, R. e Soudki, K., 2013, “*Prestressed near-surface mounted fibre reinforced polymer reinforcement for concrete structures - a review I*”, Canadian Journal of Civil Engineering, 40(11), pp. 1127-1139.
- Escobar, C.J., 2003, “*Avaliação do desempenho estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de CFRP tensionadas*”, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 206 pp.
- Filho, J.N.S., 2005, “*Análise experimental de vigas "T" em concreto reforçadas à flexão com FRP submetidas a carregamentos pseudo-estáticos e cíclicos*”, Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 345 pp.
- Gaafar, M.A. e El-Hacha, R., 2008, “*Strengthening reinforced concrete beams with prestressed near surface mounted FRP strips*”, 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008), 22-24 July, Zurich, Switzerland, 6 pp.
- Gaafar, M.A. e El-Hacha, R., 2009, “*Prestressed Near-Surface Mounted CFRP rebars for flexural strengthening of reinforced concrete beams*”, Proceedings of the 9th International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-9), 13-15 July, Sydney, Australia, 4 pp.
- Hajihashemi, A., Mostofinejad, D. e Azhari, M., 2011, “*Investigation of RC Beams Strengthened with Prestressed NSM CFRP Laminates*”, Journal of Composites for Construction, 15(6), pp. 887-895.
- Hosseini, M.R.M., Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2014, “*Effectiveness of prestressed NSM CFRP laminates for the flexural strengthening of RC slabs*”, Composite Structures, 111, May, pp. 249-258.

- ISO 527-5, 1997, “*Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*”, International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp.
- Jung, W., Park, J. e Park, Y., 2009, “*An experimental study on application of new prestressing system for nsm strengthening technique*”, 9th International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-9), 15 July, Sydney, Australia, 4 pp.
- Juvandes, L., 2011, “*Aplicações de Compósitos FRP no Reforço de Estruturas*”, 1^{as} Jornadas de Materiais na Construção, LABEST/Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, pp. 239-270.
- 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 – LNEC, n°52, pp. 33-42.
- Kotynia, R., 2007, “*Analysis of the flexural response of NSM FRP-strengthened concrete beams*”, 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPCS-8), Patras, Grécia, 16-18 July.
- LNEC E397-1993, 1993, “*Betão – Determinação do módulo de elasticidade em compressão*”, Especificação LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, 2 pp.
- Nordin, H., Taljsten, B. e Carolin, A., 2002, “*CFRP Near Surface Mounted Reinforcement (NSMR) for pre-stressing concrete beams*”, 3th International Conference on Composites in Infrastructure - ICCI 02, 10-12 June, San Francisco.
- NP EN 206-1, 2007, “*Betão, Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*”, IPQ - Instituto Português da Qualidade, Junho, 84 pp.
- NP EN 1992-1-1, 2010, “*Projeto de estruturas de betão armado – Regras gerais e regras para edifícios*”, IPQ - Instituto Português da Qualidade, Março, 259 pp.
- NP EN 10002-1, 1900, “*Materiais metálicos: Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio (à temperatura ambiente)*”.

- Oliveira, P.A. da C., 2012, “*Pré-esforço em lajes de edifícios*”, Tese de Mestrado em Construção Civil, Ramo de Estruturas, Instituto Politécnico de Sétubal, Sétubal, Setembro, 151 pp.
- Sena-Cruz, J.M., 2008, “*Técnica NSM - uma nova abordagem do Reforço de Estruturas com Materiais Compósitos*”. Inovação e Reabilitação: FRP, Revista Construção Magazine, nº28, pp. 27-30.
- Sena-Cruz, J.M., 2011, “*Apontamentos das disciplinas de Reabilitação e Reforço de Estruturas*”, Aula 17 - Projeto de reforço de FRP, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa, 60 pp.
- Teixeira, T., Correia, L., Sena-Cruz, J. e Michels, J., 2014, “*Reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de CFRP pré-esforçados: comportamento em estado limite último e de utilização*”, 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, Lisboa, 26-28 de Novembro, 14 pp.
- Vieira, A.C.C., 2013, “*Influência da pré-fendilhação do betão no reforço à flexão de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos*”, Tese de Mestrado Integrado, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Setembro, 101 pp.