



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Martinho Vilaça da Costa

Comportamento de vigas de betão
armado reforçadas simultaneamente à
flexão e ao corte com laminados de
CFRP inseridos



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Martinho Vilaça da Costa

Comportamento de vigas de betão
armado reforçadas simultaneamente à
flexão e ao corte com laminados de
CFRP inseridos

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Salvador José Esteves Dias
Professor Doutor Eduardo Nuno Borges Pereira

outubro de 2013

Agradecimentos

Expresso aqui um agradecimento a todas as pessoas e entidades que contribuíram para a realização desta dissertação.

Ao orientador Professor Salvador Dias e ao coorientador Professor Eduardo Pereira pelos seus ensinamentos, revisões críticas e disponibilidade demonstradas ao longo deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Marco Peixoto e António Matos por toda a ajuda prestada para a realização deste trabalho.

À empresa Casais, S.A., agradeço o apoio disponibilizado na construção das vigas de betão armado, à empresa Artecante, Lda, pelo contributo prestado na execução dos entalhes para aplicação do reforço de CFRP e à empresa S&P Reinforcement pelo fornecimento dos laminados de CFRP e do adesivo epóxi.

O maior agradecimento aos meus pais, por todo o apoio e incentivo que me transmitiram durante o meu percurso académico. Quero também agradecer à minha irmã pela ajuda disponibilizada.

A todos os amigos que ajudaram e se interessaram pelo acompanhamento da realização deste trabalho.

Resumo

A presente dissertação apresenta a investigação realizada sobre o reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) inseridos em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica de reforço designada na literatura internacional por NSM – Near Surface Mounted).

Esta dissertação inicia-se com a revisão bibliográfica sobre o estado do conhecimento atual da utilização de materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado, com particular destaque para o reforço de CFRP aplicado com a técnica NSM. Posteriormente é apresentado o programa experimental realizado com vista a verificar a exequibilidade e a eficiência do reforço simultâneo à flexão e ao corte, com laminados de CFRP inseridos, de vigas de betão armado, pré-fendilhadas. Os resultados obtidos são analisados em termos do acréscimo de capacidade de carga proporcionado pelo reforço de CFRP, do nível de mobilização do reforço de CFRP e do modo de rotura. Por fim são apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho e indicadas algumas perspetivas de desenvolvimentos futuros.

O programa experimental realizado no âmbito desta dissertação e os resultados obtidos formam parte integrante do concurso internacional “*SC@UM Challenge - Competition for the prediction of the behaviour of a CFRP strengthened reinforced concrete beam*”. Este concurso foi organizado no âmbito da Conferência Internacional “*FRPRCS11 - Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*”, com o apoio da S&P Ibérica e do “*IIFC - International Institute for FRP in Construction*”, tendo decorrido entre os dias 26 e 28 de junho de 2013 em Guimarães, Portugal. Todos os procedimentos de ensaio seguiram cuidadosamente a normalização aplicável e os requisitos exigentes da competição internacional em que se inseriram. O autor da dissertação e os orientadores agradecem o apoio dos patrocinadores e da organização da conferência e do concurso, que disponibilizaram os recursos e possibilitaram a realização de um conjunto de ensaios relevante para a temática em estudo.

Palavras-chave: Vigas de betão armado, inserção de laminados de CFRP, comportamento experimental, reforço simultâneo à flexão e ao corte, SC@UM Challenge, FRPRCS11 – *Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*.

Abstract

The present dissertation results of a research about the simultaneously strengthening on flexural and shear of Reinforced Concrete (RC) beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) laminates applied according to the Near Surface Mounted (NSM) technique, which is based on introducing CFRP laminates into slits made on the concrete cover of the beams.

This dissertation starts with the state of the art about the use of CFRP materials in the strengthening of RC structures, with particular emphasis on the NSM technique. After is presented the experimental program conducted with the purpose to verify the enforceability and the efficiency of the simultaneously strengthening on flexural and shear of pre-cracking RC beams using CFRP laminates applied according NSM technique. The results are analyzed in terms of increase of load provided by the reinforcement with CFRP, the level of mobilization of CFRP reinforcement and the failure mode. Finally, the most relevant conclusions extracted from the present study are presented, and work to be developed in the future is also suggested.

The experimental program carried out in this research was part of the “SC@UM Challenge – Competition for the prediction of the behavior of a CFRP strengthened reinforced concrete beam”. The SC@UM Challenge was hosted by the “FRPRCS1 - 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures”, with the support of S&P Ibérica and the IIFC – International Institute for FRP in Construction, and took place at Guimarães – Portugal, the 24th to the 26th of June 2013. All testing procedures have followed carefully the applicable guidelines and norms, as required by the demanding rules of the competition. The author and the supervisors acknowledge the support provided by the sponsors and by the FRPRCS11 organizing committee, and all the resources provided to accomplish the important results obtained, which are of great interest to the research topic.

Keywords: Reinforced concrete beams, NSM CFRP laminates, experimental behavior, simultaneous strengthening on flexural and shear, SC@UM Challenge, FRPRCS1 - 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures.

Índice geral

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO/ PALAVRAS-CHAVE	iii
ABSTRACT/KEYWORDS	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xvii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1.1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1.1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	1.2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	1.3
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2.1
2.1. TÉCNICAS DE REFORÇO ESTRUTURAL CONVENCIONAIS.....	2.1
2.2.1. Fibras.....	2.3
2.2.2. Matriz Polimérica.....	2.5
2.3. SISTEMAS COMPÓSITOS DE CFRP.....	2.6
2.4. TÉCNICAS DE REFORÇO UTILIZANDO MATERIAIS COMPÓSITOS DE CFRP.....	2.7
2.4.1. Técnica da colagem externa com compósitos de CFRP (EBR).....	2.7

2.4.2. Técnica da inserção do CFRP no betão de recobrimento (NSM).....	2.10
2.5. REFORÇO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM LAMINADOS DE CFRP INSERIDOS	2.17
2.5.1. Reforço à flexão.....	2.17
2.5.2. Reforço ao corte.....	2.20
2.5.3. Reforço simultâneo à flexão e ao corte.....	2.24

CAPÍTULO 3 - DESEMPENHO DO SISTEMA DE REFORÇO SIMULTANEO À FLEXÃO E AO CORTE **3.1**

3.1. GEOMETRIA E EXECUÇÃO DAS VIGAS T.....	3.2
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	3.4
3.2.1. Betão	3.4
3.2.2. Aço.....	3.9
3.3. COMPORTAMENTO FORÇA-FLECHA DAS VIGAS T SEM REFORÇO	3.14
3.3.1. Ensaio de pré-fendilhação.....	3.14
3.3.2. Ensaio de rotura da Viga_1	3.16
3.4. DESEMPENHO DO SISTEMA DE REFORÇO	3.17
3.4.1. Estudo da geometria e do procedimento de aplicação do reforço.....	3.18
3.4.2. Caracterização mecânica dos laminados de CFRP	3.23
3.4.3. Caracterização mecânica do adesivo epóxi.....	3.24
3.4.4. Comportamento força-flecha da Viga_2.....	3.27
3.5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	3.28

3.6. CONCLUSÕES	3.34
-----------------------	------

CAPÍTULO 4 – MOBILIZAÇÃO DOS MECANISMOS DE REFORÇO E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

4.1. INICIAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FENDAS DURANTE O ENSAIO DE ROTURA.....	4.2
4.1.1 Viga_1 (não reforçada).....	4.2
4.1.2 Viga_2 (reforçada com laminados de CFRP)	4.3
4.2 ESTADO DE DEFORMAÇÃO E NÍVEL DE MOBILIZAÇÃO DO REFORÇO DURANTE A PRÉ-FENDILHAÇÃO E DURANTE A ROTURA	4.7
4.2.1 Pré-fendilhação das vigas.....	4.9
4.2.2 Ensaio de rotura das vigas.....	4.11
4.2.3 Relação força <i>versus</i> extensão para os vários elementos de reforço durante o ensaio de rotura das vigas	4.17
4.3 DISCUSSÃO DE RESULTADOS	4.21
4.4 CONCLUSÕES	4.22

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 5.1

5.1. CONCLUSÕES GERAIS.....	5.1
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	5.2

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 6.1

Índice de figuras

Figura 2.1 - Constituição dos materiais compósitos de FRP (Machado, 2007).	2.3
Figura 2.2 - Relação tensão vs. extensão das fibras de aramida, carbono e vidro, do aço A500 e de cordões de pré-esforço (ACI 440R-96, 2002).	2.4
Figura 2.3 - Materiais compósitos de CFRP.....	2.6
Figura 2.4 - Execução do reforço de faixas de laje de betão armado com mantas ou laminados de CFRP aplicados com a técnica EBR (Dias, 2001).	2.8
Figura 2.5 - Aplicação da técnica da colagem externa (EBR) e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias <i>et al.</i> , 2006).	2.9
Figura 2.6 - Modos de rotura de vigas de betão armado reforçadas à flexão com compósitos de CFRP com recurso à técnica EBR (Buyukozturk <i>et al.</i> , 2004).	2.10
Figura 2.7 - Execução do reforço à flexão de uma viga de betão armado usando a técnica NSM com laminados de CFRP (Dias, 2008).	2.11
Figura 2.8 - Aplicação da técnica NSM e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias 2008).	2.11
Figura 2.9 - Elementos de CFRP usados no reforço com a técnica NSM (De Lorenzis e Teng 2007).	2.12
Figura 2.10 - Secção transversal das lajes e vigas testadas por Blaschko e Zilch (1999) (dimensões em cm).	2.13
Figura 2.11 - Resultados dos ensaios realizados por Blaschko e Zilch (1999).	2.13
Figura 2.12 - Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço presentes em todos os modelos ensaiados (Dias e Barros 2010).	2.14
Figura 2.13 - Localização dos estribos de aço (traço cheio), laminados (tracejado) e mantas de CFRP (Dias e Barros 2010).	2.15

Figura 2.14 - Eficácia do reforço em termos de acréscimo de carga máxima vs percentagem de CFRP (Dias e Barros (2010)).	2.16
Figura 2.15 - Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço comuns a todas as vigas ensaiadas por Dias <i>et al.</i> (2012) (dimensões em mm).	2.17
Figura 2.16 - Soluções de reforço de CFRP testadas por Dias <i>et al.</i> (2012) (dimensões em mm).	2.18
Figura 2.17 - Relação força vs. flecha a meio vão das vigas ensaiadas por Dias <i>et al.</i> (2012).	2.18
Figura 2.18 - Modos de rotura ocorridos nas vigas reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos (Dias <i>et al.</i> , 2012).	2.19
Figura 2.19 - Dados gerais sobre as vigas ensaiadas por Dias (2008) (dimensões em mm).	2.21
Figura 2.20 - Efeito do betão na eficácia de uma solução de CFRP (Dias, 2008).	2.23
Figura 2.21 - Efeito da percentagem de estribos de aço na eficácia de uma solução de reforço de CFRP (Dias, 2008).	2.23
Figura 2.22 - Efetividade do reforço de CFRP (ϵ_{ef}) em função da percentagem ρ_f (Dias, 2008).	2.24
Figura 2.23 - Efetividade do reforço de CFRP (\square_{fe}) em função da orientação do CFRP (Dias, 2008).	2.24
Figura 2.24 - Vigas ensaiadas: geometria, armaduras comuns a todas as vigas, reforço à flexão com laminados de CFRP e reforço do canto inferior esquerdo com manta de CFRP (Dias e Barros, 2005).	2.25
Figura 2.25 - Reforço simultâneo à flexão e ao corte de uma viga de betão armado com laminados de CFRP inseridos (Dias e Barros, 2005).	2.25
Figura 2.26 - Vigas ensaiadas: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado) (Dias e Barros, 2005).	2.26
Figura 2.27 - Modos de rotura das vigas reforçadas simultaneamente à flexão e ao corte com laminados de CFRP inseridos (Dias e Barros, 2005).	2.28
Figura 3.2- Secção transversal das vigas em T em betão armado.	3.2
Figura 3.1 - Corte longitudinal das vigas T em betão armado.	3.2

Figura 3.3 - Execução das vigas utilizadas no programa experimental.....	3.4
Figura 3.4 - Ensaio à compressão uniaxial: a) determinação da carga máxima; b) determinação do módulo de elasticidade.....	3.5
Figura 3.5 - a) Provetes cilíndricos; b) modo de rotura obtido em três provetes representativos.	3.6
Figura 3.6- Diagrama tensão vs. extensão dos cilindros ensaiados aos 8 dias.	3.6
Figura 3.7 - Diagrama tensão vs. extensão dos cilindros ensaiados aos 28 dias.	3.7
Figura 3.8 - Diagrama tensão vs. extensão dos cilindros ensaiados aos 99 dias.	3.8
Figura 3.9 - Preparação do ensaio de tração para os varões de aço. Instalação de um clip-gauge (comprimento de medição = 50 mm).....	3.10
Figura 3.10 - Varões de aço testados a) antes do ensaio b) depois do ensaio.	3.10
Figura 3.11 - Diagrama tensão vs. extensão dos varões de 6 mm de diâmetro ensaiados.....	3.11
Figura 3.12 - Diagrama tensão vs. extensão dos varões de 10 mm de diâmetro ensaiados...	3.12
Figura 3.13 - Diagrama tensão vs. extensão dos varões de 16 mm de diâmetro ensaiados...	3.13
Figura 3.14 - Esquema geral do tipo de ensaio das vigas.....	3.14
Figura 3.15 - Diagrama força vs. deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas durante o ensaio de pré-fendilhação.	3.15
Figura 3.16 - Padrão de fendilhação instalado no ensaio de pré-fendilhação (menor vão de corte).....	3.16
Figura 3.17 - Diagrama força vs. deslocamento da Viga_1.....	3.16
Figura 3.18 - Modo de rotura da Viga_1.	3.17
Figura 3.19 - Secção transversal da viga reforçada.	3.18
Figura 3.20 - Corte longitudinal da viga reforçada	3.19
Figura 3.21 - Secção transversal da viga reforçada.	3.20
Figura 3.22 - Abertura dos entalhes transversais (a, b e c) e dos entalhes longitudinais (d).	3.21
Figura 3.23 - Fabrico do adesivo epóxi e pesagem dos componentes.....	3.22
Figura 3.24 - Reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos.	3.22

Figura 3.25 - Resultado final da viga reforçada.....	3.22
Figura 3.26 - Dimensões dos provetes de laminados de CFRP utilizados no ensaio de tração uniaxial.....	3.23
Figura 3.27 - Esquema do ensaio de tração uniaxial para caracterização dos laminados de CFRP.....	3.23
Figura 3.28 - a) Laminados de CFRP utilizados no ensaio b) modo de rotura típica dos laminados de CFRP.....	3.24
Figura 3.29 - a) Adesivo epóxi utilizado para colagem dos laminados de CFRP; b) Dimensões dos provetes utilizados para caracterização experimental do adesivo epóxi.	3.25
Figura 3.30 - Esquema do ensaio de tração uniaxial realizado para caracterização do adesivo epóxi: a) no início do ensaio; b) modo de rotura verificado.	3.25
Figura 3.31 - Provetes de adesivo epóxi: Amostra 1, a) antes do ensaio e b) depois do ensaio; Amostra 2, c) antes do ensaio e d) depois do ensaio.....	3.26
Figura 3.32- Diagrama força vs. deslocamento na secção de aplicação da carga da Viga_2.	3.27
Figura 3.33 - Modo de rotura da Viga_2.	3.28
Figura 3.34 - Comparação do comportamento até à rotura da Viga_1 e da Viga_2.....	3.28
Figura 3.35 - Deformada final das vigas ensaiadas à rotura.	3.29
Figura 3.36 - Estabelecimento do equilíbrio interno da secção de momento máximo..	3.31
Figura 3.37 - Trelíça de Morsch idealizada.	3.32
Figura 4.1 - Comportamento da Viga_1 até à rotura.	4.3
Figura 4.2 - Comportamento da Viga_2 até à rotura.	4.5
Figura 4.3 - Padrão de fendilhação final.	4.6
Figura 4.4 - Instalação dos extensómetros no aço e nos laminados de CFRP.	4.7
Figura 4.5 - Localização dos extensómetros: a) no aço; b) nos laminados de CFRP.	4.8
Figura 4.6 - Localização dos extensómetros: a) no aço; b) nos laminados de CFRP.	4.8
Figura 4.7 - Extensões nas armaduras longitudinais.....	4.9
Figura 4.8 - Extensões nos estribos.....	4.10

Figura 4.9 - Posicionamento do extensómetros na Viga_1 (pré-fendilhação).	4.10
Figura 4.10 - Posicionamento do extensómetros na Viga_2 (pré-fendilhação).	4.11
Figura 4. 11 - Extensões nas amaduras longitudinais da Viga_1 (Extensómetros es4 e es5).	4.12
Figura 4.12 - Extensões nas armaduras transversais da Viga_1 (extensómetros es1, es2 e es3).	4.13
Figura 4.13 - Posicionamento dos extensómetros na Viga_1 (rotura).	4.13
Figura 4.14 - Extensões nas amaduras longitudinais da Viga_2 (Extensómetros es4 e es5).	4.14
Figura 4.15 - Extensões nos laminados de CFRP de reforço à flexão da Viga_2 (extensómetros ec4, ec5 e ec6).	4.15
Figura 4.16 - Extensões na armadura transversal da Viga_2 (extensómetros es1, es2 e es3).	4.16
Figura 4.17 - Extensões nos laminados de CFRP de reforço ao corte (extensómetros ec2, ec3).	4.17
Figura 4.18 - Posicionamento dos extensómetros na Viga_2 (rotura).	4.17
Figura 4.19 - Extensões longitudinais na Viga_1.....	4.19
Figura 4.20 - Extensões transversais na Viga_1.....	4.19
Figura 4.21 - Extensões longitudinais na Viga_2.....	4.20
Figura 4.22 - Extensões transversais na Viga_2.....	4.20

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades do betão, do aço e das fibras de carbono (Carolin (2003) e NP EN 1992-1-1 (2010)).	2.5
Tabela 2.2 - Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecidas (Firmo, 2010).	2.5
Tabela 2.3 - Resultados da capacidade de carga das vigas testadas por Dias <i>et al.</i> (2012).	2.19
Tabela 2.4 - Parâmetros avaliados nas quatro séries de vigas testadas por Dias (2008).	2.21
Tabela 2.5 - Valores máximos das extensões registadas nos laminados de CFRP instrumentados (Dias, 2008).	2.22
Tabela 2.6 - Características das vigas reforçadas com CFRP e resultados em termos de carga máxima e modo de rotura (Dias e Barros, 2005).	2.27
Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas do betão aos 7 dias.	3.7
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do betão aos 28 dias.	3.8
Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas do betão aos 99 dias.	3.9
Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas dos varões de aço com 6 mm de diâmetro.	3.11
Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas dos varões de aço com 10 mm de diâmetro.	3.12
Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas dos varões de aço com 16 mm de diâmetro.	3.13
Tabela 3.7 - Propriedades mecânicas dos laminados de CFRP.	3.24
Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas do adesivo epóxi.	3.26
Tabela 3.9 - Principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas até a rotura.	3.30
Tabela 3.10 - Características dos materiais	3.30
Tabela 4.1 - Extensões máximas registadas.	4.21
Tabela 4.2 - Comparação das extensões estimadas no Capítulo 3 com as extensões reais.	4.22
Tabela 4.3 - Grau de mobilização do sistema de reforço de CFRP testado.	4.22

Capítulo 1

Introdução

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

As estruturas de betão são projetadas para um período de vida útil, durante o qual devem garantir adequada segurança e funcionalidade aos seus utilizadores, sem que haja necessidade de grandes reparações. No entanto, tem-se verificado que é cada vez mais comum a necessidade de efetuar o reforço de estruturas de betão.

Neste contexto de necessidade crescente de intervenções de reforço e tendo em conta os aspetos menos positivos das técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas, surgiu a aplicação dos materiais compósitos de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) no reforço de estruturas de betão. Estes materiais caracterizam-se por apresentarem um reduzido peso específico, elevados valores de resistência à tração e módulo de elasticidade, e são materiais com elevada resistência à corrosão.

O reforço de estruturas de betão armado com compósitos de CFRP pode ser realizado recorrendo à técnica da colagem externa, designada internacionalmente por técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) ou usando a técnica da inserção de laminados ou varões de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento, técnica esta designada internacionalmente por NSM (*Near Surface Mounted*). Em ambas as técnicas de reforço, a ligação do CFRP ao betão é efetuada com recurso a um adesivo epóxi. A técnica NSM é mais recente e surgiu como alternativa à técnica EBR por forma a ultrapassar um aspeto menos positivo desta técnica de reforço: a rotura prematura que tipicamente ocorre em elementos estruturais de betão reforçados com a técnica EBR (descolagem do CFRP). Com efeito, a técnica NSM permite maior mobilização das capacidades resistentes dos CFRP devido ao maior grau de fixação que confere ao reforço (duplicação da área de colagem). Além disso, garante maior proteção dos CFRP da exposição ambiental, da ação do fogo e de atos de vandalismo.

Estudos experimentais já realizados permitiram verificar o melhor desempenho da técnica NSM em relação à técnica EBR, assim como, o melhor desempenho da técnica NSM com laminados de CFRP em relação à técnica NSM com varões de CFRP.

Quando se procede a um reforço à flexão, é necessário verificar se o elemento reforçado tem capacidade de resistir às novas forças de corte associadas ao aumento da resistência em termos de flexão. Assim sendo, a necessidade de um reforço à flexão pode levar à necessidade de um reforço ao esforço transversal. Neste contexto, a presente dissertação terá como objeto de estudo o reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos.

O programa experimental realizado no âmbito desta dissertação e os resultados obtidos formam parte integrante do concurso internacional “SC@UM Challenge - *Competition for the prediction of the behaviour of a CFRP strengthened reinforced concrete beam*”. Este concurso foi organizado no âmbito da Conferência Internacional “FRPRCS11 - *Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*”, com o apoio da S&P Ibérica e do “IIFC - *International Institute for FRP in Construction*”, tendo decorrido entre os dias 26 e 28 de Junho de 2013 em Guimarães, Portugal. Todos os procedimentos de ensaio seguiram cuidadosamente a normalização aplicável e os requisitos exigentes da competição internacional em que se inseriram. O autor da dissertação e os orientadores agradecem o apoio dos patrocinadores e da organização da conferência e do concurso, que disponibilizaram os recursos e possibilitaram a realização de um conjunto de ensaios relevante para a temática em estudo.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

A presente dissertação pretende avaliar experimentalmente a exequibilidade e a eficiência do reforço simultâneo à flexão e ao corte, com laminados de CFRP inseridos, de vigas de betão armado, pré-fendilhadas. Deste modo, os objetivos definidos para a presente dissertação foram os seguintes:

- Avaliar a exequibilidade prática do reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos;
- Avaliar a eficiência do reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos;

- Compreender os mecanismos e modos de rotura preponderantes que resultam de um reforço simultâneo ao corte e à flexão;
- Identificar possíveis mecanismos de interação entre os dois tipos de reforço, que poderão ser favoráveis ou desfavoráveis ao desempenho do sistema de reforço.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em seis capítulos.

No Capítulo 1 – Introdução – é feito o enquadramento geral do tema desta dissertação, onde são definidos os objetivos deste trabalho e é apresentada a forma como esta dissertação está estruturada.

No Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – é apresentado o trabalho de pesquisa bibliográfica referente ao tema da dissertação. Numa primeira fase são introduzidos os materiais compósitos utilizados no reforço de estruturas de betão com particular destaque para os compósitos de CFRP. Posteriormente são apresentadas e comparadas duas técnicas de reforço com materiais compósitos de CFRP, a técnica da colagem externa (EBR) e a técnica da inserção (NSM). A segunda parte deste capítulo é dedicada ao reforço de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos, onde é abordado o reforço à flexão, o reforço ao corte e o reforço simultâneo à flexão e ao corte.

No Capítulo 3 – Desempenho do sistema de reforço simultâneo à flexão e ao corte aplicado em serviço – são apresentados os ensaios realizados em vigas de betão armado para avaliar o desempenho do reforço, nomeadamente o ensaio de pré-fendilhação e ensaio de rotura. Neste capítulo descreve-se também a construção das vigas, a caracterização dos materiais e a aplicação do reforço com laminados de CFRP. Este capítulo termina com a discussão dos resultados obtidos.

No Capítulo 4 – Mobilização dos mecanismos de reforço e comportamento estrutural – é analisado o comportamento das vigas até à rotura e são interpretados os dados relativos ao comportamento das armaduras e dos laminados de CFRP durante os ensaios das vigas.

No Capítulo 5 – Conclusões Gerais e Desenvolvimentos Futuros – são apresentadas as principais conclusões do programa experimental realizado no âmbito desta dissertação e apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

No Capítulo 6 – Referências Bibliográficas – são mencionadas as referências bibliográficas utilizadas como apoio à realização desta dissertação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

No presente capítulo apresenta-se o resultado da pesquisa bibliográfica realizada sobre o tema desta dissertação. Numa primeira fase, após uma breve referência às técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas, são introduzidos os materiais compósitos utilizados no reforço de estruturas de betão, com particular destaque para os compósitos de CFRP. Posteriormente, são apresentadas e comparadas duas técnicas de reforço com materiais compósitos de CFRP, a técnica da colagem externa (EBR) e a técnica da inserção (NSM). A parte final deste capítulo é dedicada ao reforço de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos, onde é abordado o reforço à flexão, o reforço ao corte e o reforço simultâneo à flexão e ao corte.

2.1. TÉCNICAS DE REFORÇO ESTRUTURAL CONVENCIONAIS

Em engenharia civil as estruturas de betão são projetadas para um período de vida útil, durante o qual devem garantir adequada segurança e funcionalidade aos seus utilizadores, sem que haja a necessidade de grandes reparações. No entanto, é cada vez mais comum a necessidade de intervir neste tipo de estruturas e este cenário está associado a fatores como: aumento das cargas atuantes, alterações dos códigos de dimensionamento, ocorrência de acidentes (sismos, explosões) ou correção de erros de projeto e/ou construção. Existem outras situações em que é necessário recuperar as estruturas face à redução das propriedades resistentes dos materiais (corrosão das armaduras e carbonatação do betão). A escolha do tipo de intervenção para fazer face a estas situações passa necessariamente por uma análise técnica e económica de cada caso.

Tendo em conta o cenário anteriormente referido, o reforço de elementos estruturais de betão armado tem vindo a ganhar cada vez mais destaque na construção civil, tendo-se tornado numa das suas principais atividades (Bakis *et al.*, 2002). As técnicas de reforço mais utilizadas recorrem aos materiais convencionais (betão e aço), através do encamisamento total

ou parcial das secções, da aplicação de pré-esforço exterior ou da colagem de chapas metálicas.

O reforço de um elemento estrutural por encamisamento da secção consiste no aumento da secção transversal por intermédio de uma nova camada de betão, que envolve total ou parcialmente a secção inicial e, na qual, ficam inseridas as novas armaduras. As principais vantagens desta técnica de reforço são: aumento da ductilidade do elemento estrutural; proporcionar uma boa resistência ao fogo; conferir proteção contra a corrosão das armaduras; ser económica porque utiliza materiais correntes e não necessita de mão-de-obra especializada para a sua execução. Apesar destas vantagens é de referir que esta técnica de reforço apresenta aspetos menos positivos, tais como o facto de existir um aumento da secção transversal, o que, além de eventuais implicações arquitetónicas, origina um aumento do peso próprio da estrutura. Refira-se também que o uso desta técnica condiciona bastante a zona da obra durante a intervenção de reforço.

A técnica da aplicação de pré-esforço exterior permite o aumento da capacidade resistente e o controlo da deformação da estrutura. No entanto, a necessidade de proteção das armaduras contra a corrosão e o fogo, a alteração do sistema estrutural e as implicações arquitetónicas causadas devido às ancoragens não ficarem embebidas na estrutura fazem com que não seja das técnicas de reforço mais utilizadas.

A técnica de reforço que tem sido mais utilizada é a da colagem de chapas metálicas com resinas epóxis. Trata-se de uma técnica de baixo custo, de rápida aplicação quando comparando com a técnica por encamisamento da secção, é fácil de aplicar e proporciona bom comportamento estrutural. Os seus principais inconvenientes são: a fraca resistência ao fogo e elevada suscetibilidade à corrosão o que pode provocar a degradação da colagem, o aumento do peso próprio da estrutura, as dificuldades de transporte e manuseamento das chapas. Além disso, devido às limitações existentes em termos do comprimento das chapas a instalar pode implicar a necessidade de introdução de juntas de ligação.

2.2. MATERIAIS COMPÓSITOS DE FRP

Os materiais compósitos de FRP (*Fiber Reinforced Polymers* – Polímeros Reforçados com Fibras) são bastante utilizados na indústria aeroespacial, automóvel e naval. Nas últimas décadas, estes materiais tem vindo a ser cada vez mais usados em engenharia civil por forma a contrariar os inconvenientes associados às técnicas de reforço anteriormente referidas. De acordo com o representado na Figura 2.1, os FRP são constituídos por dois componentes: as

fibras (elemento estrutural dos compósitos FRP, responsável por proporcionar resistência e rigidez) e a matriz polimérica (constituída por resina, responsável por manter as fibras na posição pretendida e protegê-las dos agentes agressores ambientais).

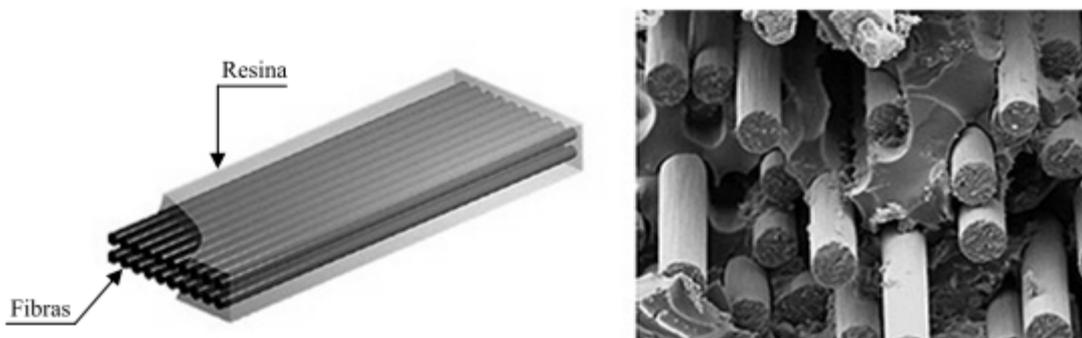


Figura 2.1 - Constituição dos materiais compósitos de FRP (Machado, 2007).

2.2.1. Fibras

Sendo o elemento estrutural dos compósitos de FRP, as fibras caracterizam-se por ser um material filamentar, com razão entre comprimento e diâmetro no mínimo igual a 100 e diâmetro máximo de 0.25 mm (ASTM D30, 1964). As fibras podem ser dispostas numa única direção ou em várias direções. A orientação das fibras influencia os valores do módulo de elasticidade e da resistência à tração. Os valores máximos do módulo de elasticidade e da resistência à tração são obtidos para a direção principal das fibras e diminuem, progressivamente, à medida que o ângulo em análise se afasta da direção principal (Firmo, 2010).

As fibras mais frequentes para aplicações em reforços de estruturas de Engenharia Civil são as fibras contínuas de aramida (A), carbono (C) e vidro (G), que dão origem aos compósitos designados internacionalmente por AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida), CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) e GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro), respetivamente.

De acordo com Dias (2008), as fibras de carbono são as que apresentam melhores propriedades mecânicas, são mais resistentes a ataques químicos, são imunes à corrosão e não absorvem a água. As fibras de vidro são as de menor custo, têm maior peso específico, apresentam grande sensibilidade a meios alcalinos e têm menor resistência a ações de fadiga.

As fibras de aramida são difíceis de moldar, possuem baixa resistência à compressão e são sensíveis à fluência, à ação dos raios ultravioletas e às temperaturas elevadas. Devidos às várias vantagens relativamente às restantes, as fibras de carbono são as mais utilizadas na execução de reforços estruturais com recurso a materiais compósitos e serão o objeto de estudo ao longo deste trabalho.

Na Figura 2.2 estão representadas as relações tensão *versus* deformação do ensaio à tração uniaxial do aço A500, do aço dos cordões de pré-esforço e de fibras de aramida, de vidro e de carbono (a designação Carbono HM diz respeito a fibras de carbono de elevado módulo de elasticidade; a designação Carbono HS diz respeito a fibras de carbono de elevada resistência). A análise da Figura 2.2 permite constatar o melhor desempenho das fibras de carbono em relação às fibras de aramida e de vidro. Além disso, verifica-se que as fibras apresentam um comportamento linear elástico até à rotura (rotura frágil), contrastando assim com o comportamento dúctil do aço.

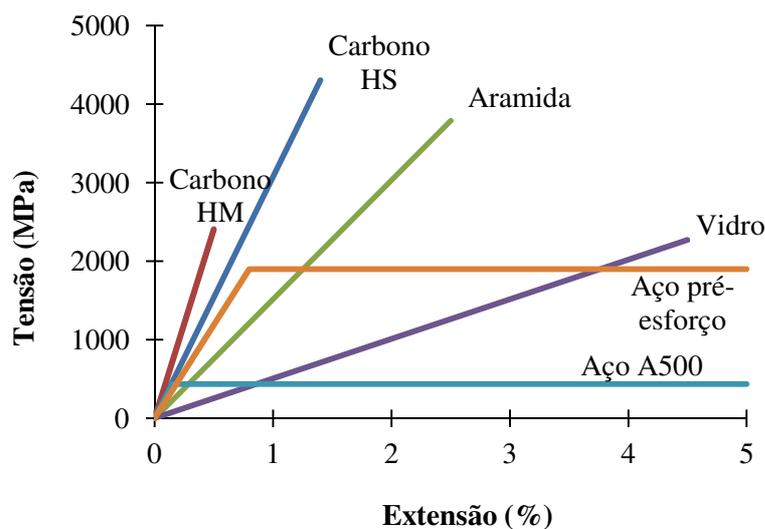


Figura 2.2 - Relação tensão vs. extensão das fibras de aramida, carbono e vidro, do aço A500 e de cordões de pré-esforço (ACI 440R-96, 2002).

Na Tabela 2.1 apresentam-se os valores típicos do módulo de elasticidade, da resistência à tração e da densidade, de materiais convencionais (betão e aço) e das fibras de carbono. Verifica-se que as fibras de carbono apresentam valores para o módulo de elasticidade e para a resistência à tração muito superiores aos valores apresentados pelo aço e pelo betão. Outro dado importante a referir é a menor densidade das fibras de carbono comparativamente com a densidade, quer do betão como do aço.

Tabela 2.1 - Propriedades do betão, do aço e das fibras de carbono (Carolin (2003) e NP EN 1992-1-1 (2010)).

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Densidade (kg/m ³)
Betão	27 - 44	1.6 - 5	2400
Aço	200 - 210	400 - 690	7800
Fibras de carbono*	200 - 800	2500 - 6000	1750 - 1950

* Propriedades das fibras de carbono, não do compósito.

2.2.2. Matriz Polimérica

A matriz polimérica envolve as fibras com o objetivo de as manter na posição pretendida, de garantir a transferência e distribuição das cargas pelas fibras, de oferecer resistência à encurvadura das fibras (quando solicitadas à compressão) e de proteger as fibras dos agentes agressores ambientais (Lubin, 1998).

As resinas que se podem utilizar para a matriz dividem-se em dois grupos: as resinas termoplásticas e as resinas termoendurecidas (ACI 440.2R-02 (2002) e Barbero (1999)). No entanto, a resina mais utilizada é a termoendurecida, do tipo epóxi, por apresentar boa aderência à maioria dos materiais, não absorver a água e possuir melhores propriedades mecânicas. Na Tabela 2.2 apresentam-se as propriedades físicas e mecânicas de diferentes tipos de resinas termoendurecidas.

Tabela 2.2 - Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecidas (Firmo, 2010).

Propriedades	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Extensão de rotura (%)	Massa volúmica (g/cm ³)	Temperatura de transição vítrea (°C)
Poliéster	20 - 100	2.0 - 4.1	1 - 6	1.2 - 1.3	55 - 120
Viniléster	68 - 90	3.5 - 5.2	3.0 - 5.2	1.12 - 1.16	102 - 280
Epóxi	55 - 130	2.0 - 4.1	1 - 9	1.2 - 1.3	50 - 270
Fenólica	30 - 50	3,6	1.8 - 2.5	1.00 - 1.25	260

2.3. SISTEMAS COMPÓSITOS DE CFRP

As principais formas comerciais dos CFRP desenvolvidos para a aplicação em engenharia civil são os sistemas pré-fabricados unidirecionais e os sistemas curados “*in situ*”. Estes, de acordo com a orientação das fibras no compósito, podem ser unidirecionais, bidirecionais ou multidirecionais.

Os sistemas pré-fabricados resultam da impregnação de um conjunto de feixes de fibras contínuas, orientados numa única direção, por uma resina epóxi. Como exemplos deste tipo de sistema refiram-se os varões (Figura 2.3a) e os laminados (Figura 2.3b). Os sistemas curados “*in situ*” consistem na colocação de feixes de fibras contínuas, mantas unidirecionais (Figura 2.3c) ou tecidos (bidirecionais ou multidirecionais) (Figura 2.3d), em estado seco ou pré-impregnado, sobre uma resina epóxi previamente espalhada na superfície a reforçar. A resina tem as funções de impregnar o grupo de fibras, realizar a polimerização do conjunto num compósito de CFRP e, por último, desenvolver as propriedades de aderência na ligação do CFRP ao betão.

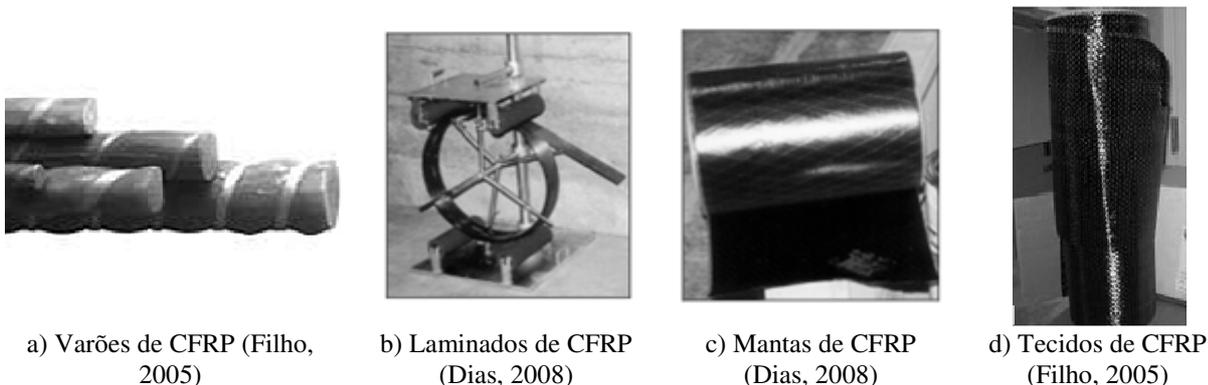


Figura 2.3 - Materiais compósitos de CFRP.

Os compósitos de CFRP apresentam várias vantagens comparativamente aos materiais convencionais, nomeadamente, o aço, a madeira e o betão (Bakis *et al.*, 2002). As principais vantagens são: têm um reduzido peso específico; apresentam elevados valores de resistência a tração e de módulo de elasticidade e têm elevada resistência à corrosão.

Devido ao elevado desempenho mecânico dos compósitos de CFRP, é possível com pequenas quantidades de reforço obter elevados valores para o aumento da capacidade de carga dos elementos estruturais. Por serem leves, os compósitos de CFRP são de fácil transporte, manuseamento e instalação. Deste modo, é possível realizar o reforço estrutural, de uma

forma simples, sem acréscimos significativos de carga e com uma minimização dos efeitos em termos arquitetónicos. Além disso, estes materiais adaptam-se a qualquer tipo de superfície, são comercializados com várias espessuras, com várias secções transversais e sem limitações ao nível de comprimento, o que permite a sua aplicação sem a necessidade de execução de juntas de ligação (ao contrário do que acontece no caso dos reforços executados com chapas metálicas).

2.4. TÉCNICAS DE REFORÇO UTILIZANDO MATERIAIS COMPÓSITOS DE CFRP

Nesta secção são apresentadas duas técnicas de reforço com materiais compósitos de CFRP:

- a técnica da colagem externa do reforço de CFRP, designada internacionalmente por técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*);
- a técnica da inserção do CFRP em entalhes realizados no betão de recobrimento, designada internacionalmente por técnica NSM (*Near Surface Mounted*).

Em ambas as técnicas de reforço, a ligação do CFRP ao betão é efetuada com recurso a um adesivo epóxi. As primeiras aplicações em engenharia civil, no âmbito do reforço estrutural, com compósitos de CFRP foram efetuadas recorrendo à técnica de colagem externa (técnica EBR). A técnica da inserção do CFRP no betão de recobrimento (técnica NSM) é mais recente e surgiu como alternativa à técnica EBR por forma a ultrapassar alguns aspetos menos positivos que esta técnica apresenta, com particular destaque para a rotura prematura que tipicamente ocorre em elementos estruturais reforçados com a técnica EBR (a descolagem do CFRP). A técnica NSM com CFRP tem vindo a ganhar destaque na comunidade científica sendo, atualmente, objeto de estudo de inúmeros trabalhos de investigação.

2.4.1. Técnica da colagem externa com compósitos de CFRP (EBR)

A técnica EBR pode ser utilizada para o reforço à flexão (colagem do CFRP na face tracionada), reforço ao corte (reforço envolvendo toda a secção, reforço colado em forma de U ou reforço apenas colado nas faces laterais das vigas) e confinamento de pilares (encamisamento da secção do pilar).

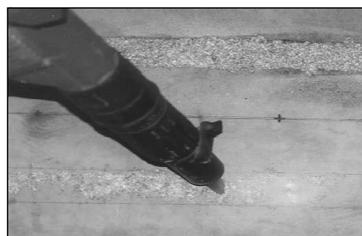
De um modo geral, a execução de um reforço de CFRP usando a técnica da colagem externa implica a realização das seguintes tarefas (Juvandes *et al.*, 2003):

- i) Preparação da superfície do elemento a reforçar de forma a garantir que a base tenha boas condições de aderência. No caso do sistema curado *in situ* (mantas unidirecionais ou tecidos multidirecionais) a superfície deve ser esmerilada (Figura 2.4a), enquanto que no caso dos laminados a superfície do elemento deve ser bojardada com jacto de areia ou ser “picotada” com um martelo de agulhas (Figura 2.4b). Seguidamente, a superfície tratada deve ser limpa com ar comprimido. Em alguns casos recomenda-se a aplicação de uma camada de primário de forma a melhorar a aderência dos CFRP à superfície do elemento a reforçar (Figura 2.4c);
- ii) Aplicação e colagem do reforço. Como exemplo, na Figura 2.4d) apresenta-se a colagem de uma faixa de manta de CFRP no âmbito de um reforço à flexão de uma faixa de laje de betão armado. Na 2.4e) apresenta-se a colagem de um laminado de CFRP no âmbito de um reforço à flexão de uma faixa de laje de betão armado.;
- iii) Controlo de qualidade da técnica de reforço antes, durante e após a aplicação.

O desempenho do reforço de CFRP aplicado com a técnica EBR depende da qualidade dos materiais utilizados, assim como, da qualidade da execução do reforço. Na Figura 2.5 apresenta-se um organigrama com as recomendações fundamentais para a execução do reforço de CFRP usando a técnica EBR.



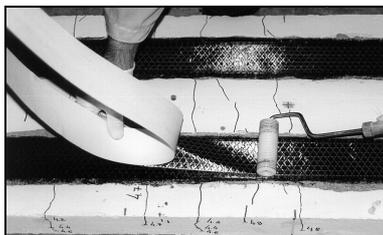
a) Aplicação do esmeril



b) Aplicação do martelo de agulhas



c) Aplicação do primário



d) Colagem da manta



e) Colagem do laminado

Figura 2.4 - Execução do reforço de faixas de laje de betão armado com mantas ou laminados de CFRP aplicados com a técnica EBR (Dias, 2001).

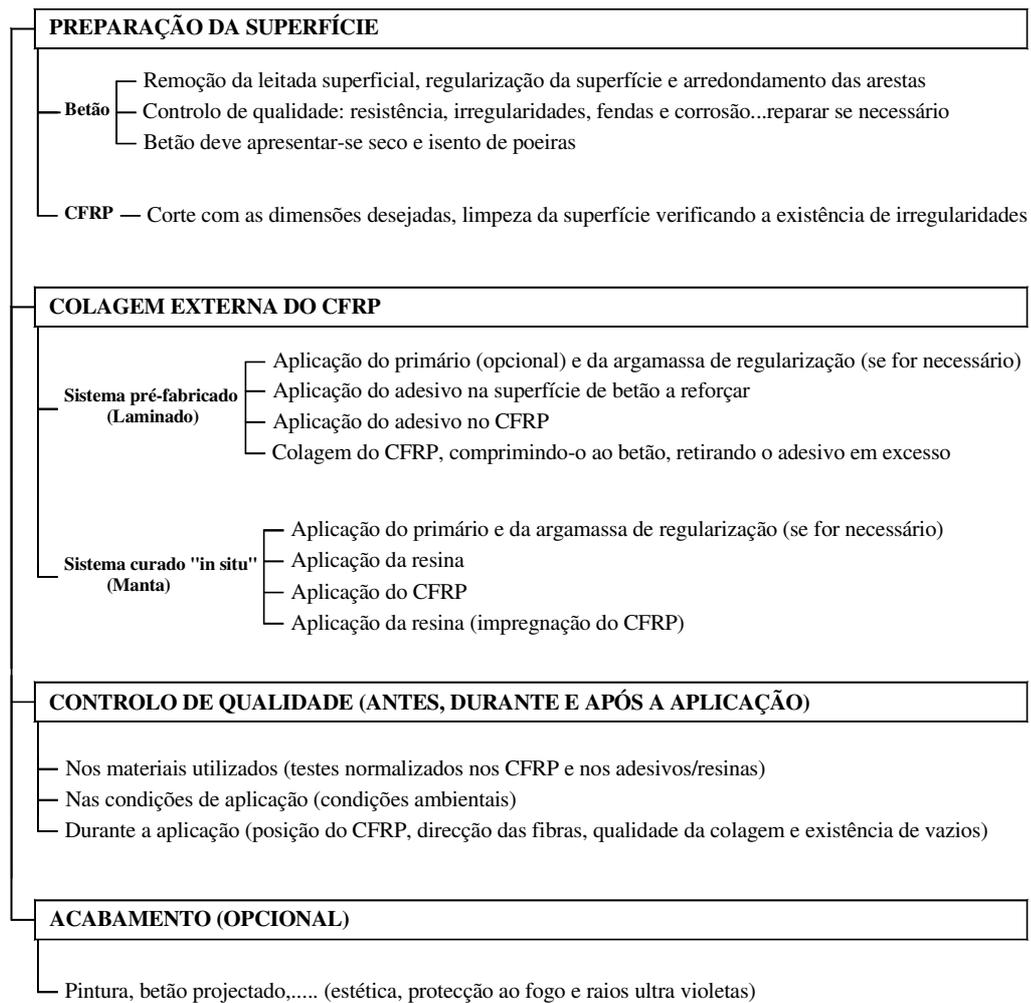


Figura 2.5 - Aplicação da técnica da colagem externa (EBR) e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias *et al.*, 2006).

Buyukozturk *et al.* (2004) resumiram os modos de rotura possíveis que podem ocorrer numa viga de betão armado reforçada à flexão com compósitos de CFRP aplicados de acordo com a técnica da colagem externa. Os referidos modos de rotura podem ser divididos em três grupos, designadamente:

- Roturas clássicas das estruturas de betão armado ou pré-esforçado (Figura 2.6a, 2.6b e 2.6c).
- Rotura dos novos materiais adicionados (Figura 2.6d).
- Roturas prematuras (Figura 2.6e, 2.6f, 2.6g e 2.6h) associadas à ligação betão-adesivo-CFRP (descolagem prematura do CFRP).

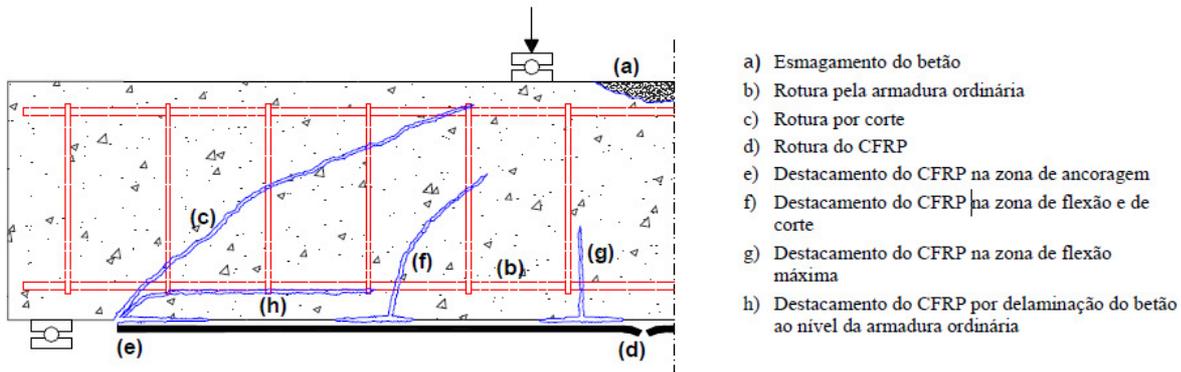


Figura 2.6 - Modos de rotura de vigas de betão armado reforçadas à flexão com compósitos de CFRP com recurso à técnica EBR (Buyukozturk *et al.*, 2004).

Os resultados da investigação experimental já efetuada têm revelado que, tipicamente, a rotura dos elementos estruturais de betão armado reforçados, à flexão ou ao corte, com materiais compósitos de CFRP aplicados com a técnica EBR ocorre pelo destacamento prematuro do CFRP. Com efeito, apesar dos consideráveis acréscimos de carga que se conseguem obter com os reforços de CFRP colados externamente, tem-se verificado que, de um modo geral, com a técnica EBR não se consegue mobilizar em pleno as elevadas potencialidades dos CFRP. Além disso, verifica-se que a rotura por descolagem dos CFRP é frágil, ocorrendo sem qualquer tipo de aviso. Por outro lado, o facto de o reforço ser aplicado no exterior dos elementos a reforçar faz com que o CFRP fique diretamente exposto aos agentes agressores ambientais, à ação do fogo e a atos de vandalismo.

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

Tal como foi referido anteriormente, a técnica NSM com compósitos de CFRP surgiu mais recentemente por forma a tentar colmatar a menos valia da técnica EBR relacionada com a rotura prematura do CFRP. A técnica de reforço NSM com CFRP baseia-se nos seguintes procedimentos (Dias 2008):

- i) Execução do entalhe na face do elemento a reforçar (Figura 2.7a);
- ii) Limpeza do entalhe com ar comprimido (Figura 2.7b);
- iii) Corte (Figura 2.7c) e limpeza do CFRP com acetona (Figura 2.7d);
- iv) Produção do adesivo epóxi segundo as recomendações do fabricante (Figura 2.7e);
- v) Preenchimento do entalhe com o adesivo (Figura 2.7f);
- vi) Aplicação do adesivo nas faces do CFRP (Figura 2.7g);
- vii) Introdução do CFRP no entalhe e remoção do adesivo em excesso (Figura 2.7h).

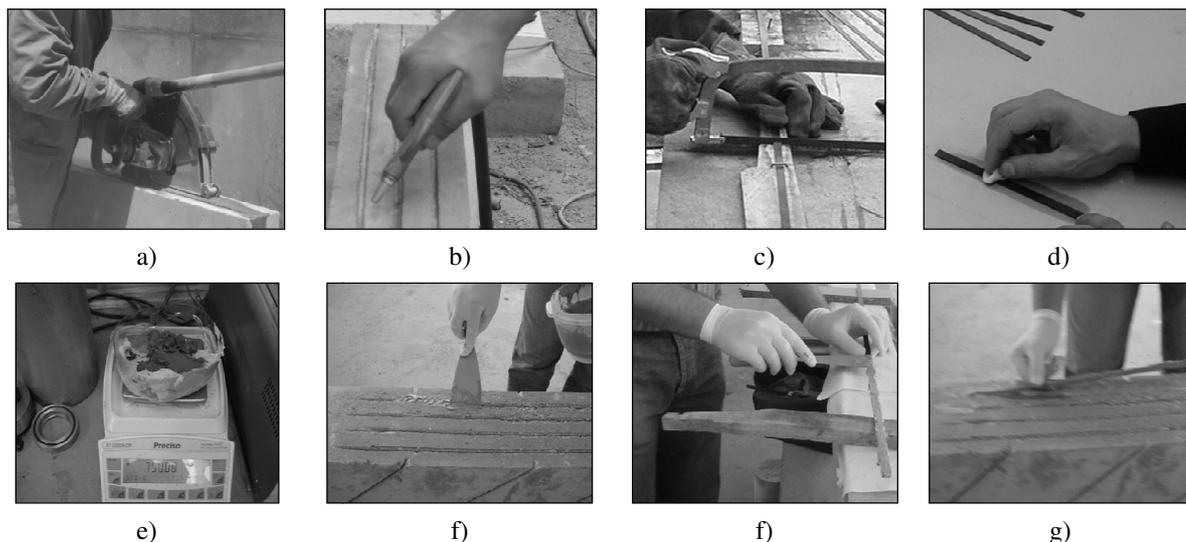


Figura 2.7 - Execução do reforço à flexão de uma viga de betão armado usando a técnica NSM com laminados de CFRP (Dias, 2008).

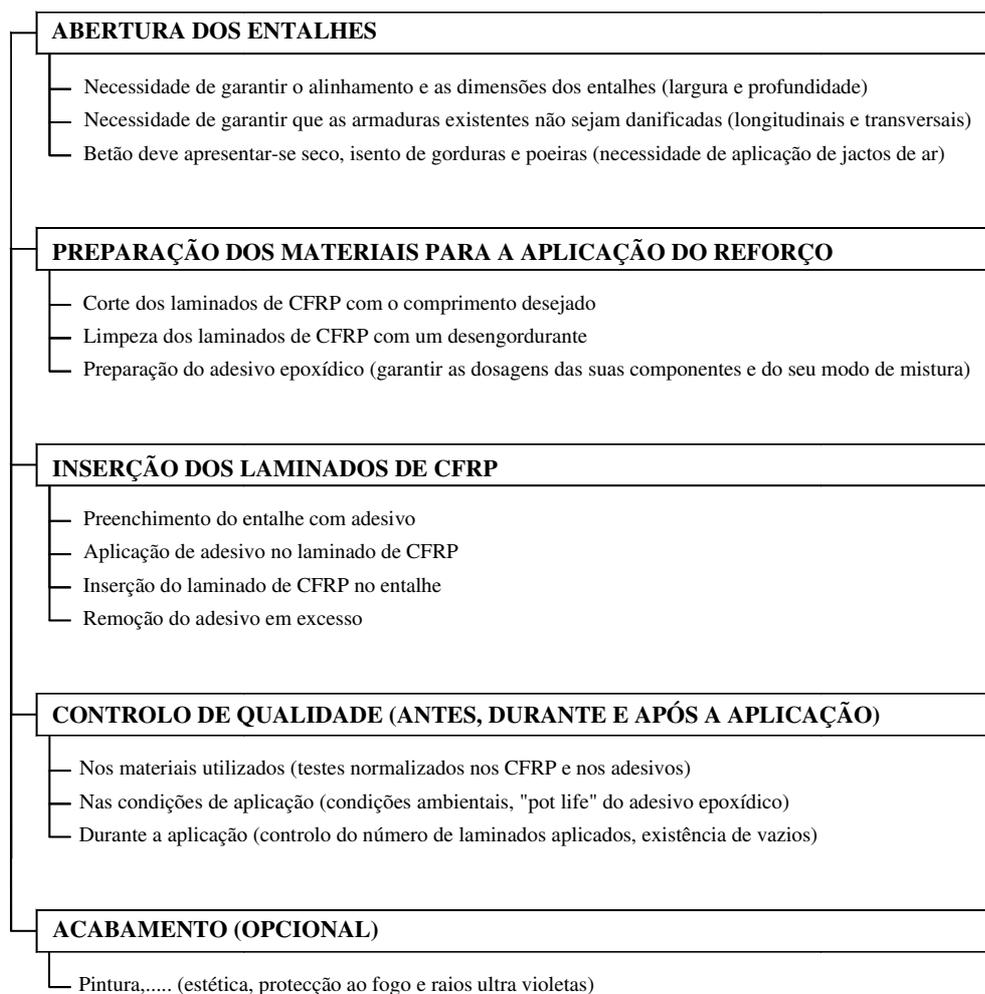


Figura 2.8 - Aplicação da técnica NSM e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias 2008).

Tal como na técnica EBR, o desempenho do reforço de CFRP aplicado com a técnica NSM depende da qualidade dos materiais utilizados, assim como, da qualidade da execução do reforço. Na Figura 2.8 apresenta-se um organigrama com as recomendações fundamentais para a execução do reforço de CFRP usando a técnica NSM.

Os CFRP utilizados na técnica de reforço NSM podem ter diferentes secções transversais (Figura 2.9): circulares, quadrados e retangulares (laminados). Neste contexto, refira-se que El-Hacha e Rizkalla (2004) e Cisneros *et al.* (2012), concluíram que os laminados de CFRP apresentam melhor desempenho que os varões de CFRP. Com efeito, apesar dos laminados de CFRP terem menor secção transversal apresentam maior perímetro de colagem, o que permite aumentar o grau de fixação do reforço ao betão.

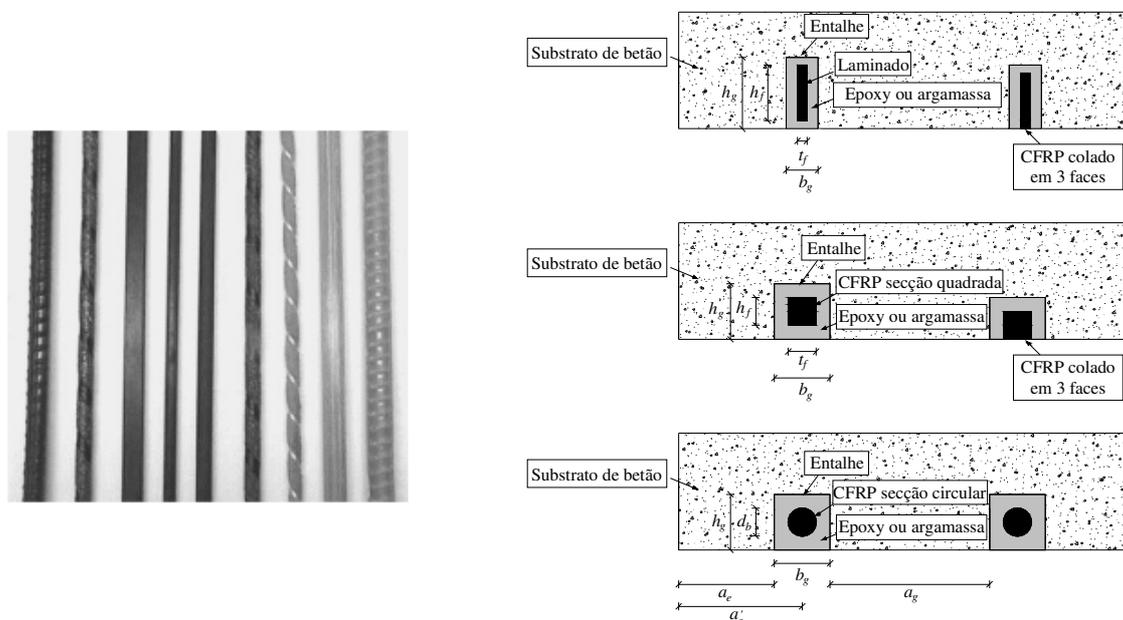


Figura 2.9 - Elementos de CFRP usados no reforço com a técnica NSM (De Lorenzis e Teng 2007).

Blaschko e Zilch (1999) efetuaram um programa experimental onde compararam a eficácia das técnicas EBR e NSM com laminados de CFRP, quando aplicadas no reforço à flexão de elementos estruturais de betão armado. De acordo com a Figura 2.10, o estudo envolveu duas lajes (secção transversal com dimensões $350 \times 150 \text{ mm}^2$) e duas vigas (secção transversal com dimensões $150 \times 350 \text{ mm}^2$). Estes modelos tinham um vão de 2500 mm e foram submetidos a ensaios à flexão em três pontos de carga. Os quatro elementos estruturais anteriormente referidos foram reforçados à flexão com laminados de CFRP: a laje A1 e a viga B1 foram reforçadas usando a técnica EBR e a laje A2 e a viga B2 foram reforçadas usando a técnica NSM. Na Figura 2.11 apresentam-se as curvas de comportamento momento *versus*

deslocamento a meio vão dos elementos estruturais ensaiados por Blaschko e Zilch (1999). Os resultados obtidos permitiram concluir que o desempenho do reforço de CFRP quando aplicado com a técnica NSM foi claramente superior ao do reforço de CFRP aplicado com a técnica EBR.

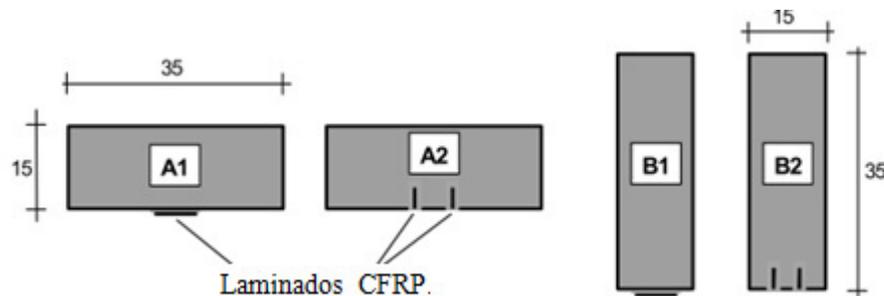


Figura 2.10 - Secção transversal das lajes e vigas testadas por Blaschko e Zilch (1999) (dimensões em cm).

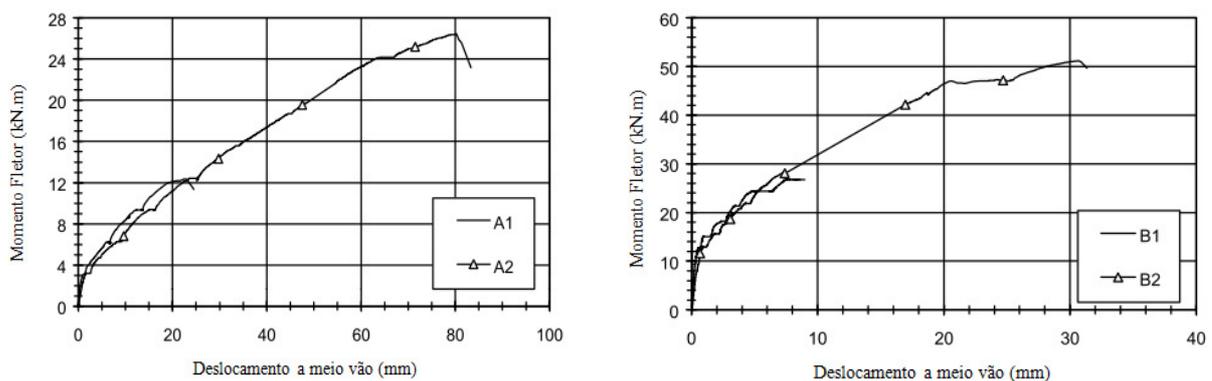


Figura 2.11 - Resultados dos ensaios realizados por Blaschko e Zilch (1999).

No caso do reforço ao corte de vigas de betão armado, Dias e Barros (2010) realizaram um programa experimental onde compararam o grau de eficácia da técnica NSM, com laminados de CFRP, com a técnica EBR usando mantas de CFRP. O programa experimental englobou a conceção de quinze modelos de vigas de betão armado com secção transversal em T, com as dimensões representadas na Figura 2.12. As vigas ensaiadas englobaram uma viga (C-R) de referência sem qualquer reforço ao corte, uma viga (2S-R) com estribos de aço de 6 mm de diâmetro e afastados de 300 mm ($\phi 6@300$ mm), a que corresponde uma percentagem de armadura transversal $\rho_{sw} = 0.10\%$, uma viga (7S-R) com estribos $\phi 6@125$ mm, a que corresponde uma percentagem de armadura transversal $\rho_{sw} = 0.28\%$, e doze vigas com estribos $\phi 6@300$ mm e reforçadas ao corte com diferentes soluções de CFRP.

Das doze vigas com estribos $\phi 6@300$ mm e reforçadas ao corte com CFRP, em nove foi utilizada a técnica NSM com laminados de CFRP (foram utilizadas três percentagens de CFRP (ρ_f) e, para cada uma destas, foram analisadas três orientações dos laminados (45° , 60° e 90°)) e nas restantes três foi utilizada a técnica EBR com mantas de CFRP. Na Figura 2.13 estão ilustradas as soluções de reforço testadas por Dias e Barros (2010). O reforço de CFRP foi distribuído ao longo da linha AB, representada na Figura 2.12, tendo o ponto B sido obtido considerando uma degradação da carga a 45° . As diferenças entre as vigas testadas neste programa experimental ficaram restritas ao menor vão de corte a , onde foi imposta a rotura por corte.

O betão das vigas caracterizava-se por ter um valor médio de resistência à compressão à data da realização dos ensaios de 39.7 MPa. Os laminados de CFRP apresentavam, em termos médios, uma tensão de rotura e um módulo de elasticidade de 2741.7 MPa e 170.9 GPa, respetivamente. As mantas de CFRP apresentavam, em termos médios, 2862.9 MPa de tensão de rotura e 218.4 GPa de módulo de elasticidade. As vigas foram submetidas a ensaios à flexão em três pontos de carga até à sua rotura (Figuras 2.12 e 2.13).

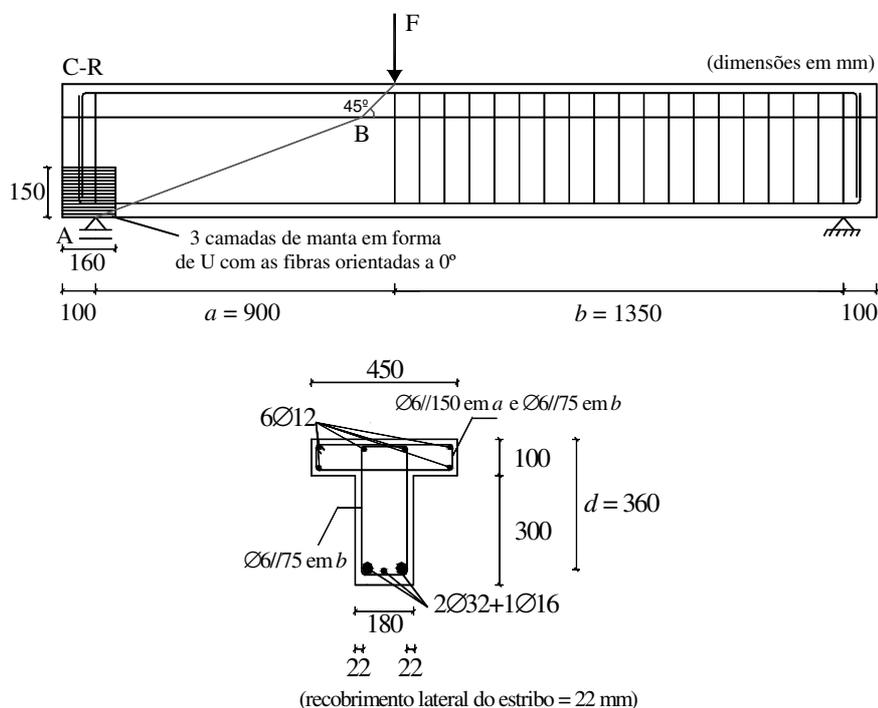


Figura 2.12 - Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço presentes em todos os modelos ensaiados (Dias e Barros 2010).

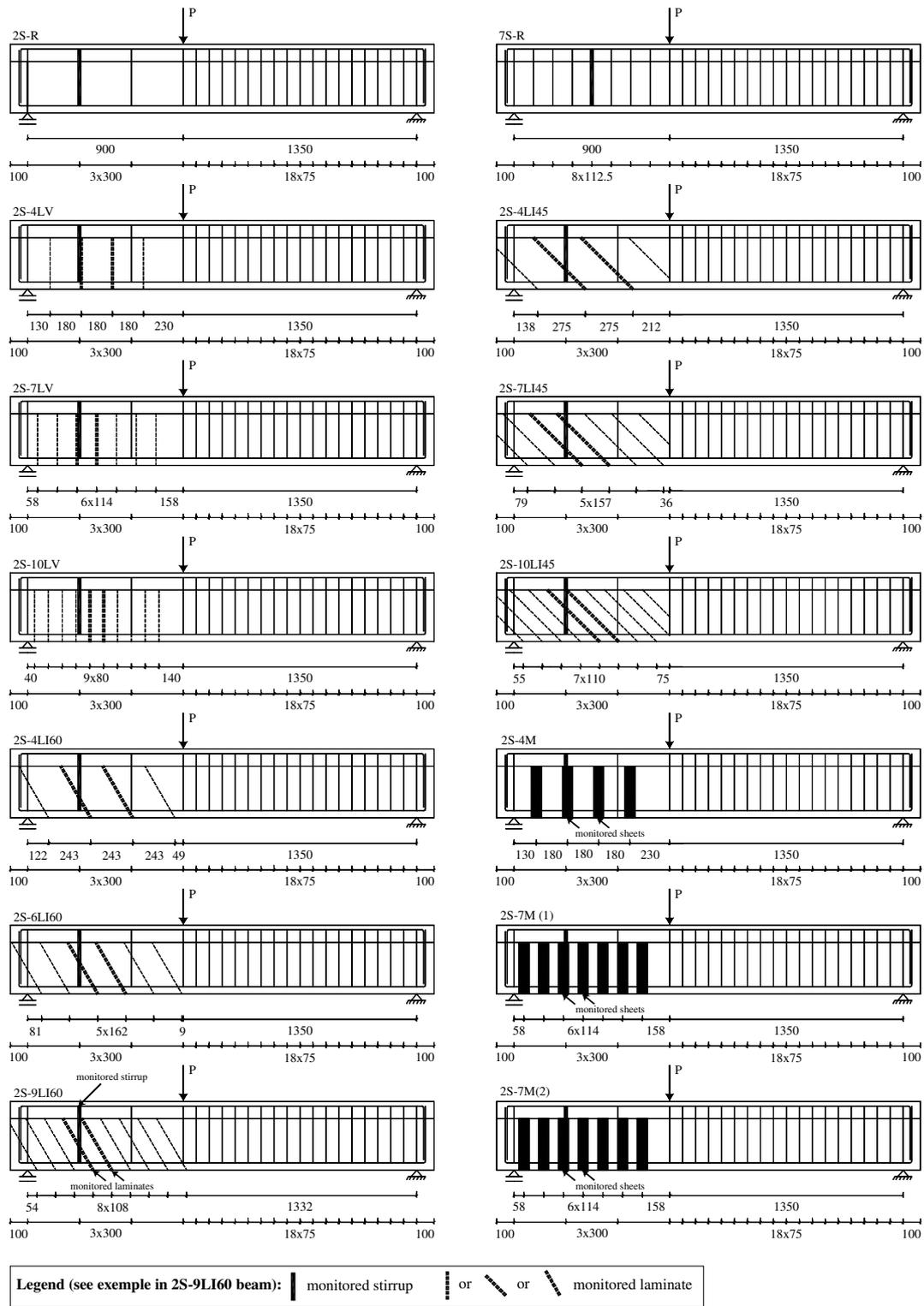


Figura 2.13 - Localização dos estribos de aço (traço cheio), laminados (tracejado) e mantas de CFRP (Dias e Barros 2010).

Tendo por base o valor força máxima ($F_{m\acute{a}x}$) da viga não reforçada (viga 2S-R), as soluções com laminados e com mantas conduziram a um aumento médio da capacidade máxima de carga de 30.3% e 10.4%, respetivamente (Figura 2.14). Assim, o aumento médio do reforço com mantas foi 34% do aumento proporcionado pelas soluções de laminados inseridos. O valor médio da força máxima ($F_{m\acute{a}x}$) para as três vigas reforçadas com a máxima percentagem de laminados inseridos (2S-10LV, 2S-10LI45 e 2S-9LI60) foi 90% do valor de $F_{m\acute{a}x}$ da viga 7S-R, enquanto que o valor de $F_{m\acute{a}x}$ da viga 2S-7M(2) foi 79% do valor de $F_{m\acute{a}x}$ da viga 7S-R. De entre as duas técnicas de reforço, a que mobilizou mais o reforço de CFRP foi a técnica NSM (o valor médio da extensão máxima registada nos CFRP instrumentados foi de 8.4‰ para o caso das vigas reforçadas com a técnica NSM e 6.5‰ para o caso das vigas reforçadas com a técnica EBR).

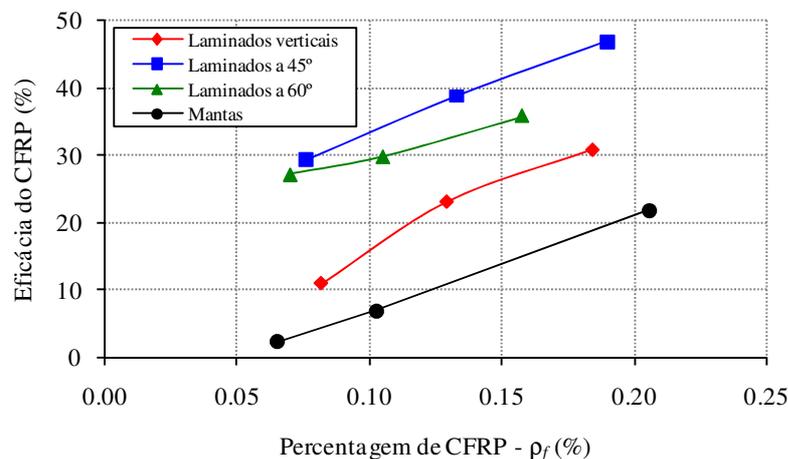


Figura 2.14 - Eficácia do reforço em termos de acréscimo de carga máxima vs. percentagem de CFRP (Dias e Barros (2010)).

Os estudos comparativos anteriormente apresentados, um sobre o reforço à flexão e outro sobre o reforço ao corte, demonstraram claramente a melhor eficácia da técnica NSM quando comparada com a técnica EBR. Com efeito, com a técnica NSM é possível uma maior mobilização das elevadas capacidades resistentes dos CFRP devido ao maior grau de fixação proporcionado ao CFRP (duplicação da área de colagem). Além desta vantagem, é de referir que 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 técnica de inserção é de mais fácil aplicação que a técnica da colagem externa, pois não é necessário efetuar a preparação da superfície, havendo apenas a necessidade de executar os entalhes no betão de recobrimento. Além disso, também se verifica que usando a técnica NSM, o impacto em termos arquitetónicos é praticamente nulo.

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

Nesta secção serão apresentados alguns trabalhos experimentais que permitem compreender o comportamento típico de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos (reforço à flexão, reforço ao corte e reforço simultâneo à flexão e ao corte).

2.5.1. Reforço à flexão

No trabalho de Dias *et al.* (2012) foi realizado um programa experimental onde foi avaliado o comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão usando a técnica inserção de laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento. Foram ensaiadas quatro vigas: uma viga de referência sem reforço de CFRP e três vigas reforçadas com diferentes percentagens de laminados de CFRP (reforço com um laminado, com dois laminados e com três laminados). De acordo com a Figura 2.15, as vigas de betão armado tinham um comprimento de 2600 mm e secção transversal retangular de 150×300 mm², tendo sido submetidas a ensaios à flexão em quatro pontos de carga até à rotura. Na Figura 2.16, estão representadas as soluções de reforço de CFRP testadas.

O betão das vigas caracterizava-se por apresentar um valor médio de resistência à compressão, à data da realização dos ensaios das vigas, de 50.2 MPa. O aço utilizado neste programa experimental tinha uma tensão média de cedência de 564.1, 534.5 e 566.7 MPa e uma tensão média de rotura de 682.6, 618.5 e 661.3, respetivamente para os diâmetros de 6, 8 e 10 mm. Para os laminados de CFRP usados com dimensões de 1.4×10 mm², os ensaios de caracterização registaram, em termos médios, uma tensão de rotura de 3165 MPa, um módulo de elasticidade de 175 GPa e uma extensão máxima de 18%.

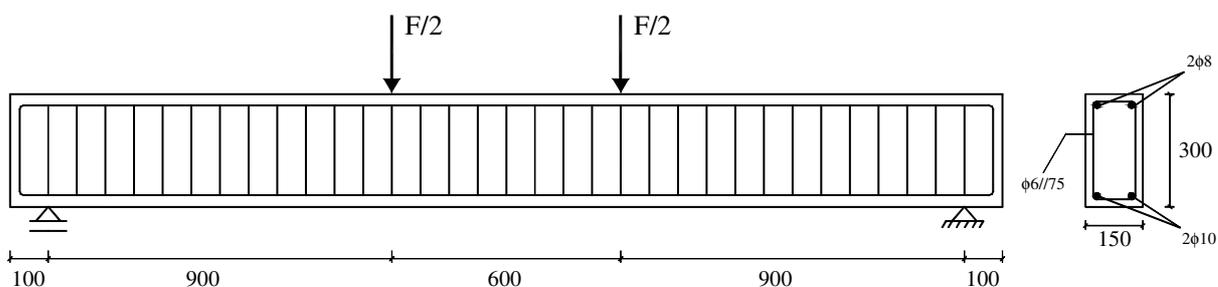


Figura 2.15 - Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço comuns a todas as vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012) (dimensões em mm).

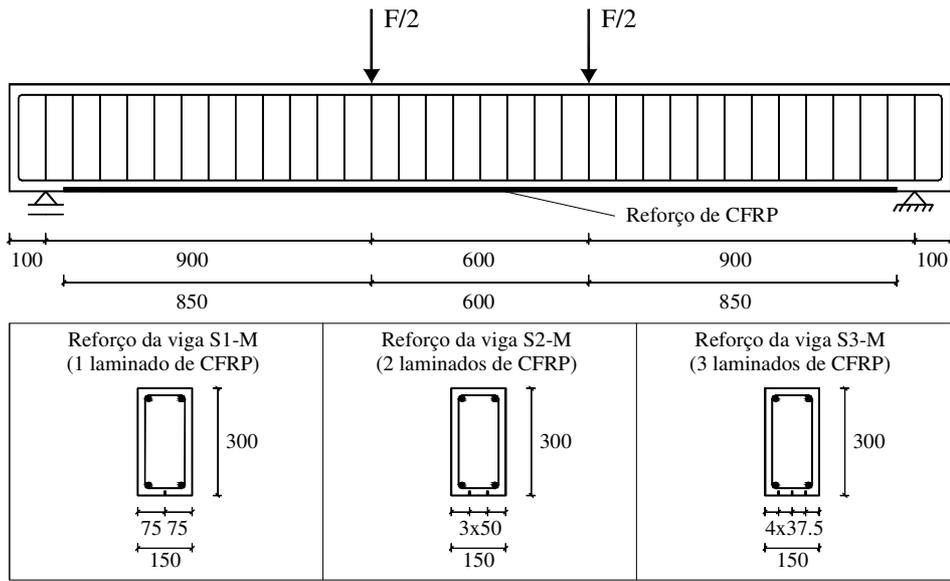


Figura 2.16 - Soluções de reforço de CFRP testadas por Dias *et al.* (2012) (dimensões em mm).

Na Figura 2.17 apresenta-se as curvas força *versus* flecha a meio vão das quatro vigas que foram ensaiadas com um carregamento monotónico até à rotura. Na Tabela 2.3 apresentam-se os principais resultados obtidos nas referidas vigas: carga de início de fendilhação do betão (F_{cr}) carga correspondente à cedência das armaduras de aço (F_{sy}), a carga máxima ($F_{máx}$) e a respetiva flecha a meio vão. Nesta tabela também se apresentam os valores dos acréscimos da carga proporcionados pelos reforços de CFRP em termos da carga de cedência das armaduras e em termos da carga máxima e o valor da extensão máxima registada no laminado instrumentado até ao momento em que se atingiu a capacidade de carga máxima da viga (ϵ_{CFRP}^{max}).

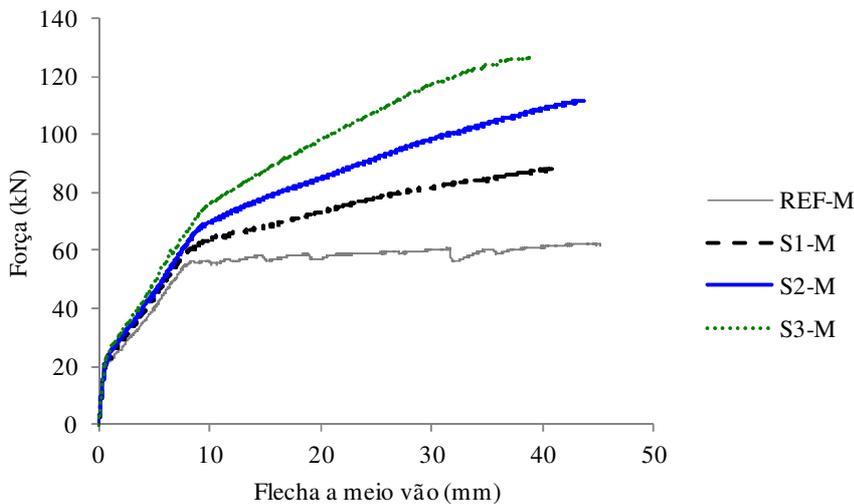


Figura 2.17 - Relação força vs. flecha a meio vão das vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012).

Tabela 2.3 - Resultados da capacidade de carga das vigas testadas por Dias *et al.* (2012).

Vigas	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	Acréscimo de carga de cedência das armaduras (%)	$F_{máx}$ (kN)	Acréscimo de carga máxima (%)	$u_{Fmáx}$ (mm)	ϵ_{CFRP}^{max} (%)
REF-M	20.1	56.6	-	62.3	-	45.1	-
S1-M	21.0	62.4	10	88.4	42	41.2	17.9
S2-M	22.2	69.5	23	111.9	80	43.6	17.4
S3-M	24.0	76.0	34	126.6	103	38.9	14.9

Os modos de rotura nas vigas ensaiadas por Dias *et al.* (2012) foram: esmagamento do betão da zona comprimida após a cedência das armaduras longitudinais, que ocorreu na viga REF-M (Figura 2.18a)); esgotamento da capacidade resistente à tração do laminado de CFRP (rotura do laminado de CFRP), que ocorreu na viga S1-M (Figura 2.18b)); destacamento dos laminados de CFRP, que ocorreu nas vigas S2-M e S3-M (Figuras 2.18c) e 2.18 d)).

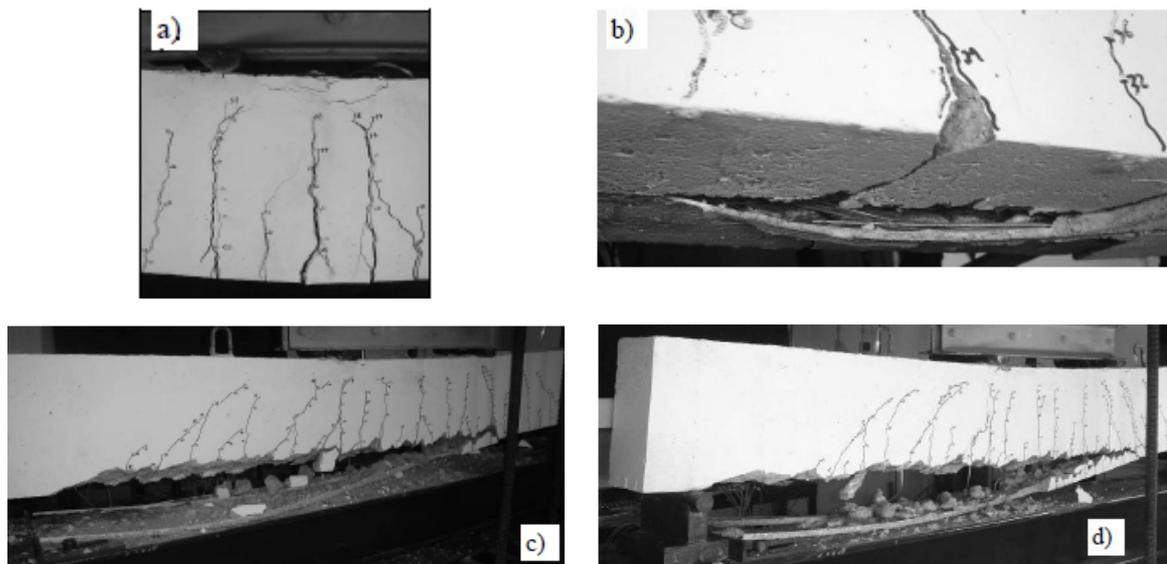


Figura 2.18 - Modos de rotura ocorridos nas vigas reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos (Dias *et al.*, 2012).

Os ensaios realizados por Dias *et al.* (2012) permitiram aos autores concluir que a técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado permitiu aumentar a capacidade de carga das vigas, independentemente da percentagem de CFRP adotada. Em termos de carga de início de fendilhação (F_{cr}), registou-se um ligeiro acréscimo com o aumento da quantidade de reforço. Relativamente à carga de cedência das armaduras

de aço (F_{sy}), as soluções de reforço proporcionaram aumentos que variaram entre 10% e 34% e estes acréscimos foram tão maiores quanto maior a percentagem de CFRP. Os aumentos em termos de carga máxima variaram entre os 42% (viga S1-M) e 103% (viga S3-M). Desta forma verificou-se que, com a utilização de três laminados de CFRP foi possível duplicar a capacidade de carga máxima da viga de referência sem CFRP. Em termos médios, e apesar do destacamento do CFRP ocorrido nas vigas S2-M e S3-M, o valor da extensão ε_{CFRP}^{max} foi de 16.7‰, o que correspondeu a um excelente grau de mobilização médio do reforço (93%). Este facto comprovou o elevado nível de aproveitamento do reforço de CFRP aplicado com a técnica NSM.

No âmbito do reforço à flexão de vigas de betão armado com a técnica da inserção de laminados de CFRP foram já efetuados outros estudos, onde também ficou comprovado o elevado desempenho desta técnica de reforço (Barros e Fortes (2005), Kotynia (2007), Barros e Kotynia (2008)). Além disso, os estudos já realizados permitem concluir que a eficiência da técnica NSM com laminados de CFRP é condicionada por parâmetros como a percentagem de armadura longitudinal, a percentagem de CFRP, a classe de resistência do betão, o tipo de carregamento, o espaçamento entre laminados adjacentes e a distância do laminado à face do elemento a reforçar.

2.5.2. Reforço ao corte

Dias (2008) realizou uma extensa investigação experimental sobre o reforço ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos. No total foram testadas 4 séries de vigas de betão armado com secção transversal em T (Figura 2.19) de acordo com o representado na Tabela 2.4. Nesta tabela ρ_{sl} é a percentagem de armadura longitudinal, ρ_f é a percentagem de reforço de CFRP, θ_f é a orientação do reforço de CFRP, ρ_{sw} é a percentagem de armadura transversal, f_{cm} é valor medio da resistência à compressão do betão a data do ensaio das vigas e a/d é a relação entre o vão de corte a e a altura útil das armaduras longitudinais (d). Em todas as vigas foi imposta a rotura no vão de corte a , que era precisamente a zona onde foram aplicados os reforços de CFRP (Figura 2.19), Além disso, as diferenças existentes nas vigas de cada série ficaram restringidas ao vão onde foi imposta a rotura, vão de corte a .

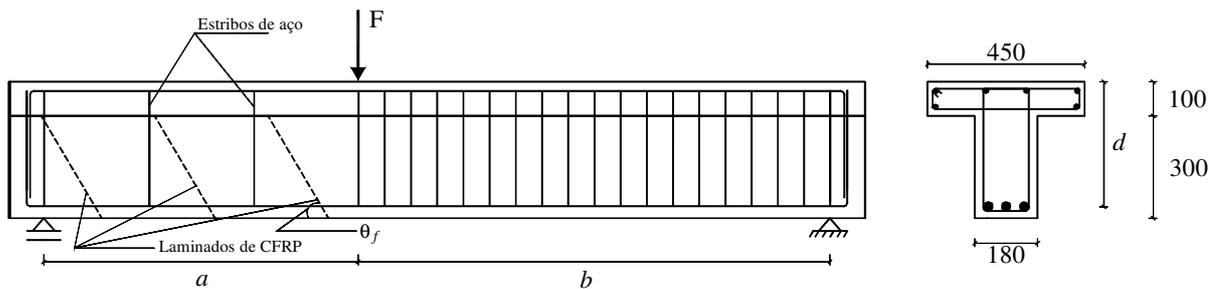


Figura 2.19 - Dados gerais sobre as vigas ensaiadas por Dias (2008) (dimensões em mm).

Tabela 2.4 - Parâmetros avaliados nas quatro séries de vigas testadas por Dias (2008).

Série	ρ_f (%)	θ_f (°)	ρ_{sw} (%)	f_{cm} (MPa)	a/d	
A ($\rho_{sl}=2.9\%$)	0.06 0.09-0.10 0.13-0.16	90	45	60	0.10	31.1
B ($\rho_{sl}=2.8\%$)	0.07-0.08 0.11-0.13 0.16-0.19 0.07-0.08 0.11-0.13	90	45	60	0.10 0.17	39.7 2.5
C ($\rho_{sl}=2.8\%$)	0.07-0.08 0.11-0.13 0.07-0.08 0.11-0.13	90 45	45	60	0.10 0.17	18.6
D ($\rho_{sl}=2.8\%$)	0.07-0.08 0.11-0.13 0.07-0.08 0.11-0.13	90 45	45	60	0.10 0.17	59.4 3.3

Os modos de rotura verificados nas vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos foram condicionados pelo tipo de betão. Nas vigas de betão com classe de resistência média (serie A e serie B) o modo de rotura foi a cedência do reforço com destacamento de betão adjacente ao CFRP. Para as vigas com betão de classe de resistência mais baixa (serie C) a cedência dos reforços de CFRP continuou a ser o modo de rotura registado, mas pelo facto de o betão ser de classe mais baixa, a rotura ocorreu mais prematuramente do que nos casos das vigas das series A e B. Para as vigas da classe D, com betão de elevada resistência o elemento condicionante da cedência do CFRP deixou de ser o betão e passou a ser a ligação adesivo-CFRP (escorregamento do laminado) ou até mesmo a resistência à tração do CFRP (rotura do laminado). Estas formas de cedência, relativamente as

ocorridas nos casos de betões de classes de resistência mais baixas, proporcionaram aumentos consideráveis no rendimento do reforço de CFRP (Tabela 2.5) e no desempenho estrutural das vigas reforçadas. Apesar do nível de mobilização do CFRP aumentar com a qualidade do betão, é de salientar que se registaram valores consideráveis de extensões nos CFRP das vigas que foram construídas com o betão mais fraco (série C).

Outro facto registado passível de influenciar o modo de rotura das vigas foi a percentagem de CFRP, ou seja, a distância entre laminados consecutivos. Assim, verificou-se que a proximidade entre os laminados, por efeito de grupo, pode originar um modo de rotura caracterizado pelo destacamento de uma parede de “betão mais CFRP”, ou seja, um modo de rotura em que não se verifica a cedência individual dos laminados atravessados pelas fendas de corte. Desta forma, a aplicação de elevadas percentagens de CFRP pode originar uma penalização na rentabilidade do reforço.

Tabela 2.5 - Valores máximos das extensões registadas nos laminados de CFRP instrumentados (Dias, 2008).

Grau de mobilização do CFRP	Série A ($f_{cm} = 31.1$ MPa)	Série B ($f_{cm} = 39.7$ MPa)	Série C ($f_{cm} = 18.6$ MPa)	Série D ($f_{cm} = 59.4$ MPa)
Valor médio da extensão máxima registada nos extensómetros colados no CFRP (%)	8.5	8.3	7.2	11.6
Extensão máxima registada nos extensómetros colados no CFRP (%)	11.1	10.8	9.4	15.0

Além da influência nos modos de rotura, Dias (2008) verificou também que a qualidade do betão influencia a eficácia do reforço ao corte com laminados de CFRP. Na Figura 2.20 apresentam-se os resultados da contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f) referentes a 9 configurações de reforço que foram aplicadas em vigas da série B ($f_{cm} = 39.7$ MPa), em vigas da série C ($f_{cm} = 18.6$ MPa) e em vigas da série D ($f_{cm} = 59.4$ MPa). A análise da Figura 2.20 permite concluir que as configurações de reforço foram tão mais eficazes quanto maior a qualidade do betão.

O desempenho da técnica de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos também é condicionado pela percentagem de armadura transversal. Tal pode ser observado na Figura 2.21 onde se apresenta o valor da contribuição V_f para 15 configurações de reforço aplicadas quer a vigas com uma percentagem de armadura transversal de 0.10% quer a vigas com uma

percentagem de armadura transversal de 0.16-0.17%. De um modo geral, verifica-se que o reforço foi mais eficaz quando aplicado a vigas com menor percentagem de armadura transversal.

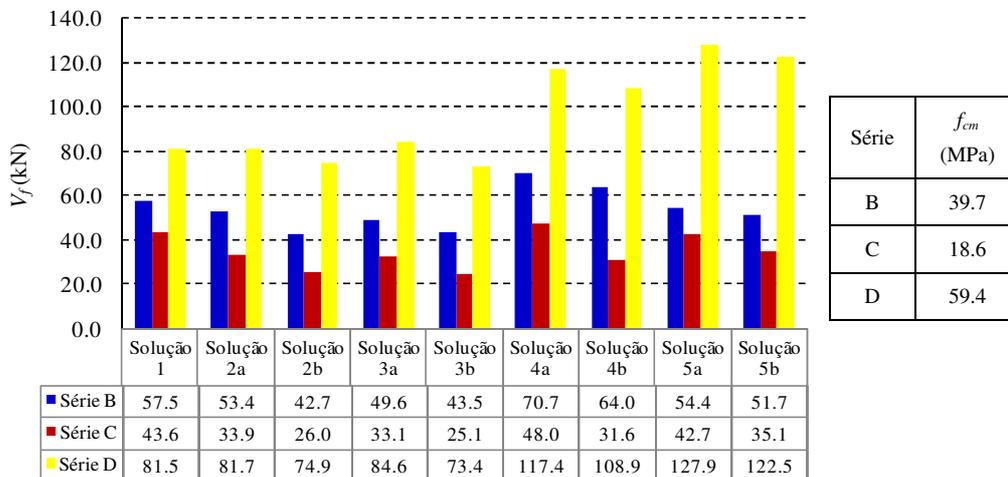


Figura 2.20 - Efeito do betão na eficácia de uma solução de CFRP (Dias, 2008).

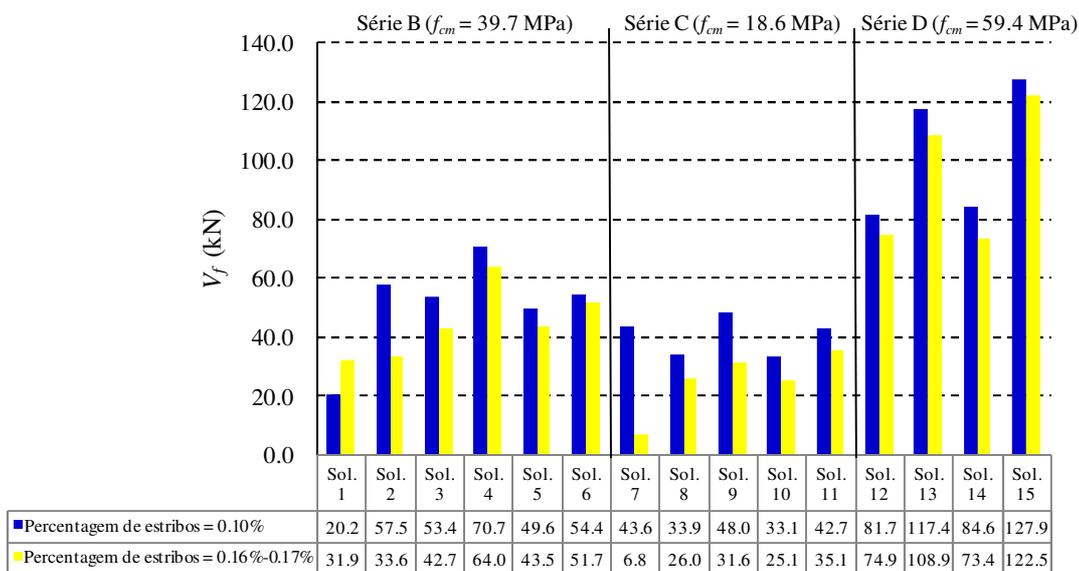


Figura 2.21 - Efeito da percentagem de estribos de aço na eficácia de uma solução de reforço de CFRP (Dias, 2008).

Além da influência do tipo de betão e da percentagem de armadura transversal, no trabalho de Dias (2008) verificou-se que maiores percentagens de reforço de CFRP proporcionaram maiores aumentos na capacidade resistente ao esforço transversal das vigas de betão armado (Figura 2.22). Além disso, também se verificou que os laminados inclinados foram mais eficazes que os laminados verticais (Figura 2.23). Na Figura 2.22 e 2.23 o parâmetro ϵ_{fe} diz

respeito à extensão efetiva do CFRP (nível de mobilização do CFRP na altura da rotura da viga).

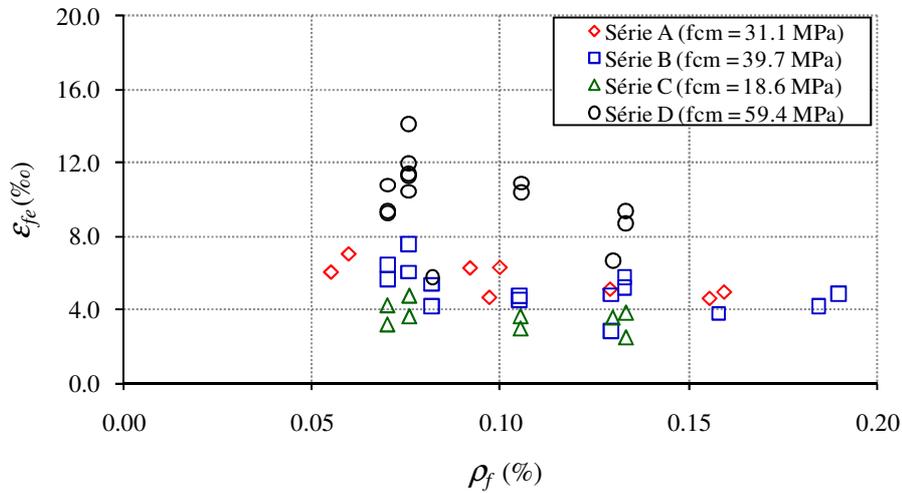


Figura 2.22 - Efetividade do reforço de CFRP (ϵ_{ef}) em função da percentagem ρ_f (Dias, 2008).

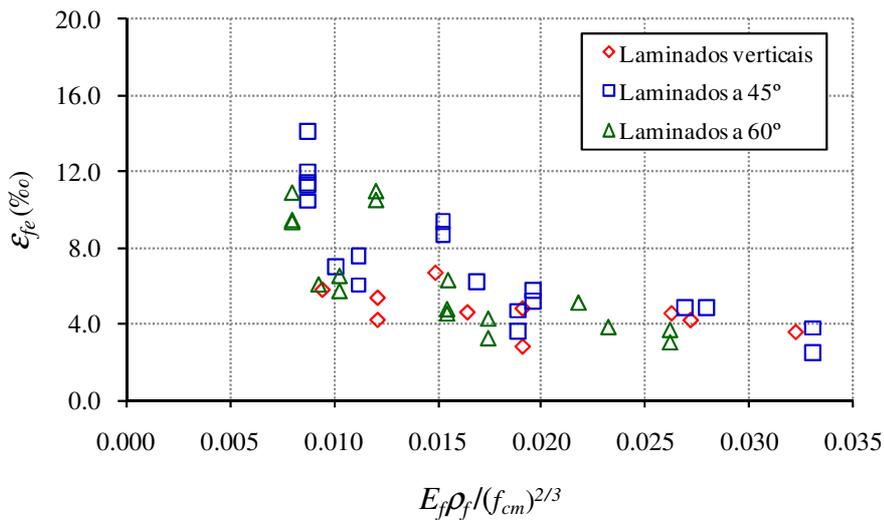


Figura 2.23 - Efetividade do reforço de CFRP (ϵ_{ef}) em função da orientação do CFRP (Dias, 2008).

2.5.3. Reforço simultâneo à flexão e ao corte

Quando se procede a um reforço à flexão, é necessário verificar se o elemento reforçado tem capacidade de resistir às novas forças de corte associadas ao aumento da resistência em termos de flexão. Assim sendo, a necessidade de um reforço à flexão pode levar à necessidade de um reforço ao esforço transversal. Neste contexto, refira-se que a investigação já realizada

sobre a aplicação simultânea de reforços à flexão e ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM) é ainda escassa.

Dias e Barros (2005) realizaram um programa experimental que englobou um conjunto de vigas de betão armado com secção transversal em T (Figura 2.24) reforçadas simultaneamente à flexão e ao corte com laminados de CFRP inseridos (Figura 2.25). Por forma a impor a rotura por corte no menor vão de corte a (vão onde foi aplicado o reforço ao corte de CFRP), foram utilizados estribos de 6 mm de diâmetro afastados de 75 mm ($\phi 6@75$ mm) no vão de corte b . Além disso, as vigas foram armadas longitudinalmente com três varões de 25 mm de diâmetro e , em doze das dezasseis vigas testadas, foi efetuado um reforço à flexão com 4 laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento de acordo com o representado na Figura 2.24.

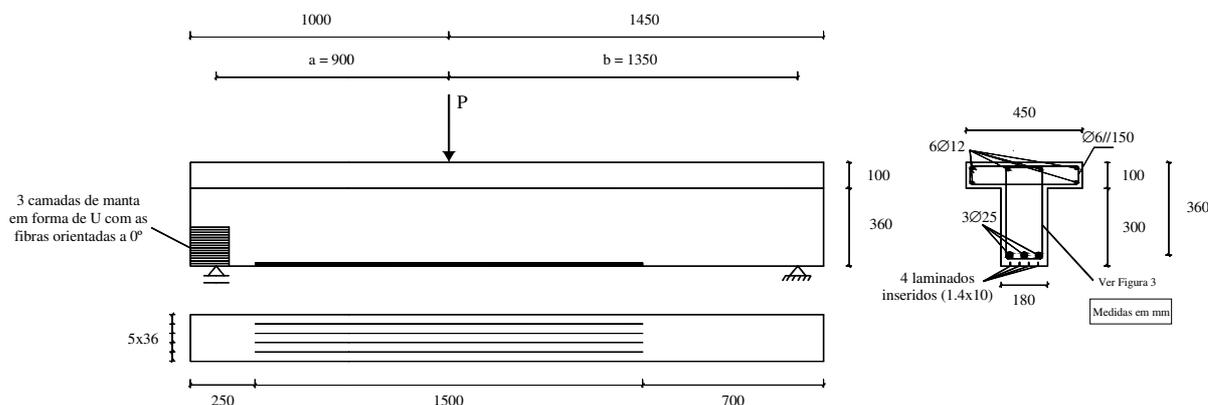


Figura 2.24 - Vigas ensaiadas: geometria, armaduras comuns a todas as vigas, reforço à flexão com laminados de CFRP e reforço do canto inferior esquerdo com manta de CFRP (Dias e Barros, 2005).

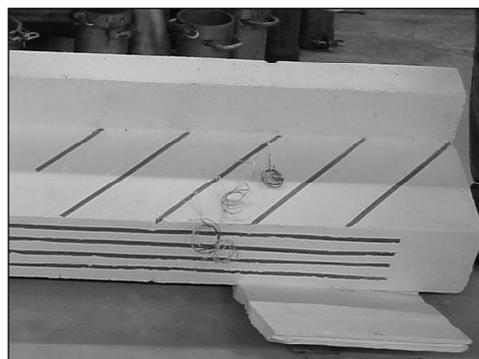


Figura 2.25 - Reforço simultâneo à flexão e ao corte de uma viga de betão armado com laminados de CFRP inseridos (Dias e Barros, 2005).

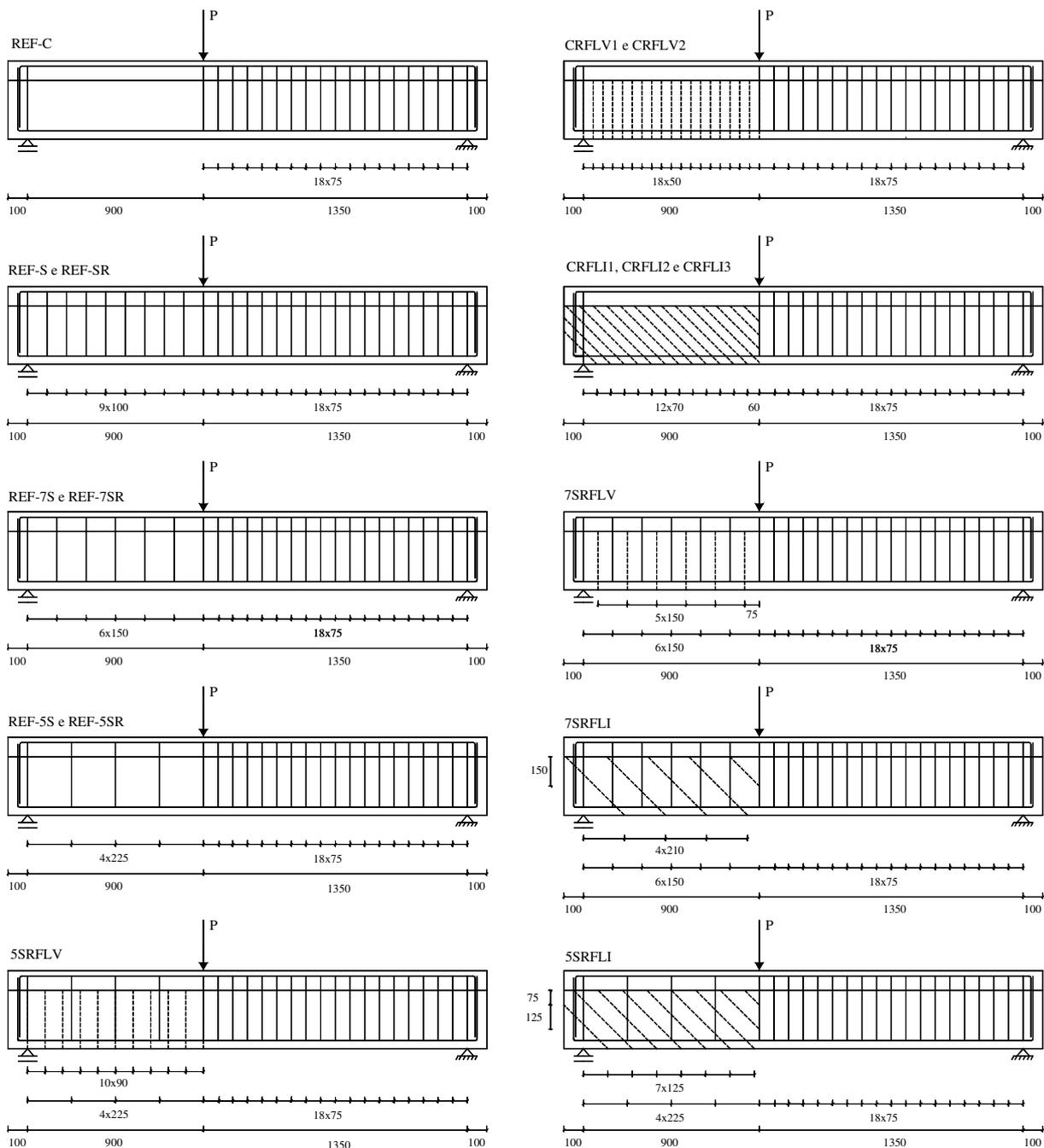


Figura 2.26 - Vigas ensaiadas: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP no reforço ao corte (linha a tracejado) (Dias e Barros, 2005).

Na Figura 2.26 e na Tabela 2.6 apresentam-se as características das vigas anteriormente referidas, onde é possível ver as soluções de reforço ao corte testadas. Quer para o reforço ao corte quer para o reforço à flexão foram utilizados laminados com $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ de secção transversal. Os laminados utilizados tinham, em termos médios, uma resistência à tração de 2952 MPa e um módulo de elasticidade de 166.6 GPa. O aço das armaduras tinha, em termos médios, valores de tensão de cedência de 567 MPa, 465 MPa e 422 MPa e de tensão de rotura de 686 MPa, 575 MPa e 575 MPa, respetivamente para os varões de 6 mm, 12 mm e 25 mm

de diâmetro. À data de realização dos ensaios o betão apresentava uma resistência média à compressão de 47.9 MPa. Na Tabela 2.6 também se apresentam os valores da carga máxima obtida em cada viga e o respetivo modo de rotura.

Tabela 2.6 - Características das vigas reforçadas com CFRP e resultados em termos de carga máxima e modo de rotura (Dias e Barros, 2005).

Vigas	Reforço de CFRP à flexão	Reforço ao corte	F_{max} (kN)	Modo de rotura
REF-C	Não	-	177.6	Corte
REF-S	Não	Estribos de aço (100%)*	451.7	Flexão
REF-7S	Não	Estribos de aço (70%)	429.6	Corte
REF-5S	Não	Estribos de aço (50%)	432.1	Corte
REF-SR	Sim	Estribos de aço (100%)	488.1	Corte (cedência da armadura)
REF-7SR	Sim	Estribos de aço (70%)	392.7	Corte
REF-5SR	Sim	Estribos de aço (50%)	404.2	Corte
CRFLV1	Sim	Laminados de CFRP	338.3	Corte
CRFLV2	Sim	Laminados de CFRP	345.9	Corte
CRFLI1	Sim	Laminados de CFRP	423.2	Corte
CRFLI2	Sim	Laminados de CFRP	416.4	Corte
CRFLI3	Sim	Laminados de CFRP	436.7	Corte
7SRFLV	Sim	Estribos de aço (70%) + Laminados de CFRP	503.9	Flexão
7SRFLI	Sim	Estribos de aço (70%) + Laminados de CFRP	>475.7**	Destacamento de betão no canto inferior esquerdo da viga
5SRFLV	Sim	Estribos de aço (50%) + Laminados de CFRP	437.9	Corte
5SRFLI	Sim	Estribos de aço (50%) + Laminados de CFRP	>504.5**	Esta viga não atingiu a rotura por limitação do equipamento

• Os 100% correspondem à percentagem máxima de estribos testada. ** Vigas que não atingiram a sua capacidade de carga máxima.

Os autores concluíram que a aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas T em betão armado pode ser utilizada em vigas de betão armado com e sem estribos de aço. Além disso, o reforço ao corte com laminados de CFRP inclinados a 45° foi mais eficaz que o reforço com laminados na vertical. Em relação ao reforço simultâneo à flexão e ao corte com laminados de CFRP inseridos é necessário ter em conta as interações existentes, nomeadamente, a influência no comportamento do elemento reforçado na zona de

interrupção do reforço longitudinal com laminados de CFRP. Confrontando os valores da carga máxima das vigas REF-S, 7SRFLV e 5SRFLI, verificou-se que o reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos aplicado a vigas de betão armado com uma elevada percentagem de armadura longitudinal permitiu um aumento de carga máxima de pelo menos 12%.

Na Figura 2.27 apresenta-se um modo de rotura por corte (viga 5SRFLV) e um modo de rotura por flexão (viga 5SRFLV) que ocorreram em vigas reforçadas simultaneamente à flexão e ao corte com laminados de CFRP inseridos. Estas foram as vigas com o tipo de reforço anteriormente referido que atingiram a rotura com valores mais elevados de carga máxima.

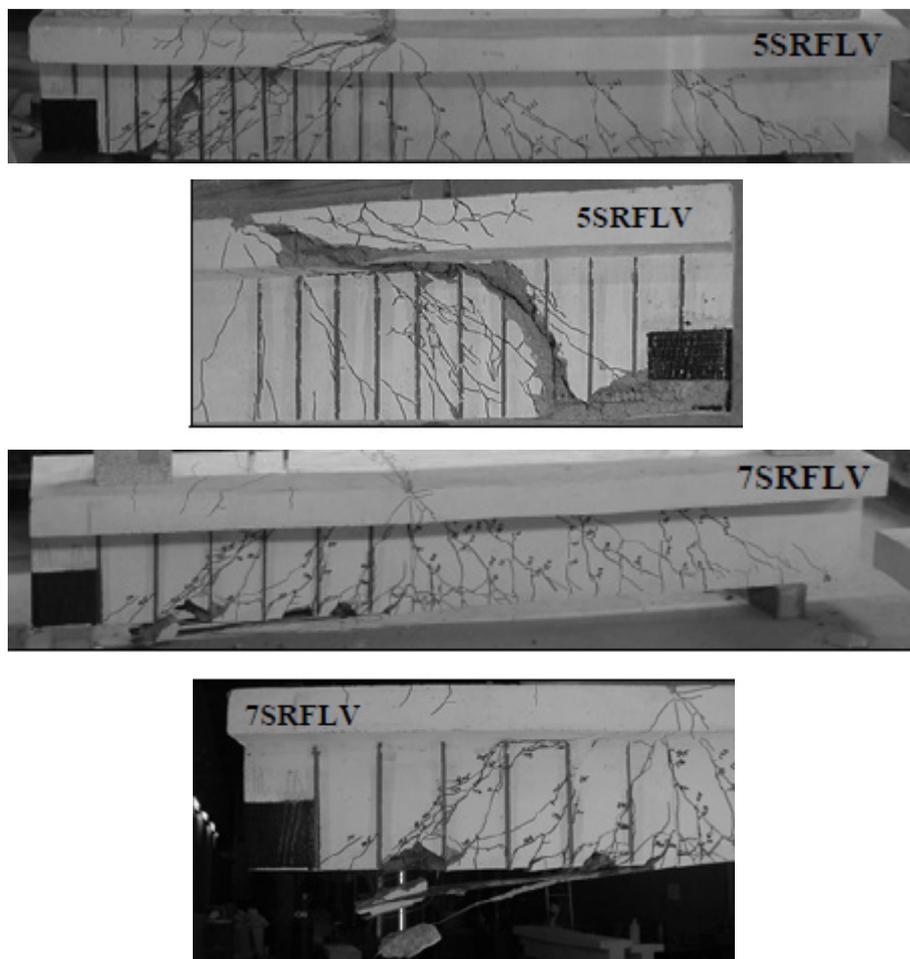


Figura 2.27 - Modos de rotura das vigas reforçadas simultaneamente à flexão e ao corte com laminados de CFRP inseridos (Dias e Barros, 2005).

Capítulo 3

Desempenho do sistema de reforço simultâneo à flexão e ao corte aplicado em serviço

No presente capítulo apresenta-se o estudo realizado para avaliar o desempenho de um sistema de reforço utilizando laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM para aumentar, simultaneamente, a capacidade resistente da viga em termos de flexão e de corte. Deste modo, pretendeu-se, para um cenário possível de ocorrer numa intervenção de reforço de uma viga de betão armado, avaliar a eficácia do sistema de reforço adotado e identificar possíveis efeitos prejudiciais ou benéficos que eventualmente resultem de uma combinação do reforço para os dois tipos de esforços anteriormente referidos. Para tal foram testadas duas vigas de betão armado à escala real (uma com reforço de CFRP e a outra, a viga de referência, sem reforço de CFRP). Neste estudo também se atendeu ao facto de que, na maior parte das situações de reforço correntes, os elementos estruturais de betão armado a reforçar encontram-se em condições de serviço, ou seja, muito provavelmente no estado fendilhado. Para atender a este facto, previamente à aplicação do reforço de CFRP, a viga de betão armado foi sujeita a um carregamento, que introduziu um certo dano inicial na viga e provocou a formação de um conjunto de fendas iniciais. Por último, para atender ao facto de que as vigas a reforçar se encontram habitualmente ligadas monoliticamente às lajes a que dão suporte, e que por esta razão parte da laje contígua à viga colabora na resistência aos esforços atuantes, adotou-se uma secção transversal para as vigas com a forma de “T”. A avaliação do comportamento das duas vigas e do desempenho do reforço implica o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais utilizados (betão, aço, laminados de CFRP e adesivo epóxi). Deste modo as principais propriedades dos materiais acima indicados foram determinadas experimentalmente e encontram-se também descritas neste capítulo.

3.1. GEOMETRIA E EXECUÇÃO DAS VIGAS T

Com objetivo de avaliar o comportamento de vigas de betão armado em serviço, reforçadas com laminados de CFRP segundo a técnica NSM, nos aspetos relacionados com a rigidez de resposta, a capacidade de carga máxima e o modo de rotura, foram construídas duas vigas com secção transversal em T (Figura 3.1), com um comprimento total de 6400 mm e um vão de 5700 mm (Figura 3.2). A armadura longitudinal foi realizada por dois varões com 16 mm de diâmetro na face tracionada e seis varões com 10 mm de diâmetro na zona comprimida. A armadura transversal foi realizada com estribos de 6 mm de diâmetro (2 ramos) espaçados de 300 mm. De entre as vigas a ensaiar, uma viga foi reservada para ser a de referência (sem reforço) e foi denominada por Viga_1 e a outra, denominada por Viga_2, foi reforçada simultaneamente à flexão e ao corte com laminados de CFRP (com dimensões $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$) aplicados de acordo com a técnica NSM.

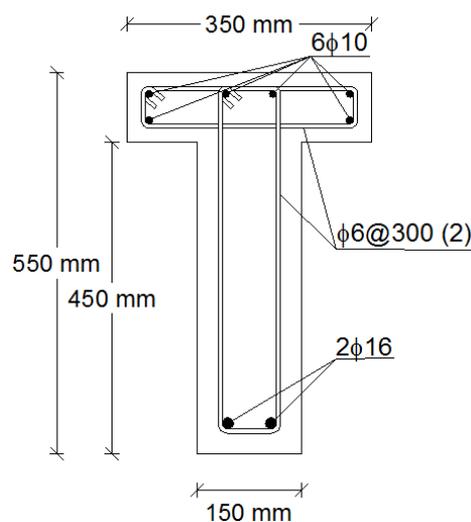


Figura 3.1 - Secção transversal das vigas T em betão armado.

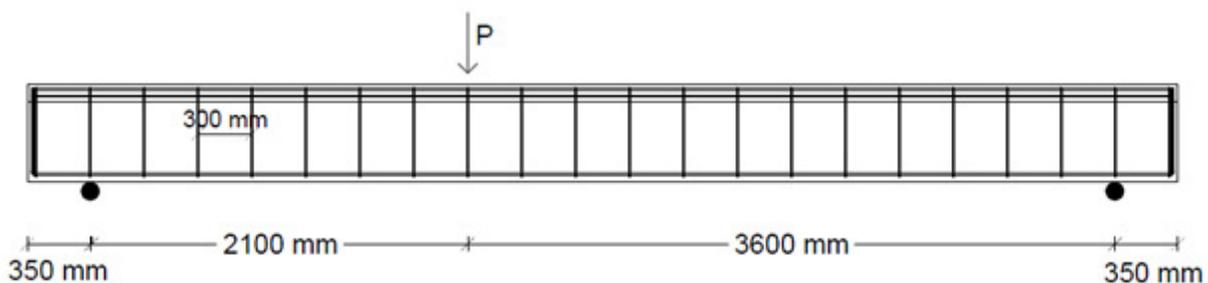


Figura 3.2 - Corte longitudinal das vigas T em betão armado.

O processo de betonagem, durante o qual foram betonadas as vigas e em simultâneo os cilindros para caracterização mecânica do betão, decorreu ao ar livre, num estaleiro de construção. A cura de todos os elementos foi realizada no local de betonagem, permanecendo as vigas e os cilindros sujeitos a condições climatéricas semelhantes. Na primeira semana de cura a temperatura variou entre os 6°C (temperatura mínima à noite) e os 16°C (durante o dia). O betão utilizado era composto por cimento Portland, areia, calcário, cascalho, água e superplastificante. A dimensão máxima dos agregados era de 15 mm. A descofragem das vigas T ocorreu aos oito dias e o transporte das mesmas, para o laboratório onde se realizaram os ensaios, realizou-se vinte e cinco dias após a betonagem. Na Figura 3.3 apresentam-se detalhes do processo que conduziu à execução das vigas.



a) Cofragem utilizada na construção das vigas.



b) Aspetto geral das armaduras.



c) Espaçadores utilizados para garantir a espessura do betão de recobrimento (30 mm).



d) Verificação da posição dos estribos.

Figura 3.3 - Execução das vigas de betão armado utilizadas no programa experimental (cont.)



e) Betonagem das vigas.



f) Betonagem dos provetes cilíndricos.

Figura 3.3 (cont.) - Execução das vigas de betão armado utilizadas no programa experimental.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As principais propriedades dos materiais utilizados na construção das vigas T foram avaliadas por intermédio de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST). Para o betão determinaram-se os valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade. Para o aço determinaram-se os valores da resistência à tração (tensão de cedência e tensão máxima de rotura) e do módulo de elasticidade.

3.2.1. Betão

Para a caracterização mecânica do betão foram betonados e curados, nas mesmas condições das duas vigas, doze cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Quatro desses cilindros foram ensaiados aos 8 dias, quatro aos 28 dias e os restantes quatro foram ensaiados à data da realização do ensaio de rotura das vigas (99 dias). O ensaio de compressão uniaxial para a avaliação da resistência máxima à compressão do betão foi realizado segundo a NP EN 12390-3 (2011) e a determinação do módulo de elasticidade foi realizada com base na norma CPC 8 (1975). A configuração dos dois ensaios encontra-se representada na Figura 3.4.

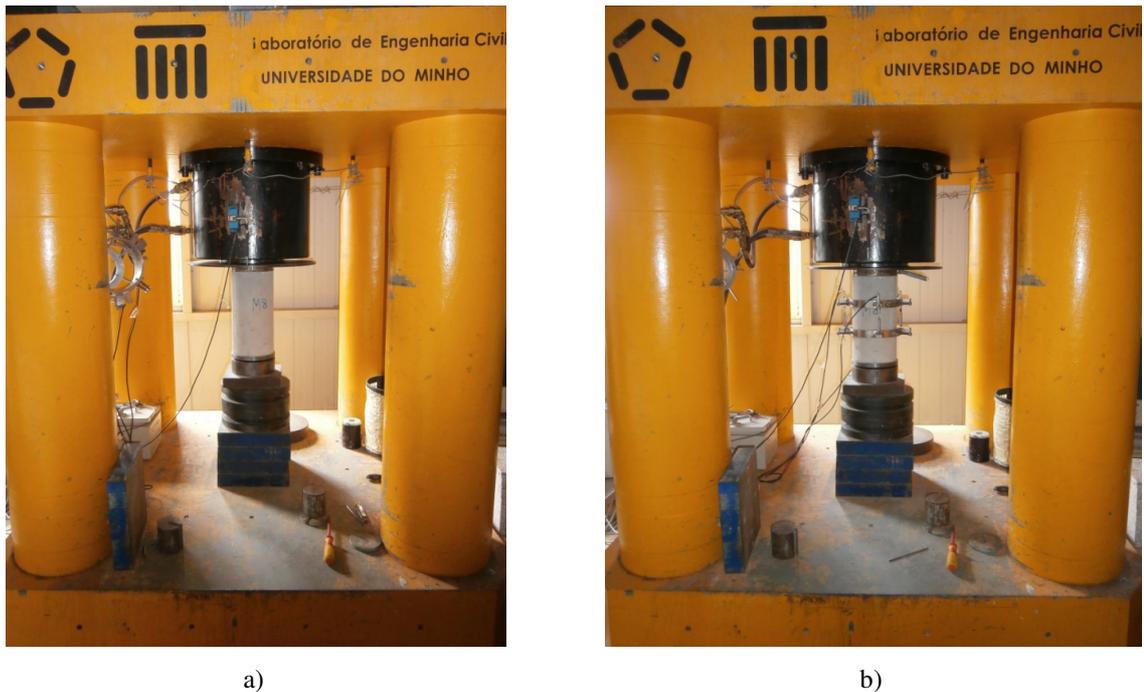


Figura 3.4 - Ensaio à compressão uniaxial: a) determinação da carga máxima; b) determinação do módulo de elasticidade.

O processo para a caracterização do betão, em cada uma das idades anteriormente referidas, começou com o ensaio de um cilindro à rotura para a determinação do valor da resistência à compressão. Este valor foi posteriormente utilizado para o cálculo do nível máximo de carga a utilizar no ensaio cíclico para a determinação do módulo de elasticidade. Este ensaio consistiu na realização de cinco ciclos de carga e descarga em cada cilindro. Em cada ciclo foi imposto num incremento de carga a uma velocidade constante de $0.2 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ até se atingir $1/3$ do valor da carga de rotura do cilindro ensaiado inicialmente. Esta carga foi mantida constante durante 60 segundos, seguindo-se um período de descarga, à mesma velocidade do período de carga, até se atingir uma tensão de compressão de 0.5 MPa . Após a realização do ensaio para a determinação do módulo de elasticidade, os três cilindros relativos foram ensaiados até à rotura para determinação da resistência à compressão. O modo de rotura dos cilindros coincidiu com o que habitualmente se verifica em ensaios de compressão uniaxial em prensa com rótula no prato inferior, observando-se a formação do cone de rotura na parte superior do provete tal como representado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - a) Provetes cilíndricos; b) modo de rotura obtido em três provetes representativos.

Na Figura 3.6 apresenta-se o diagrama tensão *versus* extensão relativo ao comportamento dos cilindros de betão ensaiados aos oito dias de idade. A Tabela 3.1 apresenta os principais resultados do ensaio dos cilindros aos oito dias de idade, verificando-se que o valor médio do módulo de elasticidade e da tensão de rotura à compressão foi de 26.61 GPa e 18.22 MPa, respetivamente.

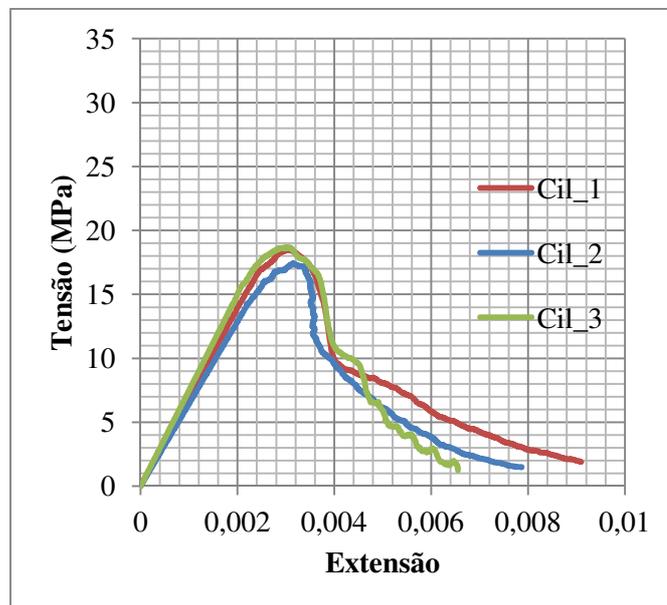


Figura 3.6 - Diagrama tensão vs. extensão dos cilindros ensaiados aos 8 dias de idade do betão.

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas do betão aos 8 dias de idade.

Cilindro	Provetes cilíndricos		Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)
	Diâmetro (mm)	Altura (mm)		
Cil_1	150	300	26.09	18.52
Cil_2	150	300	29.02	17.45
Cil_3	150	300	24.71	18.68
\bar{x}	-	-	26.61	18.22
CoV	-	-	8.3%	3.7%

Nota: \bar{x} = Valor médio; CoV = coeficiente de variação.

Na Figura 3.7 apresenta-se o diagrama tensão *versus* extensão relativo ao comportamento dos cilindros de betão ensaiados aos vinte e oito dias de idade. A Tabela 3.2 apresenta os principais resultados do ensaio dos cilindros aos vinte e oito dias de idade, verificando-se que o valor médio do módulo de elasticidade e da tensão de rotura à compressão foi de 35.57 GPa e 24.51 MPa, respetivamente.

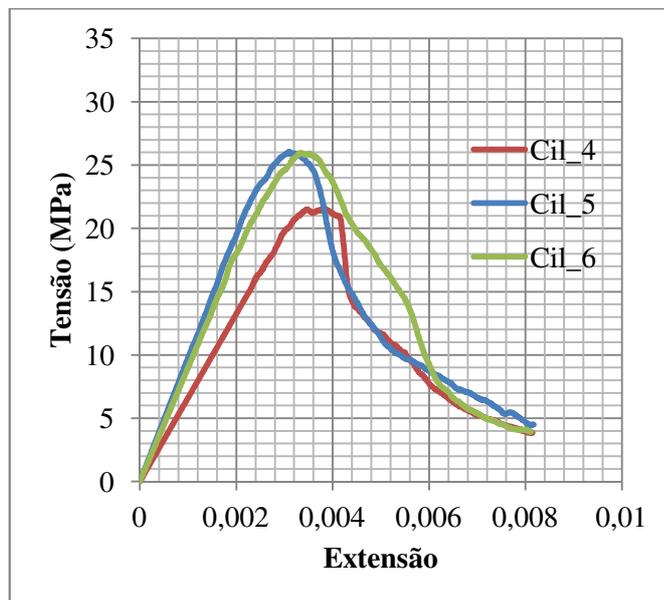


Figura 3.7 - Diagrama tensão vs. extensão dos cilindros ensaiados aos 28 dias de idade do betão.

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do betão aos 28 dias de idade.

Cilindro	Provetes cilíndricos		Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)
	Diâmetro (mm)	Altura (mm)		
Cil_4	150	300	37.79	21.52
Cil_5	150	300	34.52	26.06
Cil_6	150	300	34.39	25.95
\bar{x}	-	-	35.57	24.51
CoV	-	-	5.4%	10.6%

Nota: \bar{x} = Valor médio; CoV = coeficiente de variação.

Na Figura 3.8 apresenta-se o diagrama tensão *versus* extensão relativo ao comportamento dos cilindros de betão ensaiados na data de realização do ensaio de rotura das vigas, ou seja, aos noventa e nove dias de idade. A Tabela 3.3 apresenta os principais resultados do ensaio dos cilindros aos noventa e nove dias de idade, verificando-se que o valor médio do módulo de elasticidade e da tensão de rotura à compressão foi de 32.52 GPa e 31.26 MPa, respetivamente.

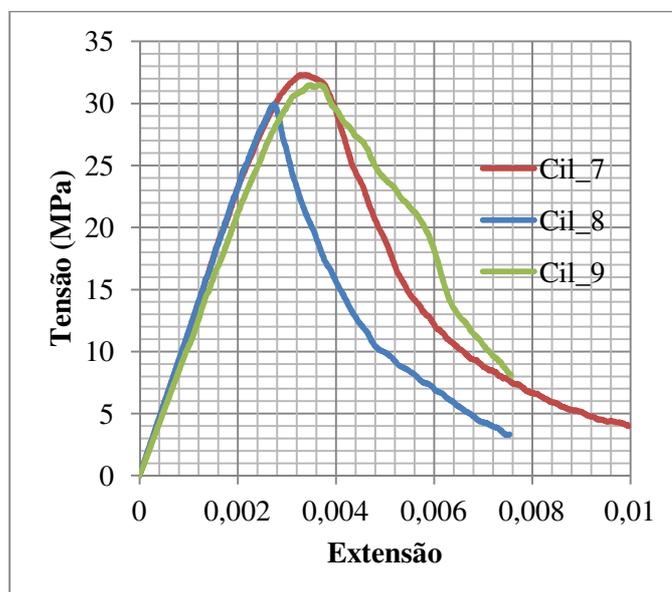


Figura 3.8 - Diagrama tensão vs. extensão dos cilindros ensaiados aos 99 dias de idade do betão.

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do betão aos 99 dias de idade.

Cilindro	Provetes cilíndricos		Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de rotura à compressão (MPa)
	Diâmetro (mm)	Altura (mm)		
Cil_7	150	300	32.3	32.32
Cil_8	150	300	32.72	29.95
Cil_9	150	300	32.55	31.52
\bar{x}	-	-	32.52	31.26
CoV	-	-	0.6%	3.9%

Nota: \bar{x} = Valor médio; CoV = coeficiente de variação.

Os diagramas apresentados anteriormente registam o comportamento tensão *versus* extensão tipicamente verificado nos ensaios de compressão uniaxial onde se observa a rápida transição da fase de endurecimento para a fase de amolecimento até atingir a rotura frágil. Em relação aos resultados obtidos verificou-se uma evolução das propriedades do betão ao longo do tempo, em termos de tensão de rotura à compressão e módulo de elasticidade. No entanto, no ensaio aos 99 dias de idade verificou-se uma diminuição do módulo de elasticidade em comparação com o valor médio obtido aos 28 dias. Este facto deve-se aos valores menos coerentes obtidos no ensaio aos 28 dias. Devido ao facto dos provetes ensaiados nessa data terem sido descofrados no dia anterior, estes podiam conter um excesso de humidade, traduzindo-se num valor do módulo de elasticidade superior ao real e numa tensão de rotura à compressão inferior ao valor real.

3.2.2. Aço

Na construção das vigas de betão armado do presente trabalho experimental foram utilizados varões de aço nervurados da classe A500, com 6, 10 e 16 mm de diâmetro. As propriedades destes varões foram avaliadas experimentalmente através de ensaios de tração uniaxial segundo a norma NP EN 10002-1 (1990).

As amostras ensaiadas foram recolhidas a partir de varões distintos utilizados na construção das vigas. Para cada diâmetro foram ensaiadas cinco amostras. A velocidade de aplicação da força foi de 0.30 kN/s para os varões de 6 mm, 0.8 kN/s para os varões de 10 mm e 0.20 kN/s para os varões de 16 mm. Tal como representado na Figura 3.9, foi utilizado um clip-gauge (comprimento de medição = 50 mm) para medir a deformação durante a fase inicial do ensaio

e permitir a determinação do módulo de elasticidade e da tensão de cedência. Para determinação do módulo de elasticidade traçou-se uma reta, paralela à zona retilínea da curva tensão *versus* extensão, com origem no eixo das abcissas para uma extensão de 0.2%. O declive da referida reta corresponde ao valor do módulo de elasticidade e o ponto onde ela intersecta a curva tensão *versus* extensão corresponde à tensão de cedência das armaduras. Após atingido ponto de cedência das armaduras ocorreu a fase plástica com endurecimento até ser atingida a rotura. Na Figura 3.10a apresentam-se os varões de aço que foram submetidos ao ensaio de tração uniaxial e na Figura 3.10b é possível visualizar a secção onde ocorreu a rotura dos varões.



Figura 3.9 - Preparação do ensaio de tração para os varões de aço e pormenor do clip-gauge.



a)

b)

Figura 3.10 - Varões de aço testados a) antes do ensaio b) depois do ensaio.

Na Figura 3.11 apresenta-se o diagrama tensão *versus* extensão resultante do ensaio de tração uniaxial dos varões de aço de 6 mm de diâmetro. Na Tabela 3.4 são apresentadas as

propriedades mecânicas obtidas no ensaio, onde se destacam os valores médios do módulo de elasticidade, da tensão de cedência e da tensão de rotura, respetivamente, 212.53 GPa, 552.59 MPa e 679.64 MPa.

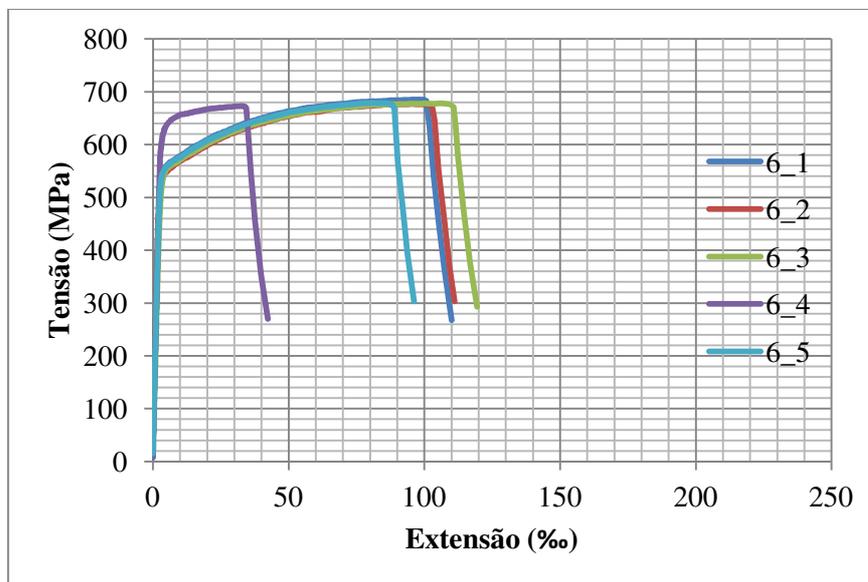


Figura 3.11 - Diagrama tensão vs. extensão dos varões de 6 mm de diâmetro ensaiados.

O provete 6_4, apesar de apresentar tensão de cedência e tensão última semelhante aos restantes provetes, foi considerado excluído da média final por ter um comportamento muito diferente dos restantes. Isto pode ter ocorrido por ter sido recolhido de um varão de aço com uma classe de resistência diferente dos varões que foram utilizados na construção das vigas.

Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas dos varões de aço com 6 mm de diâmetro.

Proвете	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de rotura (MPa)
6_1	213.86	557.75	685.34
6_2	215.44	545.62	676.64
6_3	199.94	551.41	677.82
6_5	220.87	555.57	678.76
\bar{x}	212.53	552.59	679.64
CoV	4.2%	1%	0.6%

Nota: \bar{x} = Valor médio; CoV = coeficiente de variação.

Na Figura 3.12 apresenta-se o diagrama tensão *versus* extensão resultante do ensaio de tração uniaxial dos varões de aço de 10 mm de diâmetro. Na Tabela 3.5 são apresentadas as propriedades mecânicas obtidas no ensaio, onde se destacam os valores médios do módulo de elasticidade, da tensão de cedência e da tensão de rotura, respetivamente, 206.58 GPa, 531.36 MPa e 626.18 MPa.

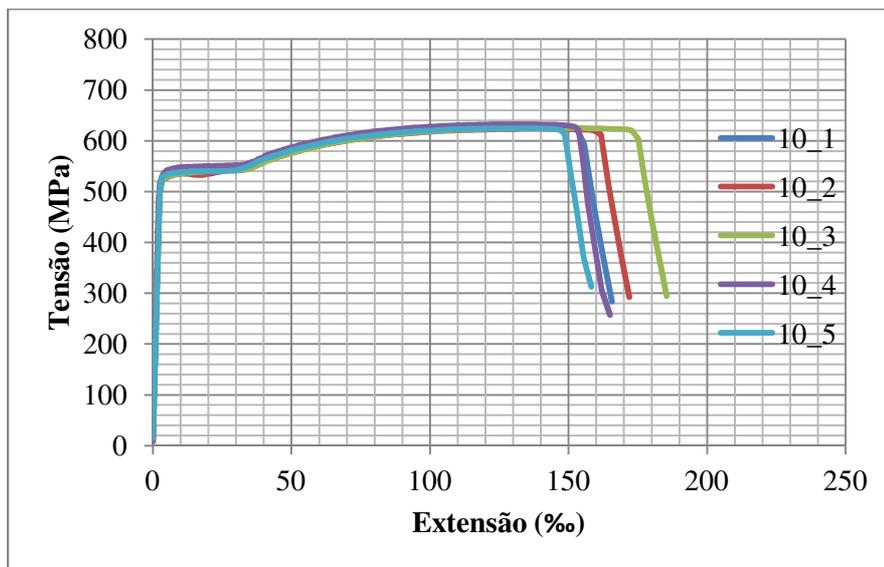


Figura 3.12 - Diagrama tensão vs. extensão dos varões de 10 mm de diâmetro ensaiados.

Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas dos varões de aço com 10 mm de diâmetro.

Provete	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de rotura (MPa)
10_1	203.66	531.84	624.81
10_2	215.10	525.88	623.71
10_3	200.02	528.04	625.15
10_4	209.68	539.36	632.61
10_5	204.44	531.66	624.64
\bar{x}	206.58	531.36	626.18
CoV	2.8%	1.0%	0.6%

Nota: \bar{x} = valor médio; CoV = coeficiente de variação.

Na Figura 3.13 apresenta-se o diagrama tensão *versus* extensão resultante do ensaio de tração uniaxial dos varões de aço de 16 mm de diâmetro. Na Tabela 3.6 são apresentadas as propriedades mecânicas obtidas no ensaio, onde se destacam os valores médios do módulo de

elasticidade, da tensão de cedência e da tensão de rotura, respetivamente, 204.89 GPa, 553.88 MPa e 658.87 MPa.

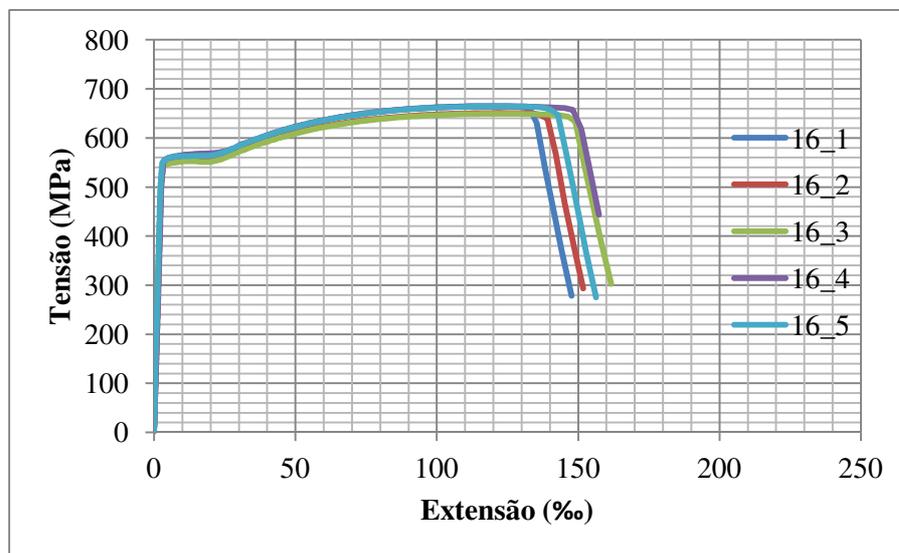


Figura 3.13 - Diagrama tensão vs. extensão dos varões de 16 mm de diâmetro ensaiados.

Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas dos varões de aço com 16 mm de diâmetro.

Provete	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de rotura (MPa)
16_1	200.17	558.21	665.07
16_2	210.06	547.85	650.98
16_3	203.60	547.19	649.29
16_4	195.69	558.35	664.54
10_5	214.91	557.78	664.45
\bar{x}	204.89	553.88	658.87
CoV	3.7%	1%	1.2%

Nota: \bar{x} = valor médio; CoV = coeficiente de variação.

3.3. COMPORTAMENTO FORÇA-FLECHA DAS VIGAS SEM REFORÇO

3.3.1. Ensaio de pré-fendilhação

Para simular as condições de serviço, as duas vigas foram sujeitas a um ensaio de pré-fendilhação, que consistiu num ensaio à flexão em três pontos de carga (Figura 3.14) com deslocamento imposto crescente ao nível da secção de aplicação da carga até se atingir nesta secção uma flecha de $L/350$ (L é a distância entre os apoios). O valor de $L/350$ imposto para a flecha da viga foi definido de modo a que o ensaio de pré-fendilhação terminasse com o início eminente da plastificação das armaduras longitudinais. O ensaio de pré-fendilhação foi realizado por controlo de deslocamento com uma velocidade de deformação de 0.02 mm/s. Após atingido o deslocamento desejado $L/350$ procedeu-se à descarga da viga a uma velocidade de 0.04 mm/s. Para medição da carga aplicada durante o ensaio foi utilizada uma célula de carga com capacidade máxima de 500 kN. Os deslocamentos verticais em cinco secções das vigas foram medidos com recurso a cinco transdutores de deslocamentos (LVDT's - *linear variable differential transformer*). Um LVDT foi instalado na secção de aplicação da carga, sendo os restantes instalados em secções dos vãos de corte tal como se pode observar na Figura 3.14.

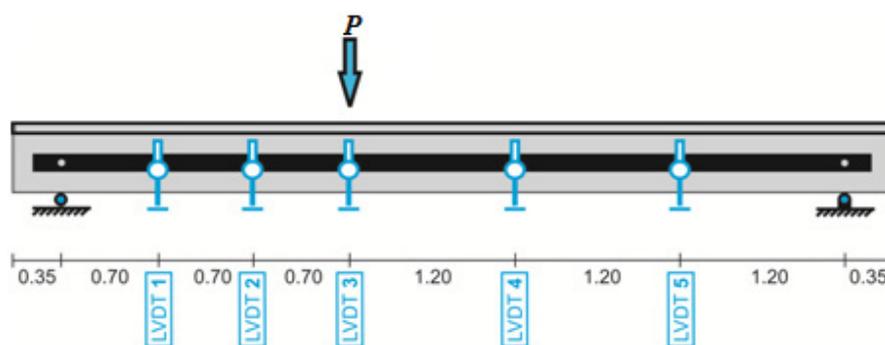


Figura 3.14 - Esquema geral do tipo de ensaio das vigas.

Na Figura 3.15 apresentam-se as curvas força *versus* deslocamento na secção de aplicação da carga durante o ensaio de pré-fendilhação. As curvas de comportamento das vigas permitem verificar que, após o ensaio, permanece nas vigas uma flexa máxima residual aproximada de 5 mm no ponto de aplicação da carga. Esta informação torna-se importante para a definição da profundidade máxima dos entalhes a executar na zona tracionada da viga para a inserção do reforço longitudinal de CFRP (ver secção 3.4.1).

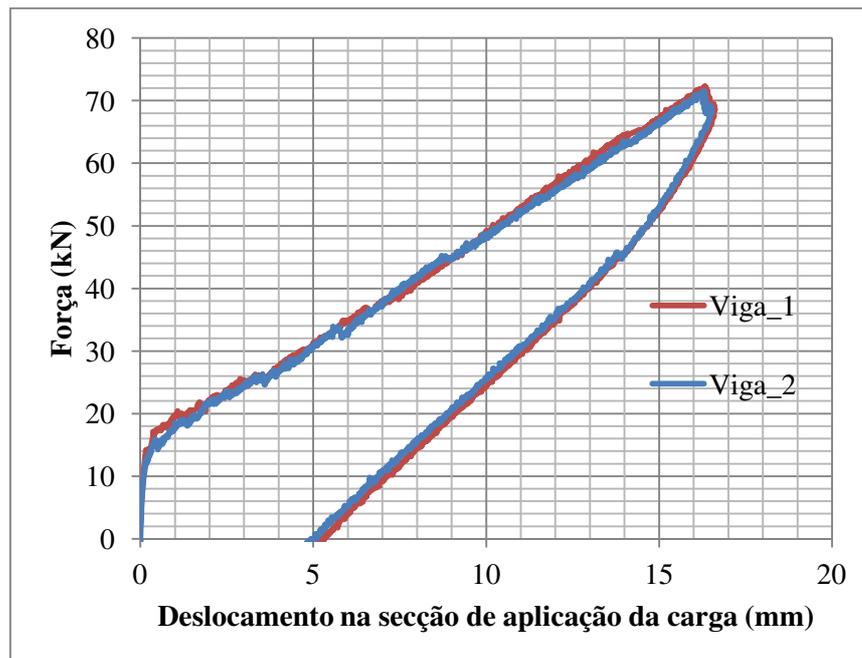


Figura 3.15 - Diagrama força vs. deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas durante o ensaio de pré-fendilhação.

As primeiras fendas detetadas durante o ensaio de pré-fendilhação foram verticais (fendas de flexão) e surgiram na zona de aplicação da carga. Com o aumento do carregamento novas fendas verticais surgiram em secções gradualmente mais afastadas da secção de carregamento. De seguida verificou-se o aparecimento de fendas inclinadas com inclinação crescente em relação à direção vertical (fendas de corte). Os valores da carga observados aquando do início da fendilhação foram 11,17 kN e 11,98 kN para as vigas Viga_1 e Viga_2, respetivamente. O ensaio de pré-fendilhação terminou para uma carga máxima de 72,29 kN e um deslocamento máximo de 16,62 mm para a Viga_1, e para uma carga máxima de 71,55 kN e um deslocamento máximo de 16,52 mm para a Viga_2. Na Figura 3.16 está ilustrado o padrão de fendilhação instalado nas vigas após a conclusão do ensaio de pré-fendilhação.

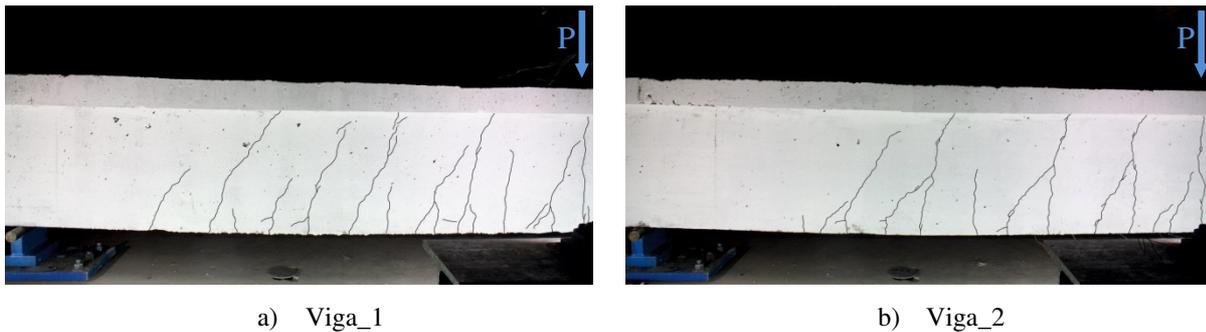


Figura 3.16 - Padrão de fendilhação instalado no ensaio de pré-fendilhação (menor vão de corte).

3.3.2. Ensaio de rotura da Viga_1

O esquema do ensaio à rotura da Viga_1, tal como o da Viga_2 (será analisado na secção 3.4.4), foi o mesmo do ensaio de pré-fendilhação de ambas as vigas (Figura 3.14). Foi usada a mesma célula de carga e os mesmos transdutores de deslocamentos (LVDT's). O ensaio foi controlado por intermédio do LVDT colocado na secção de aplicação da carga tendo-se utilizado uma velocidade de deformação de 0,02 mm/s.

Na Figura 3.17 observa-se o comportamento da Viga_1 relativo ao ensaio à rotura em termos do diagrama força versus deslocamento na secção de aplicação da carga. O ensaio foi dado por terminado em resultado da deformação excessiva da viga e da consequente degradação acentuada do betão na zona comprimida na secção de carregamento.

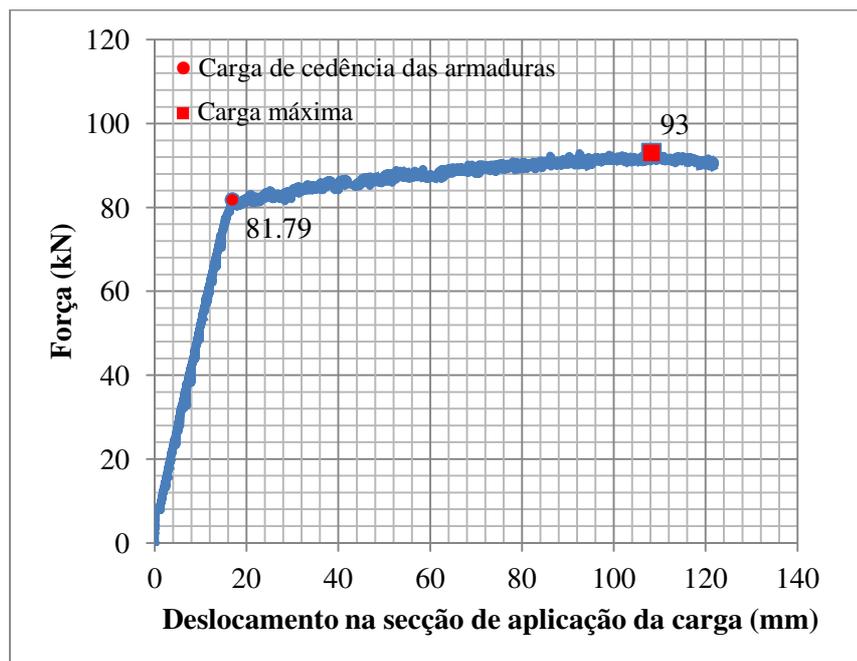


Figura 3.17 – Diagrama força vs. deslocamento na secção de aplicação da carga da Viga_1.

A Viga_1 apresentou um comportamento que é típico das vigas de betão armado ligeiramente armadas, essencialmente apresentado uma rotura dúctil depois de atingida uma deformação considerável. Durante o ensaio não apareceram novas fendas, ou seja, verificou-se apenas a abertura adicional das fendas formadas no ensaio de pré-fendilhação. A carga aplicada no momento em que se atingiu a cedência das armaduras foi de 81.79 kN e a força máxima registada da Viga_1 foi de 93 kN para uma flecha máxima de 108.17 mm. O ensaio foi dado por terminado devido à elevada flecha instalada na viga. O modo de rotura da viga teve por base a plastificação das armaduras longitudinais, o que originou uma flecha bastante elevada e o esmagamento do betão no ponto de aplicação da carga.



Figura 3.18 – Modo de rotura da Viga_1.

3.4. DESEMPENHO DO SISTEMA DE REFORÇO

Para avaliar o desempenho do sistema de reforço adotado neste estudo foi necessário avaliar as condições necessárias para a sua aplicação. Deste modo, nesta secção começa-se por analisar as condicionantes que foram impostas pela geometria da viga T a reforçar e pelo posicionamento dos varões de aço longitudinais e transversais existentes. Com efeito, a inserção dos laminados de CFRP requer a realização de entalhes que, para aumentar a eficácia do CFRP, devem ser o mais profundos possível. No entanto, estes entalhes devem ser realizados de modo a não danificarem as armaduras existentes. Na primeira parte desta secção também se descreve o procedimento de aplicação do reforço de CFRP.

A avaliação do desempenho do sistema de reforço exige também a caracterização do comportamento mecânico dos componentes utilizados. Deste modo, serão apresentados os resultados obtidos na caracterização dos materiais utilizados no reforço da Viga_2, nomeadamente os laminados de CFRP e o adesivo epóxi utilizado na ligação laminado de CFRP-betão. Esta secção termina com a descrição do ensaio à rotura da Viga_2.

3.4.1. Estudo da geometria e do procedimento de aplicação do reforço

O reforço à flexão da Viga_2 foi realizado inserindo laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM). Tal como referido no Capítulo 2, a eficácia da técnica NSM depende da qualidade dos materiais e da qualidade dos procedimentos de aplicação do reforço. Para aplicação do reforço foram seguidos os passos fundamentais apresentados na Figura 2.8.

Para reforço à flexão foram inseridos três laminados de CFRP com dimensões da secção transversal de 1.4 mm por 20 mm (a área de reforço de CFRP era de $0.84 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ enquanto a área correspondente à armadura longitudinal em aço inicial era de $4.02 \times 10^{-4} \text{ m}^2$). Para o reforço ao corte adotaram-se laminados de CFRP inseridos em entalhes verticais efetuados nas faces laterais da alma da viga com um espaçamento de 300 mm (ver Figura 3.20), Desta forma, reduziu-se o espaçamento entre reforços transversais para metade (de 300 mm para 150 mm).

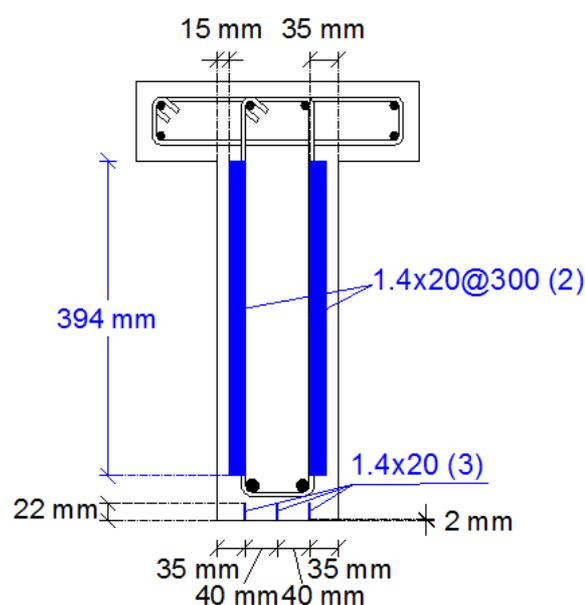


Figura 3.19 - Secção transversal da viga reforçada.

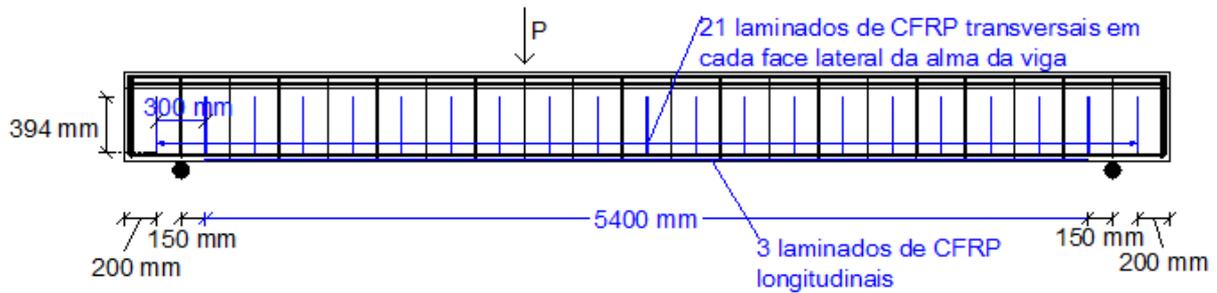


Figura 3.20 - Corte longitudinal da viga reforçada.

Para aumentar a eficácia do reforço, o procedimento de realização dos entalhes para inserção dos laminados de CFRP foi idealizado de modo a maximizar a profundidade de inserção dos laminados, ainda que a técnica de realização dos entalhes fosse convencional. Tendo em consideração a utilização desta técnica em casos reais, foi utilizada uma máquina de corte com disco diamantado de 125 mm de diâmetro, que possibilitou a abertura dos entalhes com 5 mm de largura e com profundidade constante máxima de 35 mm, ver Figura 3.21. De referir que, com este procedimento, durante a abertura dos entalhes nenhuma armadura foi danificada.

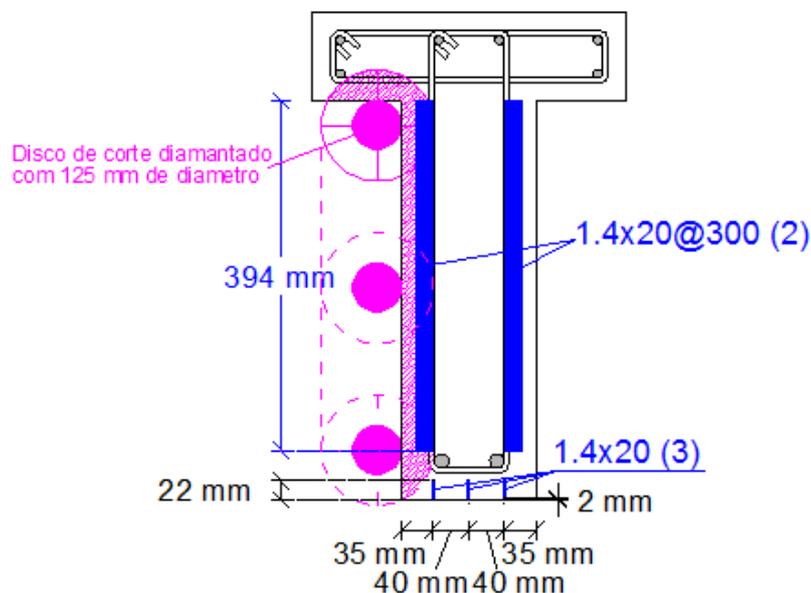


Figura 3.21 - Secção transversal da viga reforçada.

Para o reforço ao corte, os entalhes realizados nas faces laterais da alma da viga foram executados com uma profundidade de 35 mm de acordo com o descrito anteriormente. Na Figura 3.22a, b e c apresentam-se algumas das etapas da execução dos entalhes para o reforço

ao corte. Para os entalhes destinados ao reforço à flexão (Figura 3.22 d), executados na face inferior da viga, a profundidade estava limitada ao valor do recobrimento (30mm). Assim, os entalhes foram executados com 5 mm de largura e com uma profundidade máxima de 27 mm na secção de aplicação da carga e, devido à flecha residual instalada após a realização do ensaio de pré-fendilhação, com profundidade mínima de 22 mm nas proximidades dos apoios. Após a abertura dos entalhes, estes foram limpos com jato de ar-comprimido, procurando-se retirar todo o pó provocado pelo corte do betão, e garantir boas condições de aderência na ligação betão-adesivo. Assim, também se verificou que antes da aplicação do reforço com laminados de CFRP os entalhes estavam secos.



Figura 3.22 - Abertura dos entalhes transversais (a, b e c) e dos entalhes longitudinais (d).

Os laminados de CFRP, fornecidos em rolo com 1,4 mm de espessura e com 20 mm de largura, foram cortados com o comprimento desejado. No total para a execução do reforço ao corte foram cortados quarenta e dois laminados com 394 mm de comprimento e para o reforço à flexão foram cortados três laminados com 5400 mm de comprimento. Depois de cortados,

os laminados foram limpos com um desengordurante, neste caso acetona, para garantir boa aderência entre o CFRP e o adesivo epóxi.

Posteriormente à abertura dos entalhes, ao corte e limpeza dos laminados, procedeu-se à produção do adesivo epóxi. Este é constituído por dois componentes (componente A – resina e componente B – endurecedor) que se misturaram nas percentagens recomendadas em termos de peso, de quatro unidades do componente A para uma unidade do componente B. Na Figura 3.23 está representado o fabrico do adesivo, em que se observa a mistura do componente A, de cor cinzenta clara, com o componente B, de cor cinzenta escura.

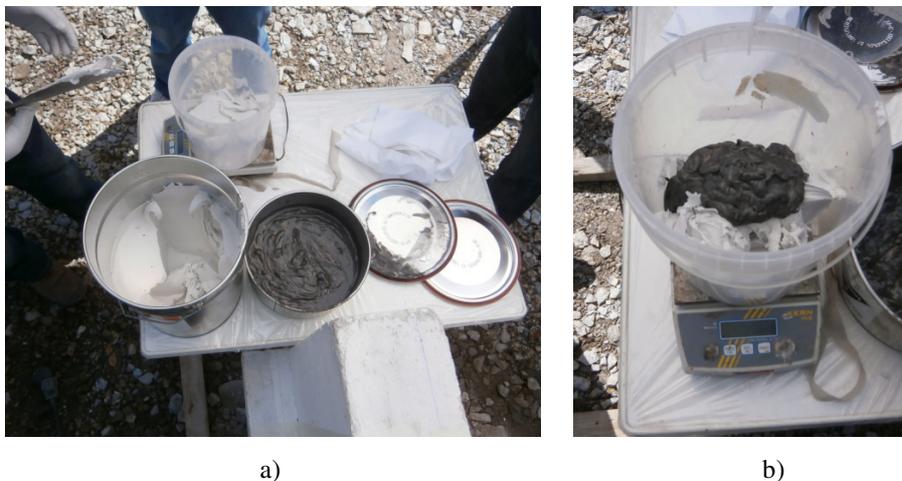


Figura 3.23 - Fabrico do adesivo epóxi e pesagem dos componentes.

Depois da produção do adesivo seguiram-se as seguintes tarefas, (como exemplo, na Figura 4.6 apresenta-se o reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos):

- Preenchimento dos entalhes com adesivo utilizando uma espátula (Figura 3.24a) e aplicação do adesivo nas faces do laminado tal como apresentado nas Figuras 3.24b e 3.24c;
- Inserção dos laminados nos entalhes o mais centrado possível e à profundidade desejada, utilizando pinças construídas para o efeito tal como apresentado nas Figuras 3.24d e 3.24e;
- Remoção do adesivo em excesso com uma espátula tal como apresentado na Figura 3.24f. Nesta fase é necessário evitar o aparecimento de bolhas de ar para não comprometer as condições de aderência na ligação betão-adesivo epóxi-laminado de CFRP.

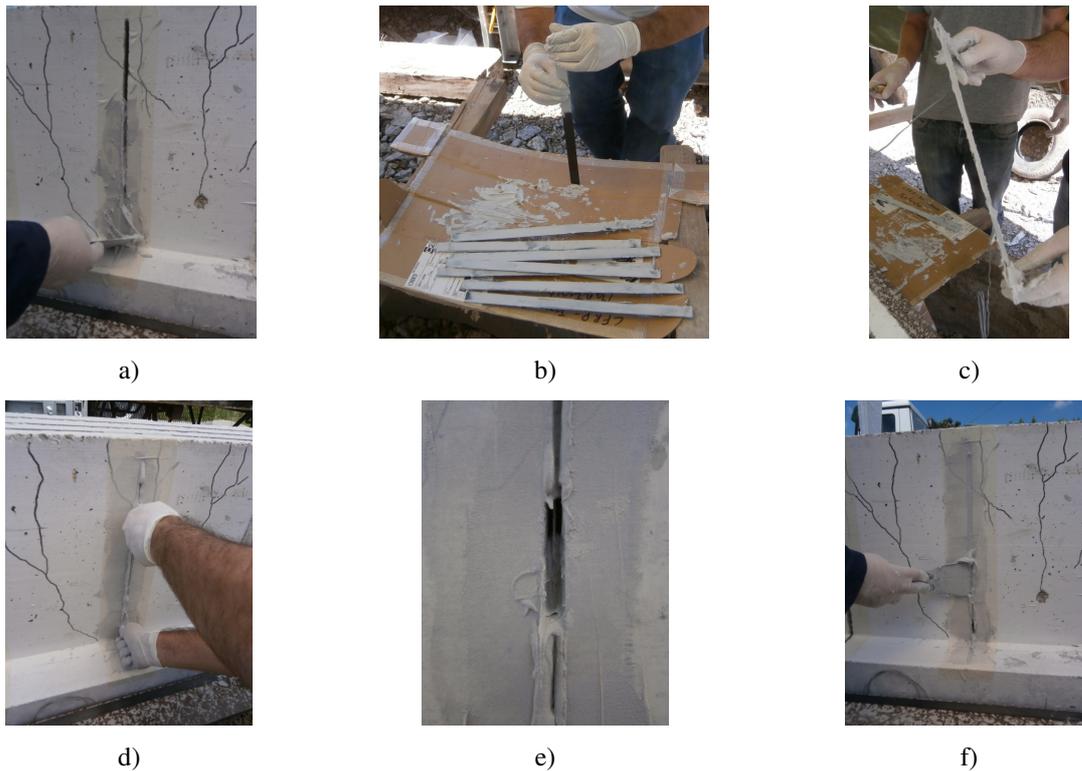


Figura 3.24 - Reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos.

O processo de cura do reforço foi realizado ao ar livre, sujeito às variações de temperatura e humidade, durante a terceira semana do mês de maio de 2013. Registaram-se variações de temperatura entre os 10°C (temperatura mínima registada durante a noite) e os 28°C (temperatura máxima registada durante o dia).

Na Figura 3.25 apresenta-se o aspeto final da viga T reforçada simultaneamente ao corte e à flexão com laminados de CFRP inseridos.



Figura 3.25 - Aspeto geral da viga após a aplicação do reforço de CFRP.

3.4.2. Caracterização mecânica dos laminados de CFRP

O comportamento mecânico em tração dos laminados de CFRP utilizados no programa experimental foi determinado por intermédio de ensaios de tração uniaxial realizados de acordo com a ISO 527-5 (1997). No total foram testados cinco provetes de laminado de CFRP com a geometria representada na Figura 3.26.

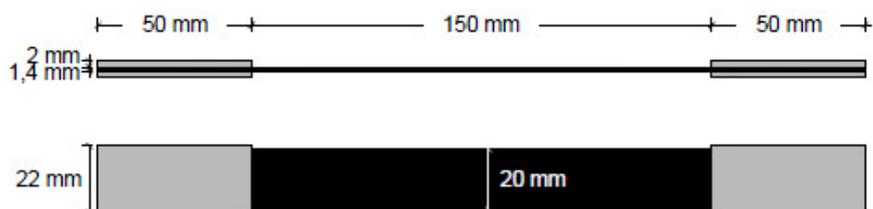


Figura 3.26 - Dimensões dos provetes de laminados de CFRP utilizados no ensaio de tração uniaxial.

Considerando que os laminados de CFRP apresentam um comportamento elástico linear até atingirem a rotura frágil, o seu comportamento à tração pode ser caracterizado pelo módulo de elasticidade e pela tensão de rotura. Tal como no ensaio dos varões de aço, no ensaio de caracterização dos laminados (Figura 3.27) foi utilizado um clip-gauge (comprimento de medição = 50 mm) para medir a deformação inicial dos laminados de CFRP e permitir a determinação do módulo de elasticidade. A velocidade do ensaio foi de 2 mm/min.

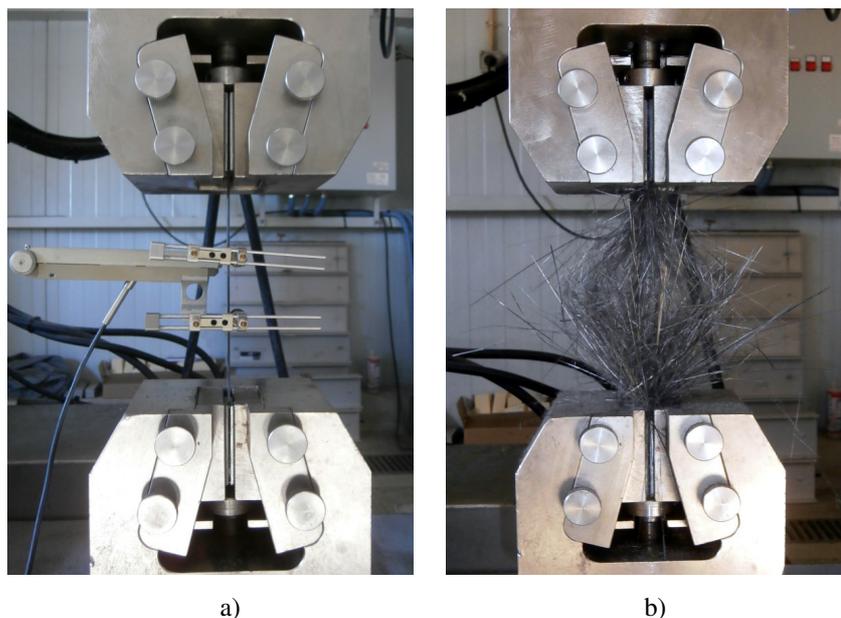


Figura 3.27 - Esquema do ensaio de tração uniaxial para caracterização dos laminados de CFRP.

Na Figura 3.28 apresentam-se os provetes de laminado de CFRP antes e após a realização dos ensaios de tração uniaxial. Na Tabela 3.7 estão representadas as principais propriedades dos provetes ensaiados, verificando-se que os laminados usados no reforço da viga tinham, em termos médios, 169.49 GPa de módulo de elasticidade e 2506.94 MPa de resistência à tração. A extensão foi calculada pela lei de Hooke verificando-se uma extensão média de 14.81%.

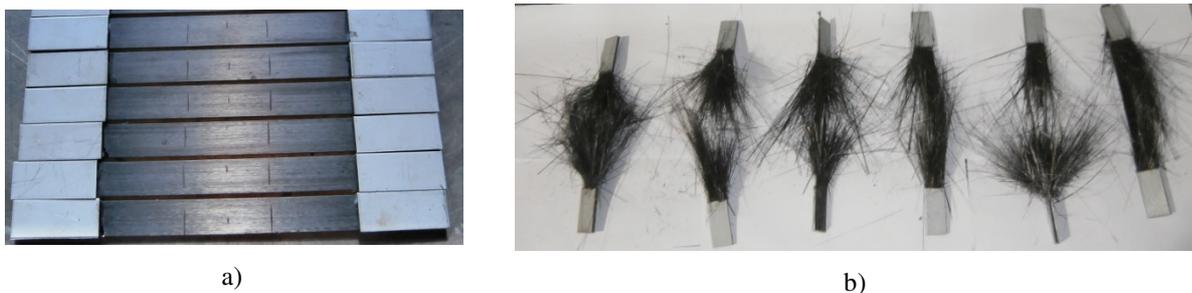


Figura 3.28 - a) Provetes de laminado de CFRP utilizados nos ensaios de tração uniaxial b) modo de rotura dos provetes.

Tabela 3.7 – Propriedades mecânicas dos laminados de CFRP.

Provete	Comprimento (mm)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de rotura (MPa)	Extensão (%)*
CFRP_1	250	167.04	2571.28	15.39
CFRP_2	250	158.80	2371.48	14.93
CFRP_3	250	179.22	2482.19	13.85
CFRP_4	250	175.36	2566.53	14.64
CFRP_5	250	165.48	2549.66	14.41
CFRP_6	250	171.04	2500.48	14.62
\bar{x}	-	169.49	2506.94	14.81
CoV	-	4.3%	3.0%	3.9%

Nota: \bar{x} = Valor médio; CoV = coeficiente de variação; * Obtido pela lei de Hooke.

3.4.3. Caracterização mecânica do adesivo epóxi

Neste trabalho foi utilizado o adesivo epóxi com a designação comercial de “S&P Resin 220 epoxy adhesive” (S&P 2013). Este adesivo, tal como referido anteriormente é fornecido em dois componentes (Figura 3.29a), e caracteriza-se por ter um tempo de trabalhabilidade (*pot*

life) de aproximadamente 25 minutos para uma temperatura de 23°C. Para a caracterização mecânica do adesivo epóxi efetuaram-se ensaios de tração uniaxial de acordo com a ISO 527-2 (1993). As dimensões dos provetes de adesivo epóxi usados nestes ensaios estão representadas na Figura 3.29b. Estes provetes foram ensaiados à tração uniaxial (Figura 3.30). A velocidade de deformação axial imposta durante o ensaio de tração uniaxial (Figura 3.30) foi de 1 mm/min.

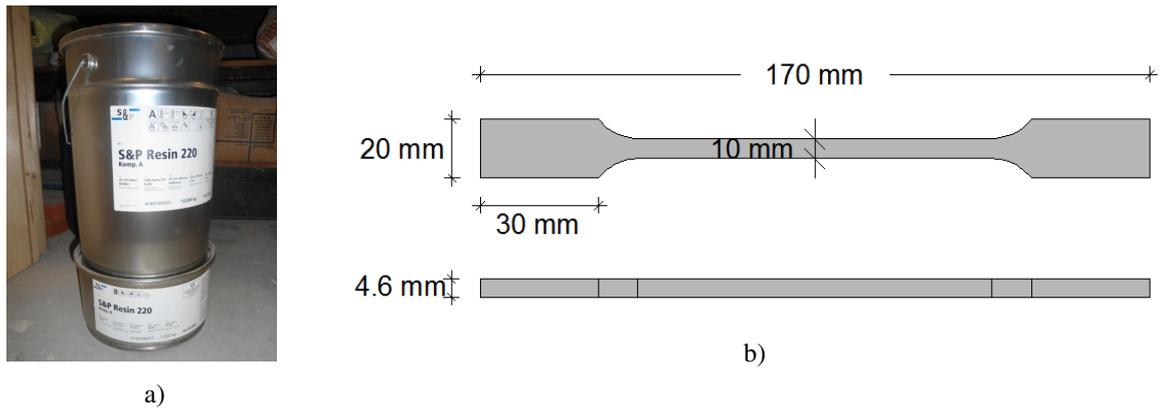


Figura 3.29 - a) Adesivo epóxi utilizado para colagem dos laminados de CFRP; b) Dimensões dos provetes utilizados para caracterização experimental do adesivo epóxi.

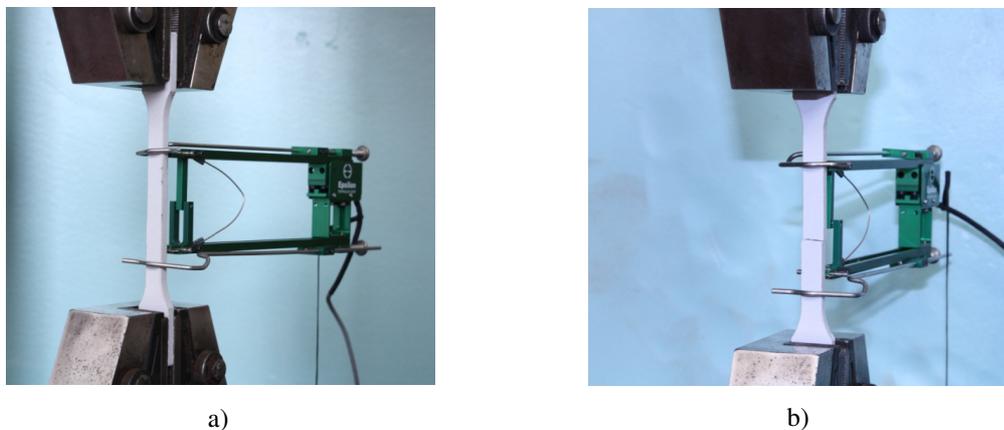


Figura 3.30 - Esquema do ensaio de tração uniaxial realizado para caracterização do adesivo epóxi: a) no início do ensaio; b) modo de rotura verificado.

Tal como representado na Figura 3.31, no total foram ensaiados doze provetes de adesivo epóxi referentes a duas amostras (seis provetes cada). A amostra 1 era composta por seis provetes curados durante sete dias numa câmara climática à temperatura de 20°C, e a amostra 2 era composta por seis provetes de adesivo epóxi, produzidos aquando do reforço da viga e curados nas mesmas condições que a viga reforçada durante dezoito dias, tendo sido ensaiados aquando da realização do ensaio de rotura das vigas. Os valores das principais

propriedades mecânicas do adesivo epóxi, obtidos experimentalmente, encontram-se registados na Tabela 3.8. Na Figura 3.31 apresentam-se os provetes de cada amostra, antes e após a realização do ensaio.

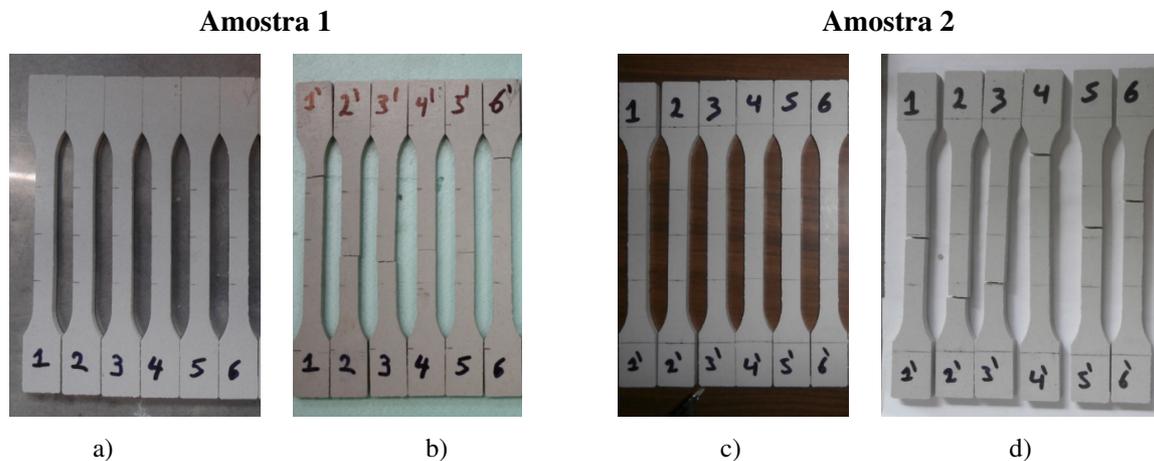


Figura 3.31 - Provetes de adesivo epóxi: Amostra 1, a) antes do ensaio e b) depois do ensaio; Amostra 2, c) antes do ensaio e d) depois do ensaio.

Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas do adesivo epóxi.

Amostra 1			Amostra 2		
Provete	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de rotura (MPa)	Provete	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de rotura (MPa)
1	8.87	24.58	1	8.77	25.87
2	8.83	25.11	2	8.78	29.32
3	8.02	25.59	3	8.26	28.51
4	8.50	24.89	4	8.28	29.56
5	8.58	20.07	5	8.32	28.51
6	8.13	25.58	6	8.00	27.19
\bar{x}	8.49	24.30	\bar{x}	8.39	28.16
CoV	4%	8.69%	CoV	3.68%	4.96%

Nota: \bar{x} = Valor médio; CoV = coeficiente de variação.

Os provetes referentes à amostra 1 (curados na câmara climática) apresentaram valores médios para o módulo de elasticidade e resistência à tração de 8.49 GPa e 24.30 MPa, respetivamente. Os provetes referentes à amostra 2 (curados no mesmo local que a viga reforçada) apresentaram valores médios para o módulo de elasticidade e resistência à tração de 8.39 GPa e 28.16 MPa. A maior resistência à tração nos provetes da amostra 2, comparativamente com os da amostra 1, indicia que o processo de cura da amostra 1 não estaria ainda totalmente concluído no momento da realização do ensaio. Por outro lado, os

ciclos de temperatura aos quais os provetes da amostra 2 foram sujeitos poderão ter sido benéficos para um processo de polimerização mais eficiente.

3.4.4. Comportamento força-flecha da Viga_2

O ensaio de rotura da Viga_2 foi realizado aos noventa e nove dias de idade (18 dias após o reforço de CFRP). O procedimento de ensaio foi semelhante ao imposto no ensaio à rotura da Viga_2. Na Figura 3.32 apresenta-se o comportamento força *versus* deslocamento na secção de aplicação da carga da Viga_2 durante o ensaio que foi dado por terminado quando a viga atingiu a rotura.

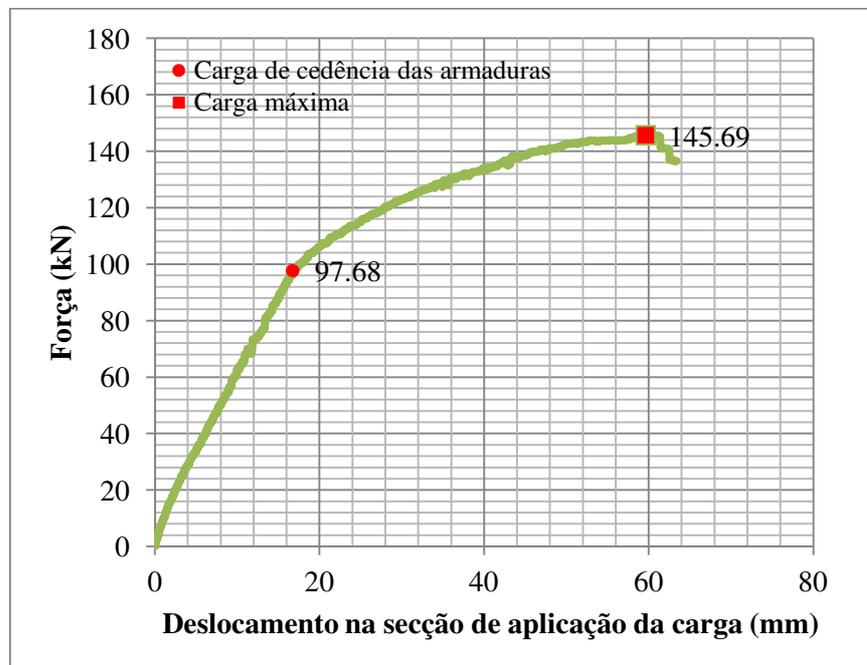


Figura 3.32 - Diagrama força vs. deslocamento na secção de aplicação da carga da Viga_2.

O comportamento da Viga_2 caracteriza-se por duas fases distintas: antes e após a cedência das armaduras. Na fase anterior à da cedência das armaduras. O padrão de fendilhação instalado na viga permaneceu igual ao imposto durante o ensaio de pré-fendilhação. Após a cedência das armaduras, que ocorreu aos 97.68 kN, foram surgindo novas fendas com o aumento da força aplicada até ao momento em que se atingiu a rotura da viga. A carga máxima registada para a Viga_2 foi de 145.69 kN para uma flecha máxima de 59.3 mm. O modo de rotura da Viga_2 ocorreu por destacamento dos laminados de CFRP de reforço à flexão (Figura 3.33).



Figura 3.33 – Modo de rotura da Viga_2.

3.5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

As curvas da resposta força *versus* deslocamento vertical na secção de aplicação da carga obtidas no ensaio à rotura da Viga_1 e da Viga_2 estão representadas da Figura 3.34.

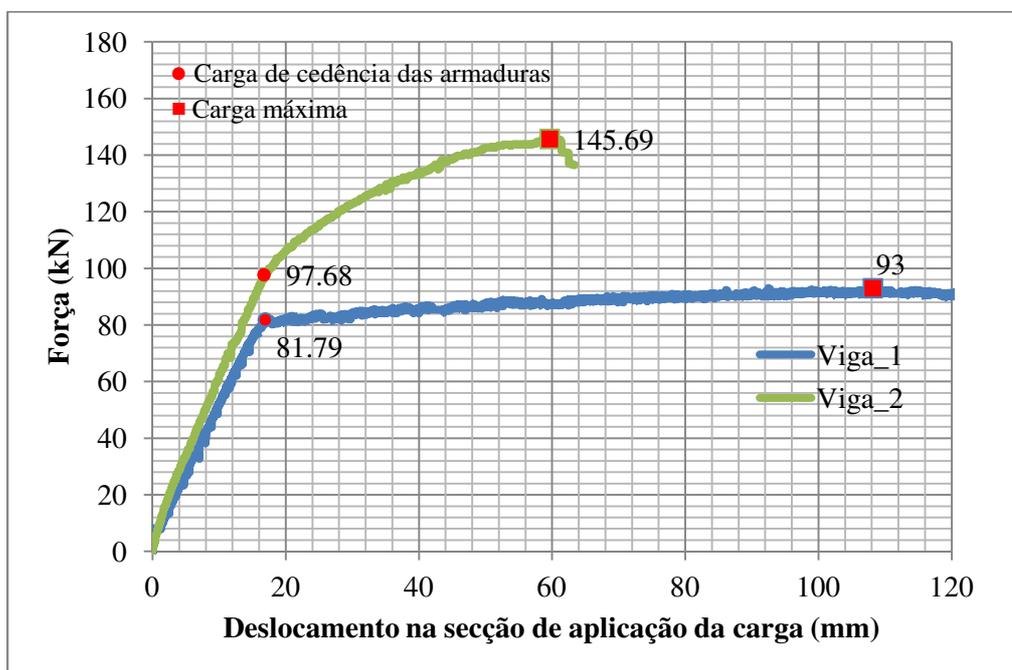


Figura 3.34 - Comparação do comportamento até à rotura da Viga_1 e da Viga_2.

Comparando o comportamento das referidas vigas é possível observar a contribuição do sistema de reforço com CFRP para o aumento da capacidade resistente da viga. Com efeito, na Figura 3.34 são visíveis os benefícios da presença do CFRP tanto pelo aumento da rigidez

inicial como pelo aumento da capacidade de carga. A força que conduziu à cedência das armaduras na Viga_1 foi de 81.79 kN e a força máxima obtida foi 93 kN. No caso da Viga_2 os valores alcançados das referidas forças foram superiores aos da Viga_1, tendo a cedência das armaduras ocorrido para uma força de 97.68 kN e a rotura da viga sido alcançada para uma força máxima de 145.69 kN.

Na Figura 3.35 representa-se a deformada final das vigas tendo em conta as leituras registadas nos cinco LVDT's (Figura 3.14), onde se verifica o aumento da rigidez proporcionado pelo sistema de reforço na Viga_2.

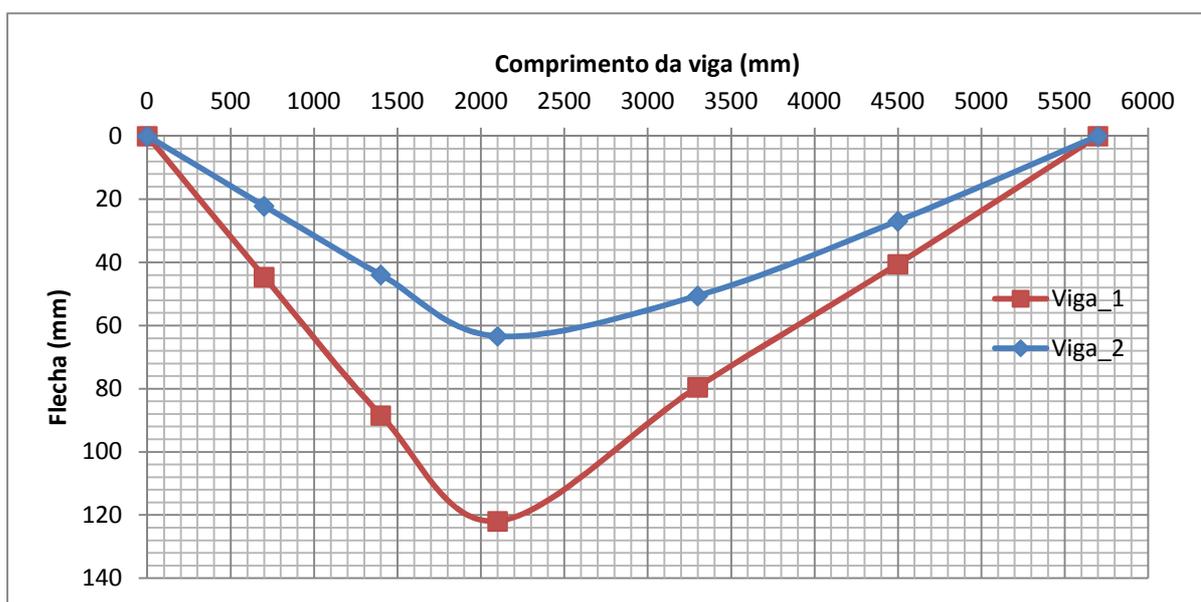


Figura 3.35 - Deformada final das vigas ensaiadas à rotura.

Na Tabela 3.9 apresentam-se os principais resultados obtidos no ensaio de rotura das vigas. Assim, são apresentados os valores da força para os quais se atingiu a cedência das armaduras, F_{sy} , a força máxima, $F_{máx}$, e os acréscimos de força verificados em termos de F_{sy} e de $F_{máx}$. Nesta tabela, também se apresenta o valor do deslocamento da secção de aplicação de carga no instante em que se atinge a capacidade máxima resistente da viga ($F_{máx}$), $u_{Fmáx}$.

Analisando os dados da Tabela 3.9 verifica-se que o sistema de reforço utilizado resultou num acréscimo da carga de cedência das armaduras de 19.4% e num acréscimo da carga máxima de 56.7%. Em relação ao deslocamento no ponto de aplicação da carga quando atingida a carga máxima, devido ao aumento da rigidez da Viga_2, esta apresentou um deslocamento de 59.3 mm, bastante inferior ao deslocamento da Viga_1 com um valor de 108.17 mm.

Tabela 3.9 - Principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas até a rotura.

Viga	F_{sy} (kN)	Acréscimo de carga de cedência (%)	$F_{máx}$ (kN)	Acréscimo de carga máxima (%)	$u_{Fmáx}$ (mm)
Viga_1	81.79	-	93	-	108.17
Viga_2	97.68	19.4	145.69	56.7	59.3

Na Viga_2, tal como referido anteriormente, o modo de rotura ocorrido foi prematuro por destacamento dos laminados de CFRP de reforço à flexão, verificando-se que não foi mobilizada a capacidade máxima resistente dos laminados de CFRP à tração. A resistência relativamente baixa do betão das vigas ($f_{cm} = 31.26$ MPa) poderá ter influenciado o rendimento do reforço, ao promover a rotura prematura por destacamento dos laminados de CFRP. Assim, um aumento da classe de resistência do betão poderia conduzir a um maior grau de mobilização dos laminados de CFRP e a uma maior capacidade de carga para a viga reforçada, dado que para um betão de classe de resistência superior a rotura ao nível da interface ocorreria para cargas mais elevadas.

Utilizando o bloco retangular de tensões como aproximação das tensões instaladas na zona de betão comprimido ao nível da secção de momento fletor máximo é possível estimar a tensão máxima atingida pelos laminados de CFRP estabelecendo as equações de equilíbrio ao nível da secção. Considerando que a carga de rotura da Viga_2 foi de 145.69 kN, obtém-se por equilíbrio um momento resistente máximo, M_{rd} , ao nível da secção de carregamento de 193.26 kN.m. Na Tabela 3.10 apresentam-se as principais características dos materiais utilizados nomeadamente, a resistência à compressão do betão, f_{cm} , a tensão de cedência das armaduras, f_{ym} e o módulo de elasticidade dos laminados de CFRP, E_f .

Tabela 3.10 - Características dos materiais.

Betão: $f_{cm} = 31.26$ MPa
Aço: $f_{ym} = 553.88$ MPa
Laminado de CFRP: $E_f = 169.49$ GPa

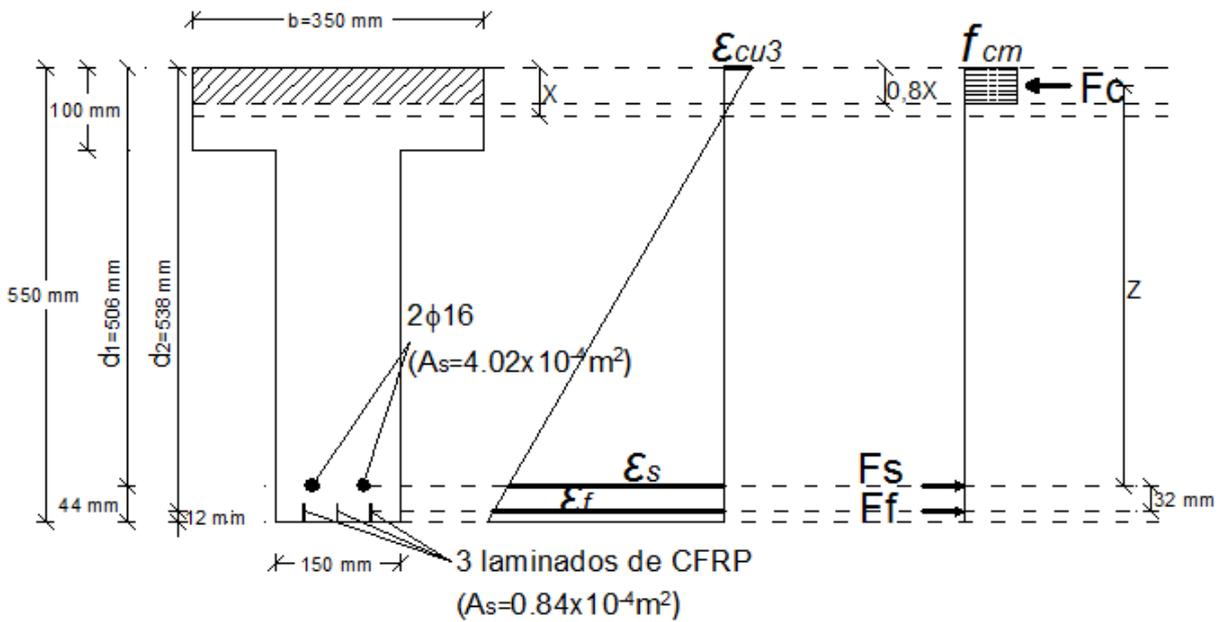


Figura 3.36 - Estabelecimento do equilíbrio interno da secção de momento máximo.

Impondo as equações de equilíbrio interno da secção tem-se:

$$\begin{cases} \Sigma M = 0 \\ \Sigma F = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} M_{rd} = F_c \times z + F_f \times 0.032 \\ N_{rd} = F_c - F_s - F_f \end{cases},$$

Como foi realizado um ensaio de flexão simples pode assumir-se que $N_{rd} = 0$. Deste modo a 2ª equação do sistema anteriormente apresentado resulta em $F_c = F_s + F_f$. As resultantes F_c e F_s valem respetivamente:

$$F_c = f_{cm} \cdot 0.8x \cdot b = 31.26 \times 10^3 \times 0.8x \times 0.35 = 8752.8x$$

$$F_s = A_s \cdot f_{ym} = 4.02 \times 10^{-4} \times 553.88 \times 10^3 = 222.66 \text{ kN}$$

Tendo em conta o comportamento linear elástico dos laminados de CFRP tem-se que:

$$F_f = A_f \cdot \epsilon_f \cdot E_f = 8.4 \times 10^{-5} \times \frac{\epsilon_{cu3} \times (0.538 - x)}{x} \times 169.49 \times 10^6$$

$$z = 0.506 - 0.4x$$

Resolvendo o sistema de equações anterior obtém-se:

$$\begin{cases} 193.26 = 8752.8x \times (0.506 - 0.4x) + (8.4 \times 10^{-5} \times \frac{\varepsilon_c \times (0.538 - x)}{x} \times 169.49 \times 10^6) \times 0.032 \\ 8752.8x = 222.66 + 8.4 \times 10^{-5} \times \frac{\varepsilon_c \times (0.538 - x)}{x} \times 169.49 \times 10^6 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = 0.001016 = 1.016\text{‰} \\ x = 0.044 \text{ m} \end{cases}$$

A profundidade do eixo neutro estimada resulta nos seguintes valores de extensão e de tensão máxima na armadura longitudinal e nos laminados longitudinais de CFRP:

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d_1 - x} \Leftrightarrow \frac{1.016}{0.044} = \frac{\varepsilon_s}{0.506 - 0.044} \Leftrightarrow \varepsilon_s = 10.66\text{‰}$$

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{222.66}{4.02 \times 10^{-4}} = 553.88 \text{ MPa}$$

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_f}{d_2 - x} \Leftrightarrow \frac{1.016}{0.044} = \frac{\varepsilon_f}{0.538 - 0.044} \Leftrightarrow \varepsilon_f = 11.41\text{‰}$$

$$F_f = A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f = 8.4 \times 10^{-5} \times 0.1265 \times 169.49 \times 10^6 = 180.089 \text{ kN}$$

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f} = \frac{180.089}{8.4 \times 10^{-5}} = 2143.912 \text{ MPa}$$

Da análise dos valores agora calculados, conclui-se que as armaduras longitudinais entraram em cedência, o que está em concordância com a discussão de resultados realizada anteriormente acerca da resposta força *versus* deslocamento na secção de aplicação da carga da Viga_2, e que os laminados de CFRP não atingiram a totalidade da sua capacidade resistente à tração (no ensaio de caracterização dos laminados de CFRP obteve-se uma tensão de rotura de 2506.94 MPa).

Para estimar a tensão nos laminados de reforço ao corte pode-se idealizar uma treliça de Morsch e calcular a força de tração instalada ao nível das barras verticais. Contudo, a treliça de Morsch sobrestima as forças de tração instaladas nos estribos, dado que por um lado assume uma inclinação das escoras de betão comprimidas de 45° e por outro lado despreza a contribuição de outros mecanismos de resistência ao esforço de corte que colaboram na diminuição da força absorvida pelos estribos, tais como o efeito cavilha das armaduras longitudinais, a contribuição da zona de betão comprimido e o efeito de engrenagem das superfícies irregulares opostas das fendas inclinadas. Deste modo, recorreu-se ao REBAP

(1983), designadamente o Artigo 53º, para estimar a contribuição destes mecanismos para a resistência ao esforço de corte atuante, através do termo corretor da teoria de Morsch, V_{cd} .



Figura 3.37 - Treliça de Morsch idealizada.

De acordo com o artigo 53º do REBAP (1983),

$$V_{rd} = V_{cd} + V_{wd}$$

em que V_{rd} é o esforço transversal resistente, V_{cd} é o termo corretor da treliça de Morsch e V_{wd} é a resistência das armaduras de esforço transversal segundo a teoria de Morsch.

Para a viga em análise tem-se que:

$$V_{rd} = 92.015 \text{ kN (ver Figura 3.37);}$$

$$V_{cd} = \tau_1 \times b_w \times d = 0.75 \times 0.15 \times 0.506 = 56.925 \text{ kN, sendo } \tau_1 \text{ o valor da tensão de acordo com a classe de resistência do betão;}$$

V_{wd} – Representa a parte do esforço transversal que é resistido pela armadura transversal.

$$V_{wd} = V_{rd} - V_{cd} = 92.015 - 56.925 = 35.09 \text{ kN}$$

Tendo em consideração a treliça de Morsch idealizada verifica-se que a componente do esforço transversal que é transmitida às barras verticais é de 35.09 kN. Esta força distribui-se por dois laminados de CFRP $V_{wd(f)}$ e dois ramos de estribo de aço. Assim, a tensão instalada nos estribos e nos laminados de CFRP contabilizada da seguinte forma:

$$V_{wd(f)} = a \times \frac{A_{s(f)}}{S_f} \times \sigma_f \Leftrightarrow \frac{35.09}{2} = 0.3 \times \frac{2 \times 0.0014 \times 0.02}{0.3} \times \sigma_f \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \sigma_f = 313.3 \text{ MPa}$$

$$V_{wd(s)} = a \times \frac{A_{sw}}{S_w} \times \sigma_s \Leftrightarrow \frac{35.09}{2} = 0.3 \times \frac{2 \times 2.83 \times 10^{-5}}{0.3} \times \sigma_s \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \sigma_s = 309.98 \text{ MPa}$$

Pela lei de Hooke:

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{313.3}{169.49 \times 10^3} = 0.00185 = 1.85\text{‰}$$

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{309.98}{212.53 \times 10^3} = 0.00146 = 1.46\text{‰}$$

Deste modo, e assumindo como razoável a estimativa realizada, conclui-se que os laminados de reforço ao corte apenas foram ativados em 12.5% da sua capacidade total. As extensões estimadas neste capítulo serão verificadas no capítulo seguinte, que se dedica à análise mais detalhada dos mecanismos de interação dos sistemas de reforço e da evolução das extensões instaladas nos materiais durante os ensaios das vigas T.

3.6. CONCLUSÕES

A investigação experimental realizada teve como objetivo avaliar a exequibilidade e a eficiência da técnica NSM com laminados de CFRP quando aplicada no reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado. As principais conclusões obtidas neste capítulo foram:

- A aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado revelou-se de fácil e rápida execução. No entanto é importante existir um rigoroso controlo de qualidade dos procedimentos necessários à sua aplicação.

- A aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado em serviço, proporcionou à viga reforçada consideráveis acréscimos de capacidade de carga.
- Tendo por base a viga de referência sem reforço com laminados de CFRP, a solução de reforço testada proporcionou um acréscimo de carga de cedência das armaduras de 19.4% e um acréscimo de carga máxima de 56.7%.
- As curvas de comportamento força *versus* flecha na secção de aplicação da carga obtidas no ensaio de rotura das vigas permitiram concluir que o sistema de reforço utilizado proporcionou um aumento de rigidez da viga reforçada. A flecha no ponto de aplicação da carga quando atingida a carga máxima foi de 121.95 mm para a viga de referência e de 63.39 mm para a viga reforçada.
- O modo de rotura da viga reforçada foi o destacamento dos laminados de CFRP de reforço à flexão.

Capítulo 4

Mobilização dos mecanismos de reforço e comportamento estrutural

A compreensão dos mecanismos que conduzem à mobilização das componentes do sistema de reforço à flexão e ao corte utilizando CFRP durante o carregamento são fundamentais para a avaliação do seu desempenho. Adicionalmente, a identificação e análise das características que indiciam o início da rotura e a consequente perda de eficiência do sistema de reforço tornam-se essenciais para a avaliação da sua eficácia e para a identificação de possíveis pontos de fragilidade do sistema que mereçam atenção, no sentido de o otimizar. No contexto desta investigação, torna-se ainda mais importante a análise destes mecanismos e dos efeitos que resultam de um reforço simultâneo à flexão e ao corte em vigas quando aplicado em serviço.

No capítulo anterior foi possível caracterizar as propriedades mecânicas de todos os componentes do sistema de reforço e da viga de betão armado com secção em T a reforçar. Todos estes elementos possibilitaram uma análise global de resultados que conduziu a uma estimativa geral da eficiência do sistema de reforço implementado, atendendo à quantidade de material de reforço utilizado e ao acréscimo de capacidade de carga alcançado. Foi também possível indentificar quais os componentes do sistema de reforço que foram mais solicitados e identificar o ponto de fragilidade do sistema que conduziu à rotura da viga antes que fosse totalmente esgotada a capacidade resistente dos laminados de carbono utilizados no reforço. Recorrendo a conceitos estruturais simples, foi ainda possível estimar o grau de eficiência com que o sistema de reforço com laminados de CFRP foi mobilizado.

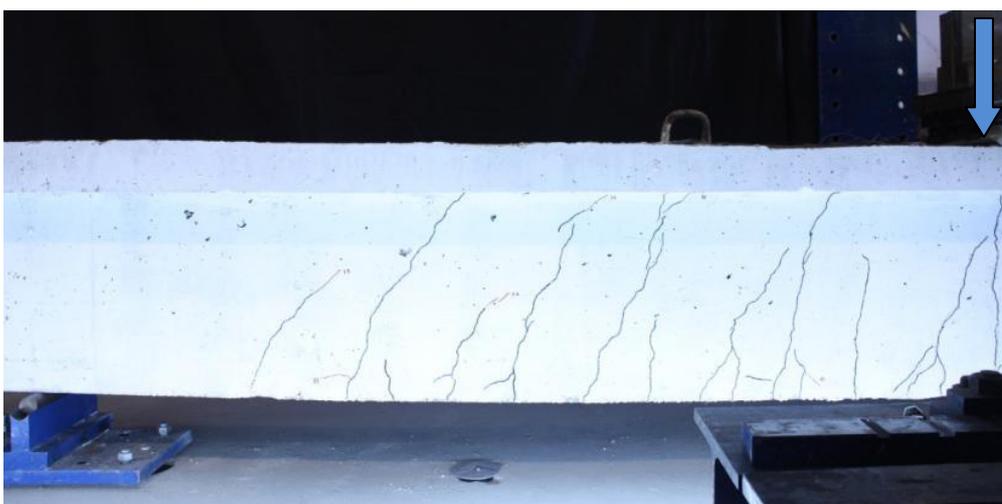
Após uma análise global de todos os parâmetros intervenientes e do desempenho geral do sistema de reforço, neste capítulo pretende-se adotar uma abordagem mais detalhada e profunda ao desempenho do sistema atendendo ao estado de tensão/deformação dos vários componentes durante o ensaio de rotura. Deste modo proceder-se-á à análise dos dados recolhidos durante a realização dos ensaios por intermedio de extensómetros elétricos e por sequências fotográficas, por forma a detalhar a sucessão de mecanismos estabelecidos durante

a realização dos ensaios que originaram os resultados apresentados e discutidos no capítulo anterior.

4.1. INICIAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE FENDAS DURANTE O ENSAIO DE ROTURA

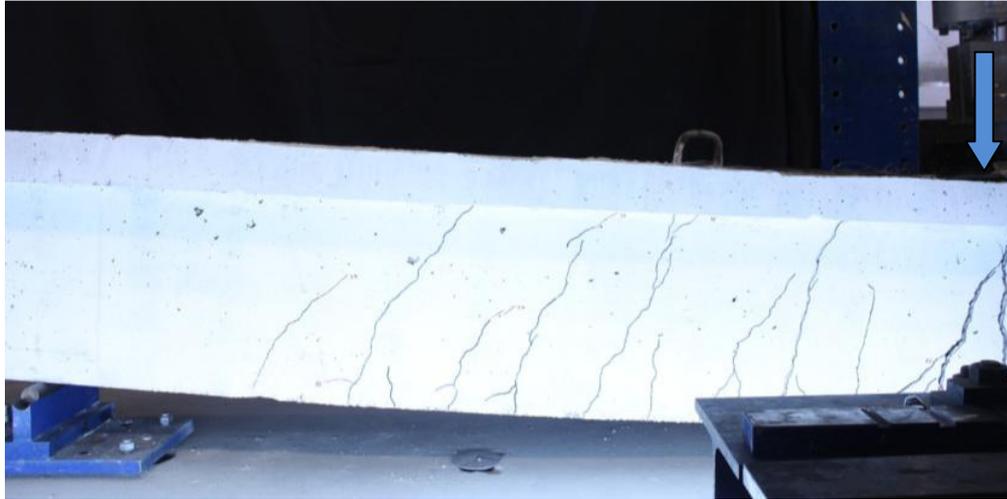
4.1.1. Viga_1 (não reforçada)

Na Figura 4.1 apresenta-se a face lateral da Viga_1 na zona correspondente ao menor vão de corte em algumas das fases do ensaio de rotura. Durante o ensaio de rotura da Viga_1 não se identificou a formação de novas fendas para além das que se tinham formado previamente durante o ensaio de pré-fendilhação. Isto deve-se ao facto de a Viga_1 ter sido sujeita a um valor de carga que se aproximou bastante do necessário para se atingir o início da cedência das armaduras. Assim, durante o ensaio de rotura verificou-se apenas a reabertura das fendas formadas durante o ensaio de pré-fendilhação. Notou-se também que a subsequente abertura das fendas previamente formadas foi mais evidente ao nível da secção de carregamento, podendo-se considerar que esta maior concentração de deformações e rotação da secção na zona de carregamento configurou a formação de uma rótula plástica. A Viga_1 apresentou um modo de rotura por flexão, tendo a elevada de deformação da viga, após a plastificação das armaduras longitudinais, conduzido ao esmagamento do betão na zona de aplicação da carga.



a) Com um carregamento de 82 kN.

Figura 4.1 - Comportamento da Viga_1 até à rotura (cont).



b) Com um carregamento de 93 kN (Carga máxima).



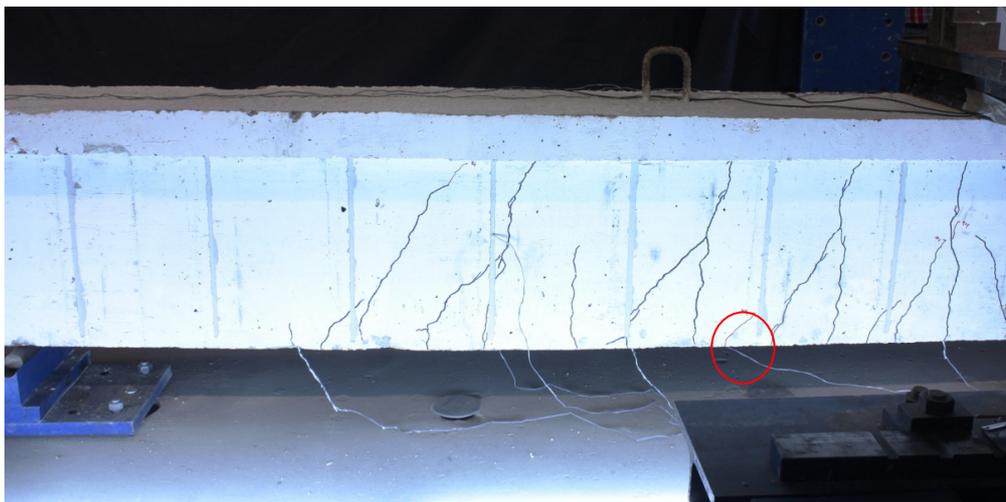
c) Modo de rotura.

Figura 4.1 (cont.) - Comportamento da Viga_1 até à rotura.

4.1.2. Viga_2 (reforçada com laminados de CFRP)

Na Figura 4.2 apresenta-se uma sequência de imagens da face lateral da Viga_2 durante o ensaio de rotura. As imagens desta sequência apresentam a evolução do padrão de fendilhação observado para vários níveis de carga até se ter atingido a rotura. Analisando esta sequência de imagens verifica-se que surgem novas fendas após a cedência das armaduras, estando estas novas fendas marcadas a vermelho. A primeira fenda a surgir pode ser classificada como uma fenda de corte, dada a sua inclinação, e surgiu para uma carga de 101 kN. A primeira fenda vertical (de flexão) surgiu na zona de aplicação da carga para uma solicitação de 107 kN. Seguidamente verificou-se o aparecimento de duas fendas de corte, de significativa dimensão, e várias fendas inclinadas com pequeno comprimento nas proximidades da secção a meio do

vão de corte. As fendas de flexão que surgiram no decorrer do ensaio foram de pequena dimensão e ficaram restringidas às proximidades da secção de carregamento. Estes fenómenos verificaram-se até se atingir a carga máxima de 145.69 kN, tal como se pode observar na sequência de imagens apresentada na Figura 4.2. Mesmo após se ter atingido a carga máxima, continuou a observar-se a abertura adicional das fendas existentes. A determinada altura observou-se a formação de várias fendas, algumas paralelas ao eixo da viga, na zona do betão de recobrimento da face tracionada, fazendo prever o modo de rotura observado. Após a rotura foi possível constatar que esta foi causada pelo destacamento dos laminados de CFRP utilizados para o reforço à flexão (Figura 4.2). Deste modo, verifica-se que o último conjunto de pequenas fendas inclinadas que se formaram na camada do betão de recobrimento na face inferior da viga resultou de uma insuficiente capacidade resistente do betão para absorver as tensões normais instaladas nos laminados de CFRP longitudinais.

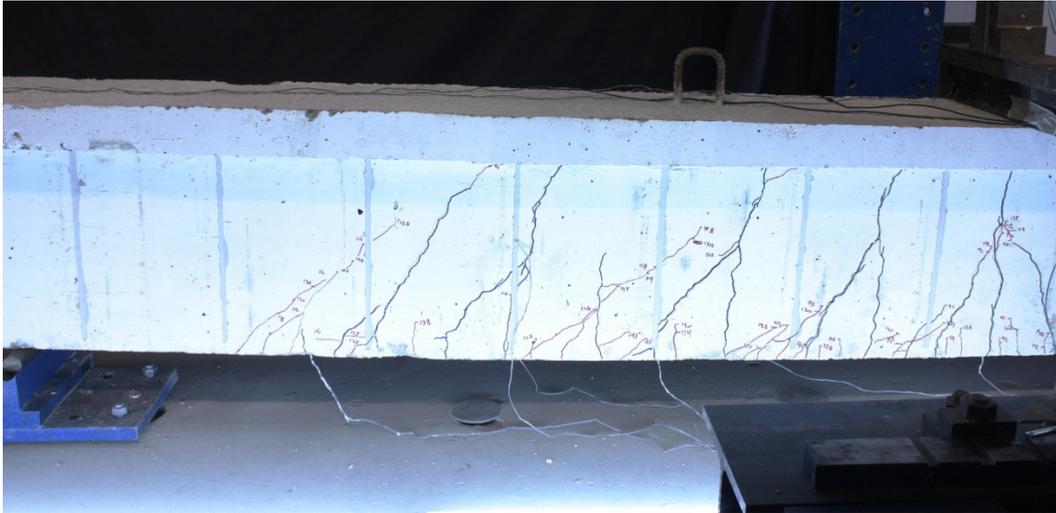


a) Com um carregamento de 101 kN. Aparecimento da primeira fenda de corte.

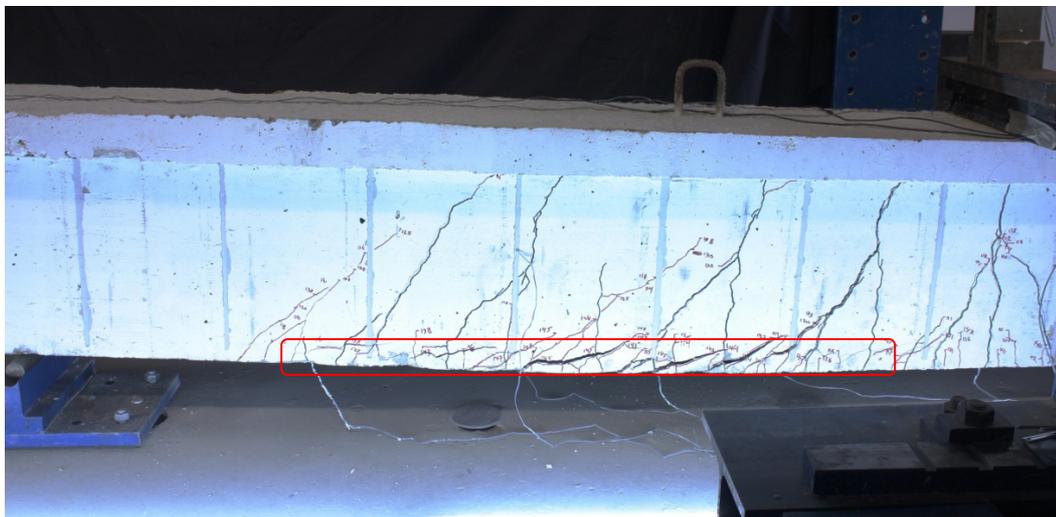


b) Com um carregamento de 107 kN. Aparecimento da primeira fenda de flexão.

Figura 4.2 - Comportamento da Viga_2 até à rotura (cont.).



c) Com um carregamento de 145,69 kN (Carga máxima).



d) Instantes antes da rotura. Zona com fendas paralelas aos laminados de CFRP longitudinais que antevêm a rotura por destacamento dos laminados.



e) Modo de rotura.

Figura 4.2 (cont.) - Comportamento da Viga_2 até à rotura.

Na Figura 4.3 apresenta-se o padrão de fendilhação obtido na Viga_1 (inferior), não reforçada, e na Viga_2 (superior), reforçada com laminados de CFRP, após a conclusão do ensaio de rotura. Nesta figura pode-se observar e comparar o aspeto final do conjunto de fendas formadas durante o ensaio de pré-fendilhação (desenhadas a cor preta) e as fendas que surgiram durante o ensaio de rotura (desenhadas a cor vermelha) para ambos os casos.



Figura 4.3 - Padrão de fendilhação final.

Observando a Figura 4.3 verifica-se que o padrão de fendilhação e o tipo de fendas formadas é, em geral, bastante semelhante nas duas vigas, com exceção das fendas de corte formadas ao nível do betão de recobrimento inferior na Viga_2 que conduziram ao destacamento dos laminados de CFRP longitudinais e consequente rotura. No entanto, no caso da Viga_2 o número de fendas formadas durante o ensaio de rotura é substancialmente superior, resultado do aumento da capacidade resistente. Verifica-se também que, no caso da Viga_2, o dano revelado pela fendilhação à superfície se distribui de modo mais uniforme que no caso da Viga_1, sendo que neste último caso é mais clara a formação aparente de uma rótula plástica ao nível da secção de carregamento. Deste modo, o dano ao nível do betão e do aço é mais abrangente no caso da Viga_2, estando mais confinado à região da secção de carregamento no caso da Viga_1.

4.2. ESTADO DE DEFORMAÇÃO E NÍVEL DE MOBILIZAÇÃO DO REFORÇO DURANTE O ENSAIO DE PRÉ-FENDILHAÇÃO E DURANTE O ENSAIO À ROTURA

Com o objetivo de avaliar o estado de deformação e o grau de mobilização dos vários tipos de reforço utilizados foram instalados extensômetros (Figura 4.4) nos varões de aço e nos laminados de CFRP em determinadas zonas críticas, ou seja (zonas em que se previa que ocorresse a maior solicitação das armaduras e dos laminados de CFRP).



a) Extensômetros colados num estribo.



b) Extensômetros colados nos varões longitudinais.



c) Tipo de extensómetro usado.



d) Extensómetro colado num laminado.

Figura 4.4 - Instalação dos extensómetros no aço e nos laminados de CFRP.

Nos elementos de reforço destinados a resistir a esforço de flexão os extensómetros foram instalados na zona de aplicação da carga, enquanto que nos elementos destinados a resistir a esforço de corte os extensómetros foram instalados aproximadamente a meio do menor vão de corte das vigas.

Para a monitorização das extensões dos varões de aço, foram instalados três extensómetros (e_{s1} , e_{s2} e e_{s3}) num estribo especificamente selecionado, aproximadamente a meio do menor vão de corte das vigas, e dois extensómetros (e_{s4} e e_{s5}) na armadura longitudinal na secção de aplicação da carga (um extensómetro em cada varão), ver Figura 4.5a e Figura 4.6a. No estribo, os três extensómetros foram instalados de forma intercalada nos dois ramos de acordo

4.2.1. Pré-fendilhação das vigas

Na Figura 4.7 apresenta-se a relação força *versus* extensão nas armaduras longitudinais registada durante o ensaio de pré-fendilhação da Viga_1 e da Viga_2. Em geral o comportamento observado é semelhante, sendo clara a elevada rigidez inicial em fase não fendilhada, o início da fendilhação para uma carga de 11.17 kN no caso da Viga_1 e 11.98 kN para a Viga_2, e posterior abertura de fendas que causa o incremento da extensão na armadura longitudinal para uma carga aproximadamente constante. Os valores das extensões na armadura longitudinal sofreram, neste momento, um aumento rápido com a abertura das primeiras fendas. Posteriormente o processo de fendilhação estabiliza, verificando-se um aumento da carga proporcional ao aumento da extensão na armadura longitudinal, constatando-se que a rigidez na fase fendilhada se mantém aproximadamente constante. No momento em que o ensaio é dado por terminado, ao se atingir a flecha de $L/350$, verifica-se que as armaduras longitudinais ficaram perto do seu limite de cedência, garantindo o objetivo que foi definido para este ensaio. Por último, notou-se uma ligeira diferença no valor registado da extensão na armadura da esquerda e a da direita no caso da Viga_2, que poderá ser consequência de uma deformação ligeiramente assimétrica da viga, com deflexão acompanhada de torção. Provavelmente este efeito será consequência de um pequeno defeito na betonagem da viga e no desalinhamento ligeiro do seu eixo longitudinal.

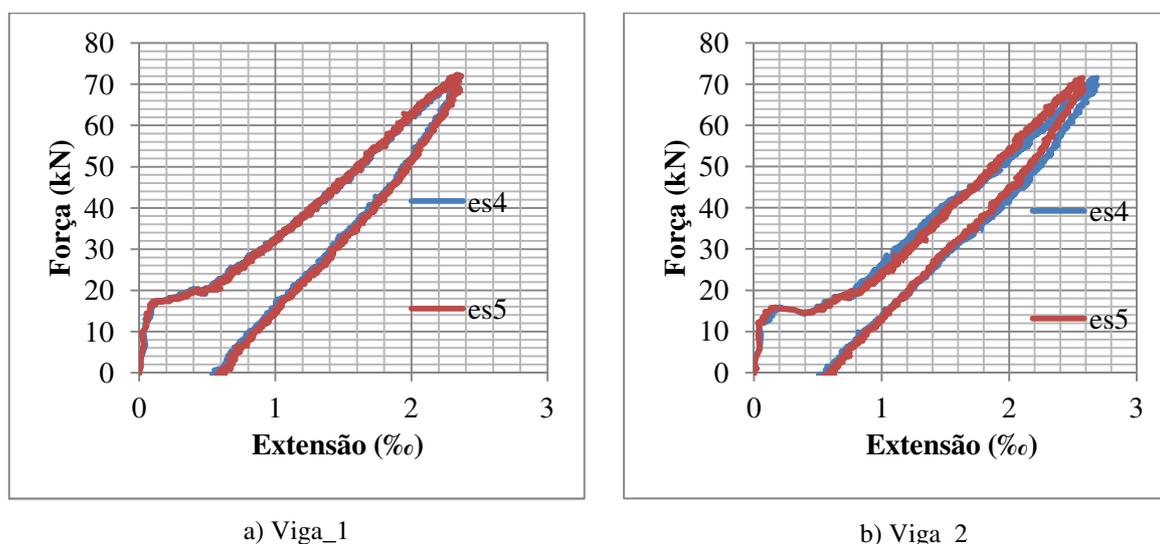
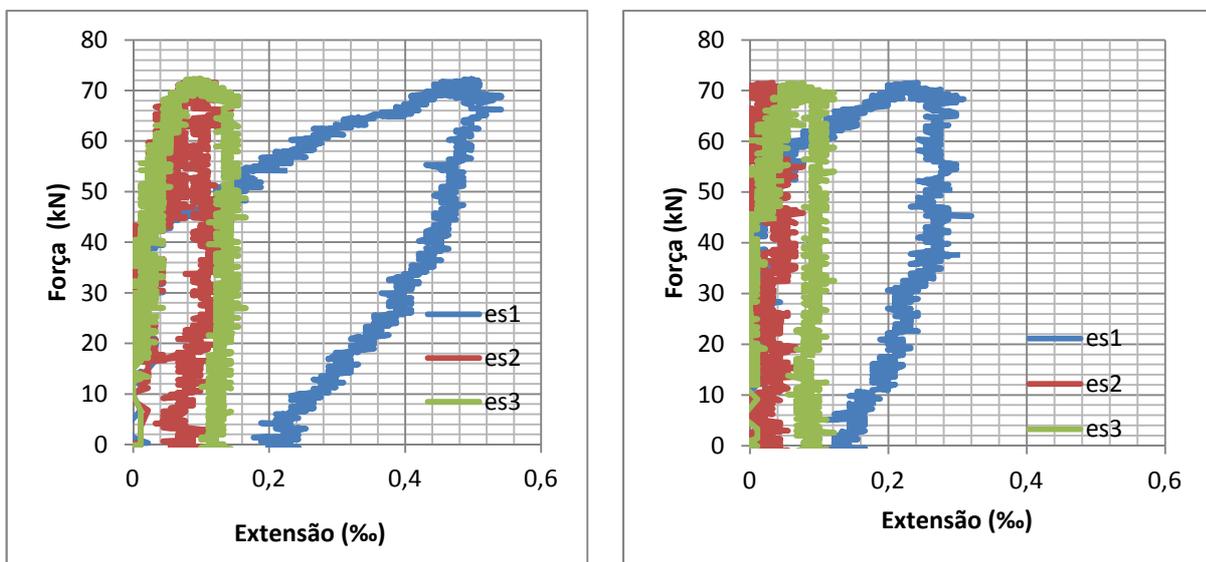


Figura 4.7 - Extensões nas armaduras longitudinais (ensaio de pré-fendilhação).

Na Figura 4.8 apresentam-se as relações força *versus* extensão registadas nos estribos da Viga_1 e da Viga_2. No caso dos estribos verificou-se, em geral, que a deformação registada

nos extensómetros foi baixa, o que está de acordo com o esperado visto que a mobilização dos estribos, assim como a rotura por corte, são mecanismos que surgem numa fase avançada de um ensaio típico de rotura de uma viga de betão armado. Adicionalmente, verifica-se que a extensão registada foi mais acentuada na região superior dos estribos, já que o extensómetro que registou maior deformação foi o es1. Isto deve-se, no caso da Viga_1, à formação de uma fenda de corte que intersecta os estribos na zona superior do estribo, ou seja, junto ao extensómetro es1 (Figura 4.9). No caso da Viga_2, a extensão medida no extensómetro superior é também maior que as restantes extensões, mas neste caso a diferença não é tão acentuada como na Viga_1. Observa-se que, no caso da Viga_2, existe também uma fenda de corte que se aproxima bastante da zona superior do estribo, o que poderá justificar a extensão ligeiramente maior registada na zona superior do estribo (Figura 4.10).



a) Viga_1

b) Viga_2

Figura 4.8 - Extensões nos estribos (Ensaio de pré-fendilhação).

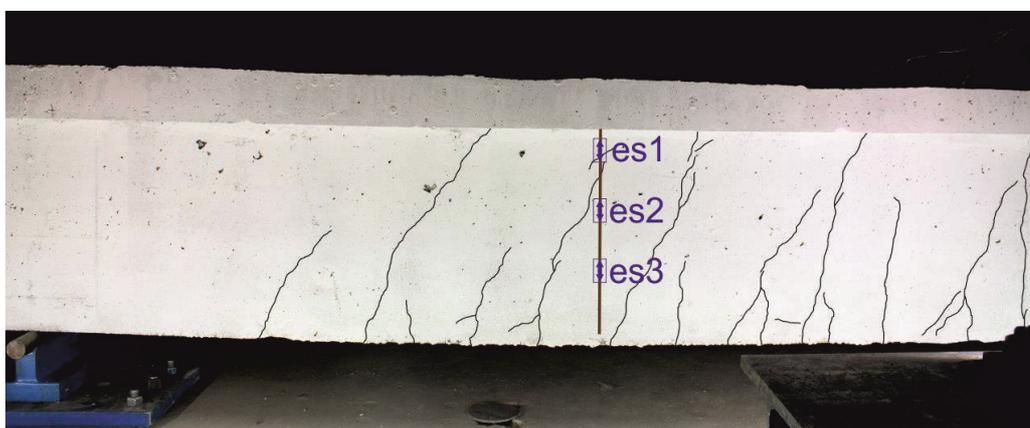


Figura 4.9 - Posicionamento do extensómetros na Viga_1 (pré-fendilhação).

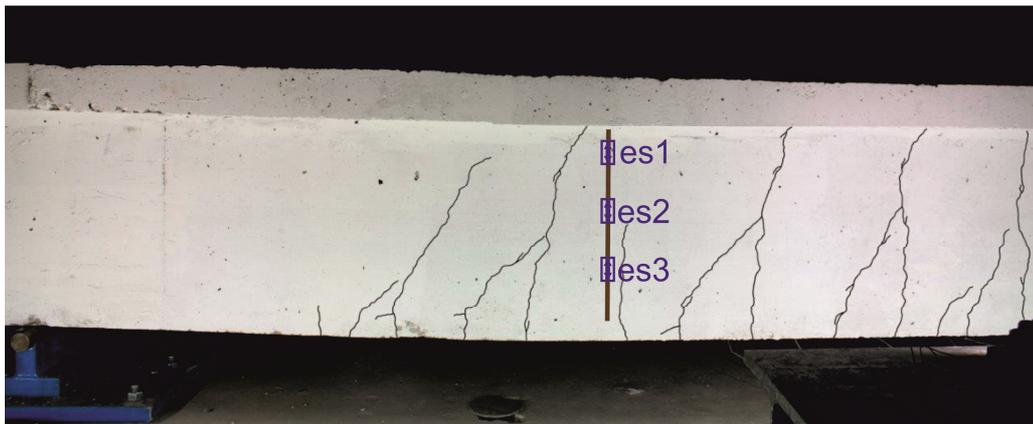


Figura 4.10 - Posicionamento dos extensómetros na Viga_2 (pré-fendilhação).

4.2.2. Ensaio de rotura das vigas

Nesta secção é feita uma análise em termos da variação das extensões das armaduras e dos laminados de CFRP da Viga_1 e da Viga_2 durante o ensaio de rotura. Para ajudar na interpretação dos resultados, apresenta-se simultaneamente a fase de pré-fendilhação que antecedeu o ensaio de rotura.

Viga_1:

Na Figura 4.11 apresenta-se o comportamento das armaduras longitudinais durante o ensaio de rotura da Viga_1. Nas armaduras longitudinais as extensões apresentam um comportamento expectável, aumentando significativamente após a plastificação das armaduras, comportamento verificado no extensómetro es4. Quando a armadura longitudinal entrou em cedência as extensões medidas pelo extensómetro es4 eram de 2.55‰ e de 2.4‰ no extensómetro es5. O extensómetro es5 apresenta valores semelhantes ao es4 até atingir o valor de extensão de 6.75‰. A partir desse ponto os valores adquiridos pelo es5 começam a diminuir o que indica que provavelmente a sua integridade foi comprometida por problemas com a sua aderência às armaduras no interior do betão. Verifica-se também que existe um ligeiro desfasamento entre o instante em que se atinge a cedência das armaduras e o instante em que a extensão nas armaduras longitudinais começa a aumentar significativamente. Provavelmente a cedência das armaduras longitudinais iniciou-se ao nível de uma secção transversal paralela à secção transversal onde foram instalados os extensómetros longitudinais. Deste modo, o aumento da flecha e gradual aumento da carga verificaram-se sem que se tenha registado o aumento imediato da extensão das armaduras longitudinais. À

medida que a zona de armadura em cedência se propaga longitudinalmente, num instante posterior passa a registar-se também o aumento da extensão das armaduras longitudinais ao nível da secção na qual foram instalados os extensómetros.

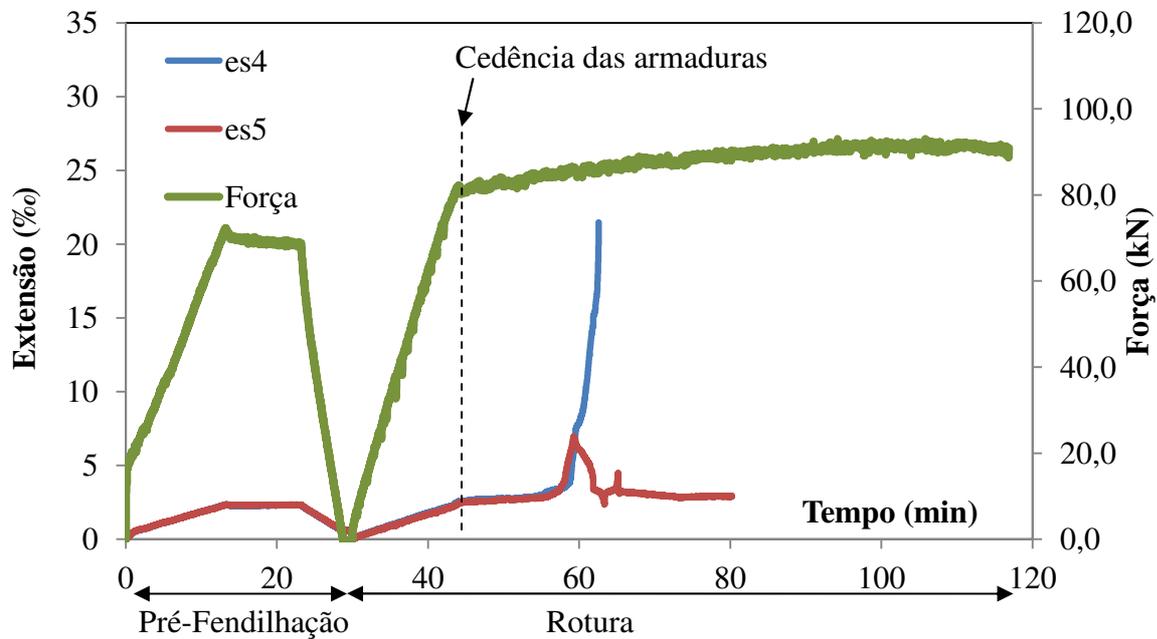


Figura 4. 11 - Extensões nas amaduras longitudinais da Viga_1 (Extensómetros es4 e es5).

Na Figura 4.12 apresenta-se o comportamento dos estribos durante o ensaio de rotura da Viga_1. Verifica-se que os estribos foram mais solicitados no topo, de acordo com o registo do extensómetro es1, seguido da parte inferior dos estribos, de acordo com o registo do extensómetro es3. A zona menos solicitada dos estribos terá sido a zona central, observando o registo do extensómetro es2. O facto de o estribo ser mais solicitado no topo justifica-se pelo facto de uma fenda de corte aparentemente interseccionar o estribo na zona superior, tal como se pode observar na Figura 4.13.

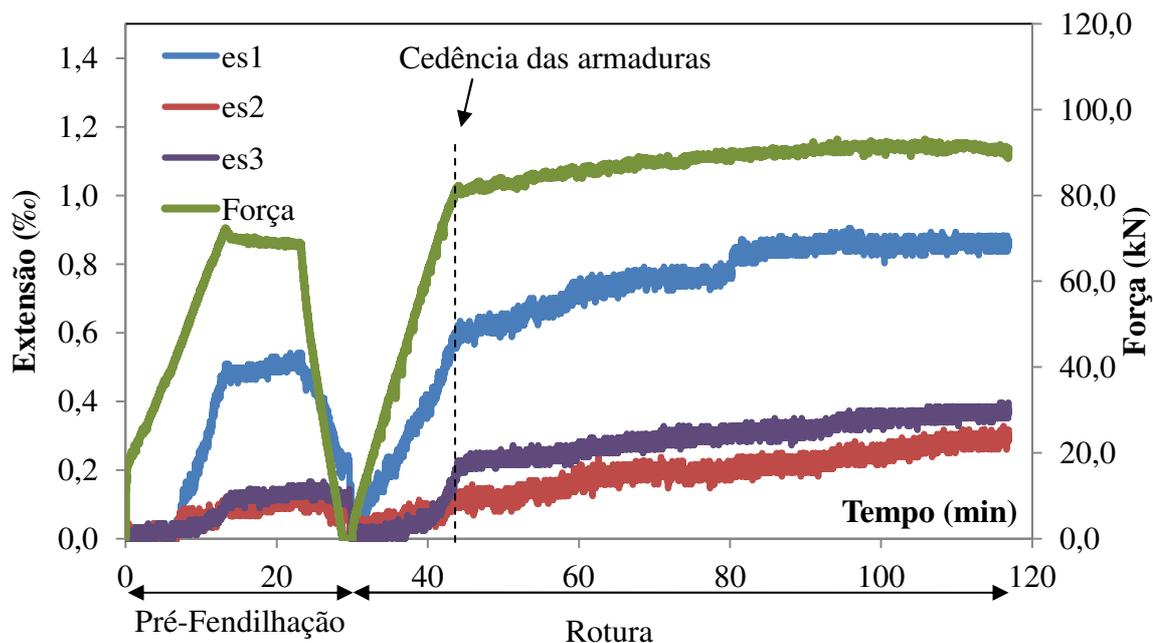


Figura 4.12 - Extensões nas armaduras transversais da Viga_1 (extensômetros es1, es2 e es3).

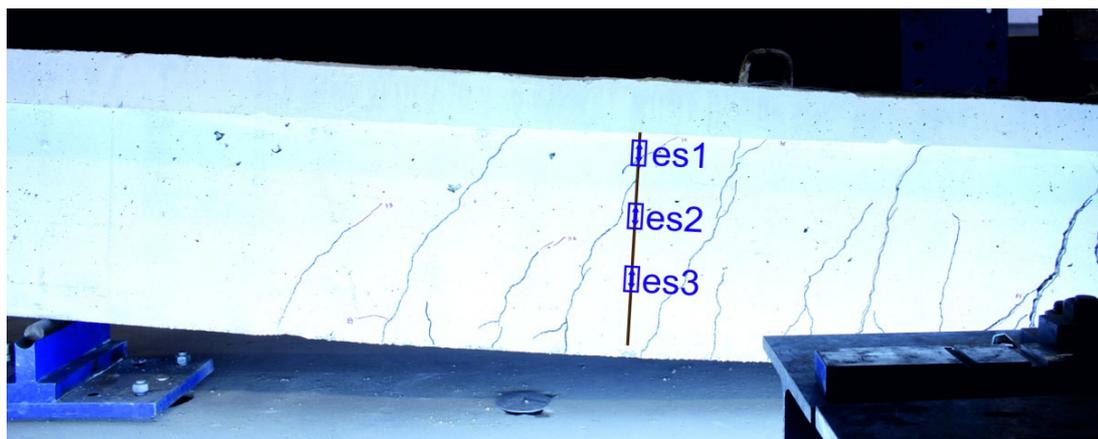


Figura 4.13 - Posicionamento dos extensômetros na Viga_1 (rotura).

Viga_2:

Na Figura 4.14 apresenta-se a evolução das extensões nas armaduras longitudinais durante o ensaio de rotura da Viga_2. Comparando as extensões nas armaduras longitudinais da Viga_1 com as da Viga_2, Figuras 4.11 e 4.14, verifica-se que os valores registados na Viga_2 foram inferiores aos da Viga_1, provavelmente porque a partir do instante em que se atinge a cedência do aço o incremento de tensões normais foi transmitido sobretudo aos laminados de CFRP instalados para reforço à flexão. Quando a armadura longitudinal entrou em cedência as extensões medidas pelo extensómetro es4 eram de 2.13‰ e de 1.94‰ no extensómetro es5. Adicionalmente, tal como se verificou anteriormente as deflexões obtidas na Viga_2 para

níveis de carregamento semelhantes são substancialmente inferiores às obtidas na Viga_1, o que naturalmente conduz a deformações na armadura longitudinal inferiores. A extensão máxima na armadura longitudinal atingida na Viga_2 foi de 6.48%, enquanto na Viga_1 foi de 21.47%. Verifica-se ainda que o desfasamento entre o instante correspondente à cedência das armaduras longitudinais e o incremento da extensão nas armaduras longitudinais não é evidente, contrariamente ao que se verificou para a Viga_1. De destacar o facto de o extensómetro es5 apresentar valores negativos de extensão a partir dos 60 minutos de tempo de ensaio, que por não ser explicável em termos estruturais poderá resultar da danificação do extensómetro no interior do betão.

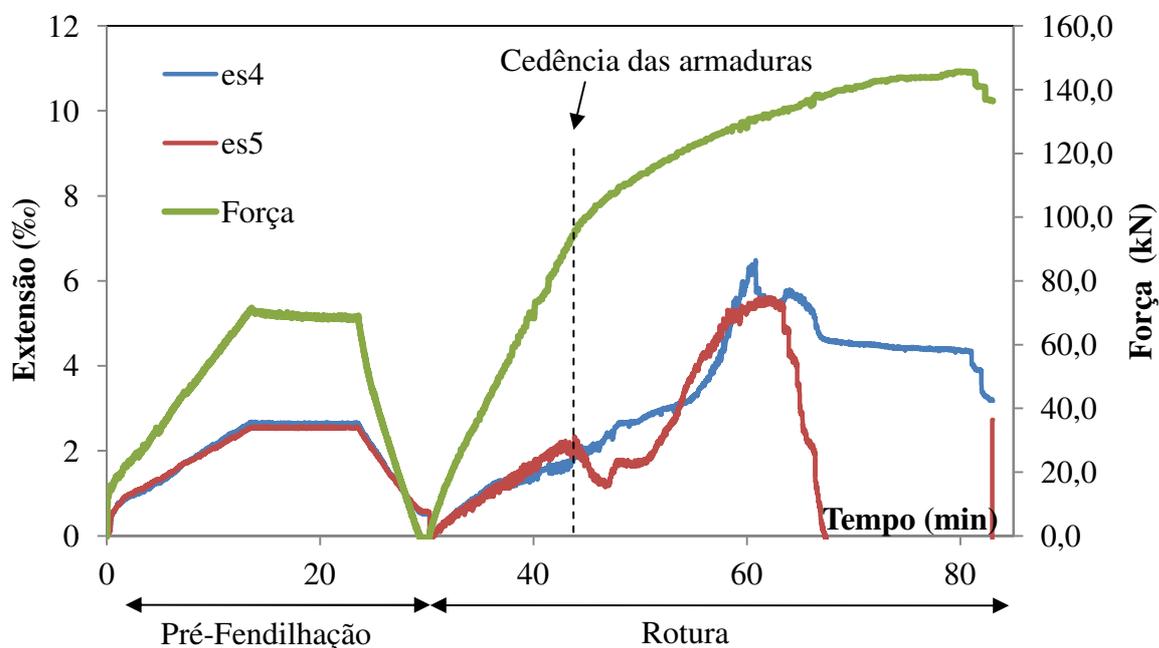


Figura 4.14 - Extensões nas amaduras longitudinais da Viga_2 (Extensómetros es4 e es5).

Na Figura 4.15 apresenta-se a evolução da extensão registada nos laminados de CFRP de reforço à flexão durante o ensaio de rotura da Viga_2. Analisando os valores das extensões dos laminados de CFRP, instalados longitudinalmente ao longo da zona tracionada da Viga_2, observa-se que as extensões aumentam significativamente após a cedência das armaduras, comprovando a observação anterior que distinguia uma transição do incremento de tensão normal, das armaduras de aço longitudinais para o reforço de CFRP, após a cedência das armaduras. É notório que após se atingir a extensão de cedência nas armaduras longitudinais os laminados de CFRP começam a ser mais solicitados, ver Figuras 4.14 e 4.15. Adicionalmente, verifica-se que existe um desfasamento entre os instantes para os quais

começa a ser mais evidente o incremento de extensão em cada um dos extensómetros instalados no laminado de CFRP longitudinal. O acentuado incremento de extensão no laminado, após a cedência das armaduras longitudinais, ocorre inicialmente no ec4, depois no ec5 e finalmente no ec6. Isto demonstra que o laminado longitudinal é inicialmente mobilizado efetivamente na zona da secção de carregamento, e que a subsequente mobilização do laminado se vai extendendo em direção aos apoios com o aumento da carga e da deflexão, tal como demonstrado pelo registo das extensões nos extensómetros colocados ao longo do laminado longitudinal ec4, ec5 e ec6.

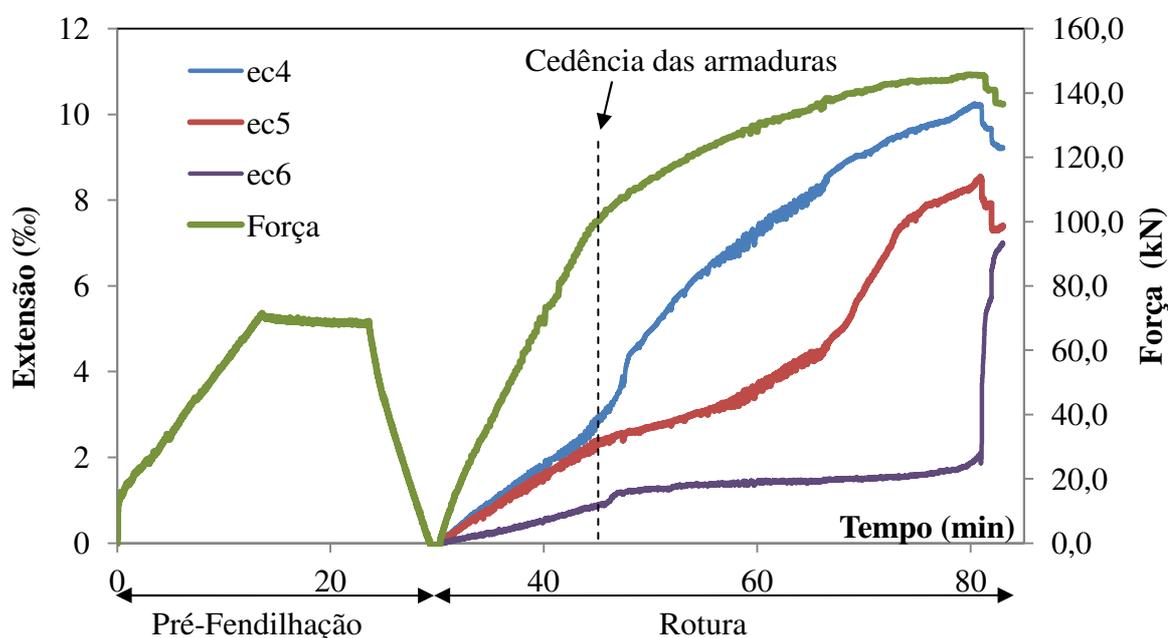


Figura 4.15 - Extensões nos laminados de CFRP de reforço à flexão da Viga_2 (extensómetros ec4, ec5 e ec6).

Passando agora para a análise dos resultados obtidos para todos os elementos de reforço transversais presentes na Viga_2, na Figura 4.16 apresenta-se a evolução da extensão registada nos estribos de aço durante o ensaio de rotura da Viga_2. Em geral, verifica-se que as extensões registadas nos estribos de aço da Viga_2 são maiores que os observados na Viga_1, o que em grande medida pode ser justificado pelo facto de o esforço de corte ter atingido valores significativamente mais elevados no caso da Viga_2. O valor máximo da extensão nos estribos da Viga_2 foi de 1,74‰, para um máximo de 0,91‰ registado na Viga_1. Contrariamente ao ocorrido no ensaio de pré-fendilhação, a parte inferior do estribo passou a ser a mais solicitada (Figura 4.16), onde se encontra instalado o extensómetro es3.

Aparentemente isto resulta do surgimento de uma fenda de corte após a cedência das armaduras longitudinais na zona onde se encontra instalado o extensómetro es3. Esta fenda pode ser observada na Figura 4.18, desenhada na viga a cor vermelha. Provavelmente o aumento da capacidade de carga da viga reforçada conduziu a uma alteração do mecanismo de resistência da viga, que terá resultado numa transição da zona mais solicitada do estribo da parte superior para a inferior. O padrão de fendilhação apresentado na Figura 4.18 parece indicar isto mesmo, notando-se que ocorre um aumento gradual da relevância das fendas inclinadas que se localizam na parte inferior da Viga_2.

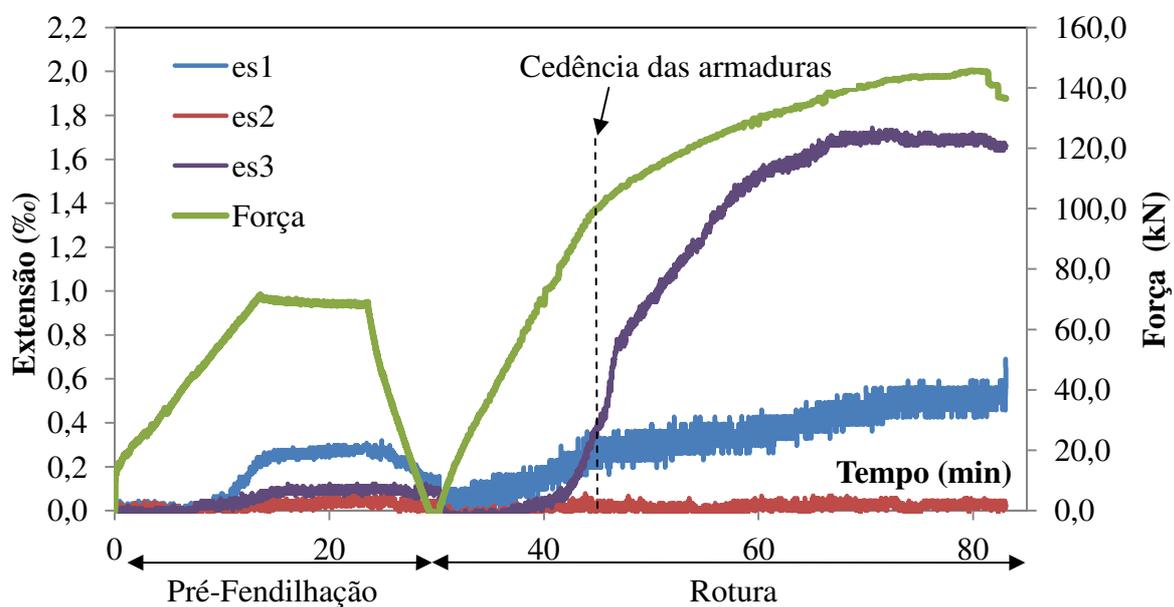


Figura 4.16 - Extensões na armadura transversal da Viga_2 (extensómetros es1, es2 e es3).

Na Figura 4.17 apresenta-se a evolução da extensão registada nos laminados de CFRP de reforço ao corte durante o ensaio de rotura da Viga_2. Nos laminados de CFRP, instalados para reforço ao corte, o extensómetro mais solicitado foi o ec3, por se encontrar localizado sob uma fenda de corte formada aquando do ensaio de pré-fendilhação, ver Figura 4.18. Não foram adquiridas as extensões do extensómetro ec1 por este se ter danificado durante o ensaio. Ficou, deste modo, por verificar se a tendência que foi observada para os estribos de aço discutida anteriormente se repetiu no caso dos laminados transversais. De qualquer modo é importante destacar que, apesar de instalado em serviço, o laminado transversal monitorizado é efetivamente mobilizado e atinge níveis de extensão muito próximos dos que se observaram anteriormente para o estribo de aço.

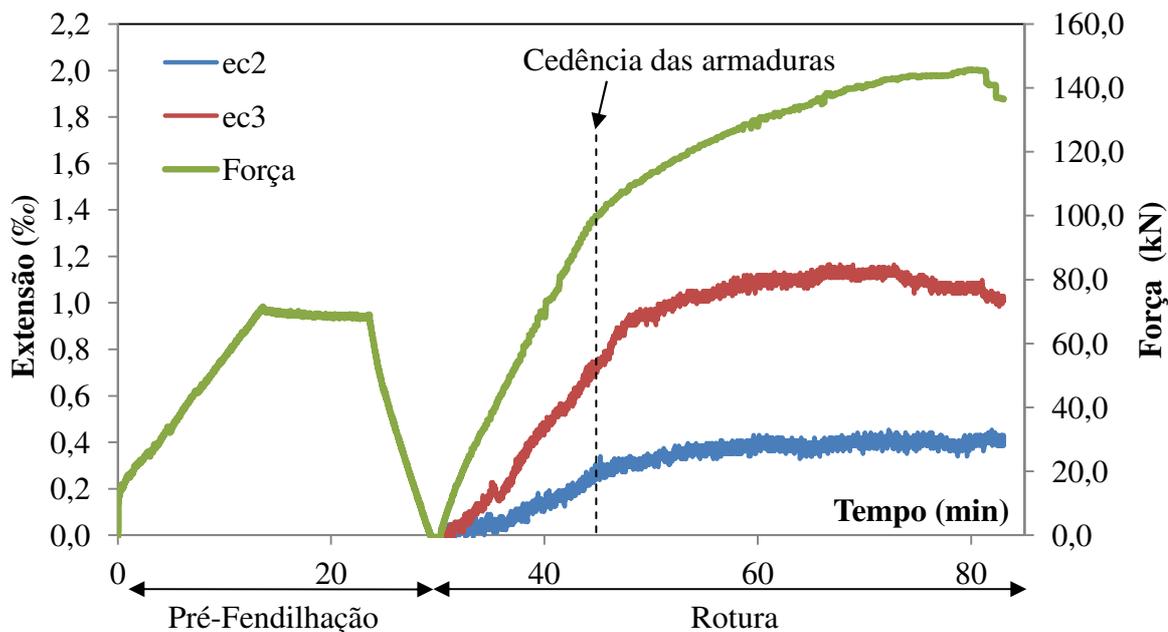


Figura 4.17 - Extensões nos laminados de CFRP de reforço ao corte (extensómetros ec2, ec3).

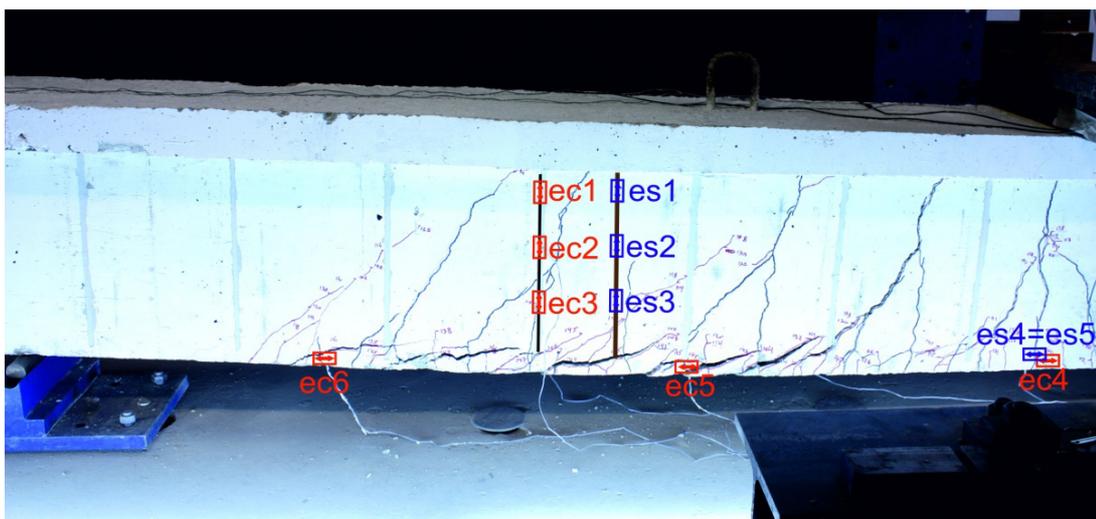


Figura 4.18 - Posicionamento dos extensómetros na Viga_2 (rotura).

4.2.3. Relação força versus extensão para os vários elementos de reforço durante o ensaio de rotura das vigas

Nesta secção serão analisados os resultados obtidos para as extensões, quer nas armaduras de aço como nos laminados de CFRP, em termos da relação força *versus* extensão por forma a retirar mais algumas ilações sobre o comportamento das duas vigas durante o ensaio à rotura.

Viga_1:

Nas Figuras 4.19 e 4.20 estão representadas as extensões registadas, respetivamente, nas armaduras longitudinais e nos estribos da Viga_1 durante o ensaio à rotura. Analisando-se a evolução da força relativamente às extensões registadas nas armaduras longitudinais (Figura 4.19) verifica-se que, até se ter atingido a cedência das armaduras para uma carga de 80.56 kN, a relação é aproximadamente linear. A partir desse instante as extensões aumentam bastante até à rotura da viga. Verifica-se também que a relação entre a extensão registada nas armaduras e a força é quase direta, reproduzindo-se quase exatamente os diagramas de comportamento das armaduras em tração que foram obtidos por intermédio dos ensaios de tração direta. Analisando-se a relação da força com as extensões registadas nos estribos de aço verifica-se que, à semelhança do que ocorreu no ensaio de pré-fendilhação, a existência de uma fenda de corte que intersecta o estribo instrumentado na zona do extensómetro es1 faz com que este apresente maiores valores de extensão. Adicionalmente, dado que a viga já tinha sido pré-fendilhada, até se atingir a carga máxima de pré-fendilhação a relação é linear devido à reabertura das fendas, e deste instante em diante a relação deixa de ser linear por ocorrer a propagação de fendas antigas. Nesta última fase o aumento de extensão é mais pronunciado no extensómetro es1.

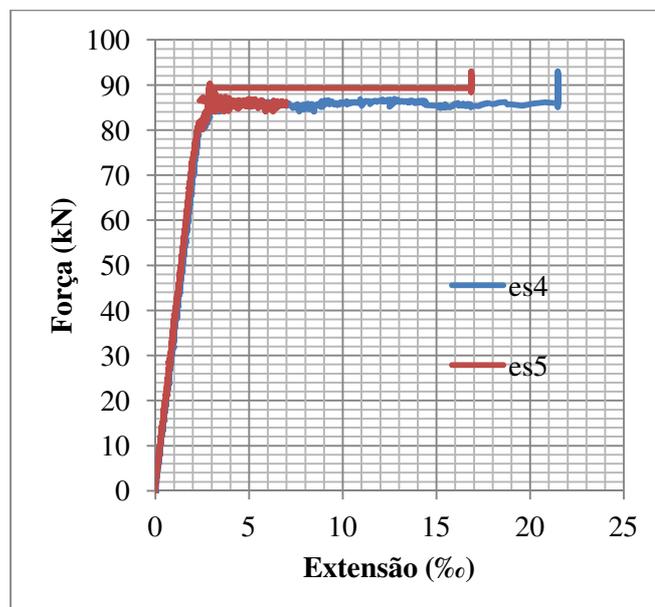


Figura 4.19 - Extensões longitudinais na Viga_1.

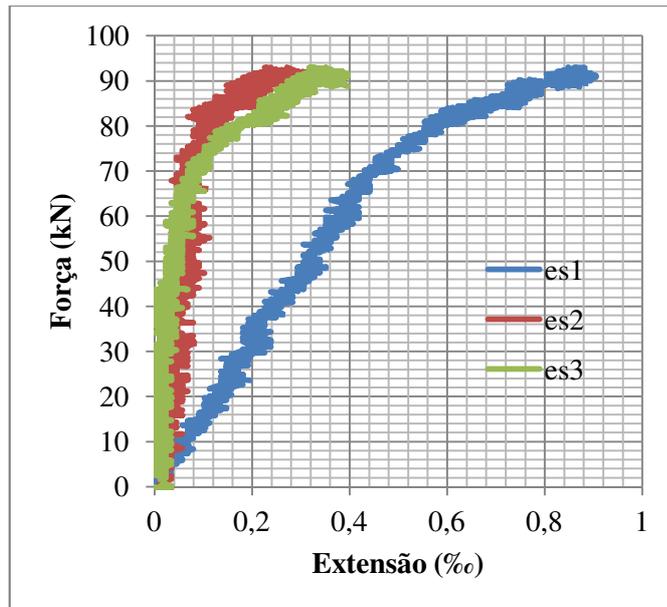


Figura 4.20 - Extensões transversais na Viga_1.

Viga_2:

Na Figura 4.21 representa-se a relação força *versus* extensão nas armaduras longitudinais e a relação força *versus* extensão no laminado longitudinal referentes ao ensaio à rotura da Viga_2. Observando a Figura 4.21a verifica-se que, após a cedência das armaduras para uma carga de 97.68 kN, verificou-se um ligeiro decréscimo na tendência de aumento das extensões gradual na armadura que se vinha a verificar até então. No extensómetro es4 ocorre mesmo uma diminuição da extensão, que coincide com o aumento da extensão nos laminados de CFRP. Provavelmente este dado reflete a eventual transmissão de tensões das armaduras longitudinais para os laminados de CFRP longitudinais após a cedência das armaduras, devido a uma alteração do mecanismo resistente da viga. Analisando a Figura 4.21b, referente às extensões registadas no laminado de CFRP longitudinal, verifica-se o aumento das extensões quando atingida a carga de cedência das armaduras (97.68 kN), principalmente na secção de carregamento onde se encontra o extensómetro ec4. Portanto o extensómetro mais solicitado foi o ec4 e à medida que se afasta da secção de carregamento as extensões sofreram um decréscimo tal como se observa pelos valores obtidos nos extensómetros ec5 e ec6.

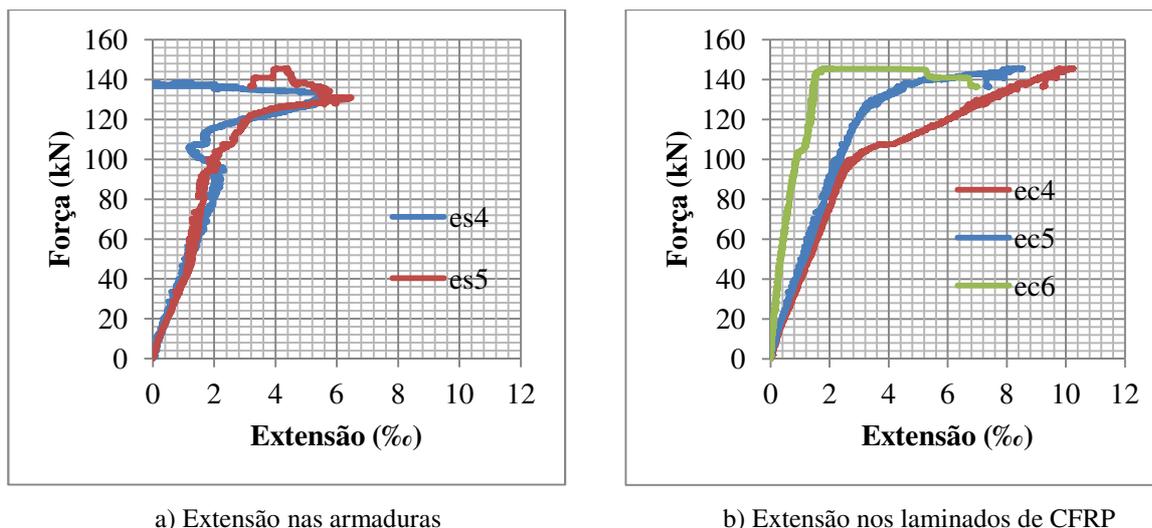


Figura 4.21 – Extensões longitudinais na Viga_2.

Na Figura 4.22 representa-se a relação força *versus* extensão no estribo instrumentado e a relação força *versus* extensão nos laminados instrumentados referentes ao ensaio à rotura da Viga_2. Observando a Figura 4.22 verifica-se, para além do que já foi referido na secção anterior, que o estribo de aço sofre um aumento de deformação muito considerável na sua parte inferior (es3), devido à formação de fendas inclinadas nas proximidades deste extensómetro. Após o aparecimento de uma fenda de corte, que intersecta a parte inferior do estribo verificou-se o aumento das extensões nessa zona do estribo registadas pelo extensómetro es3, tal como observado na Figura 4.22a. O aumento da extensão nos laminados de CFRP transversais é mais gradual e quase constante desde o início do ensaio de rotura até ao final, notando-se apenas que um pouco antes de se atingir a rotura ocorre uma diminuição da extensão nos laminados que acompanha a diminuição da carga (Figura 4.22b).

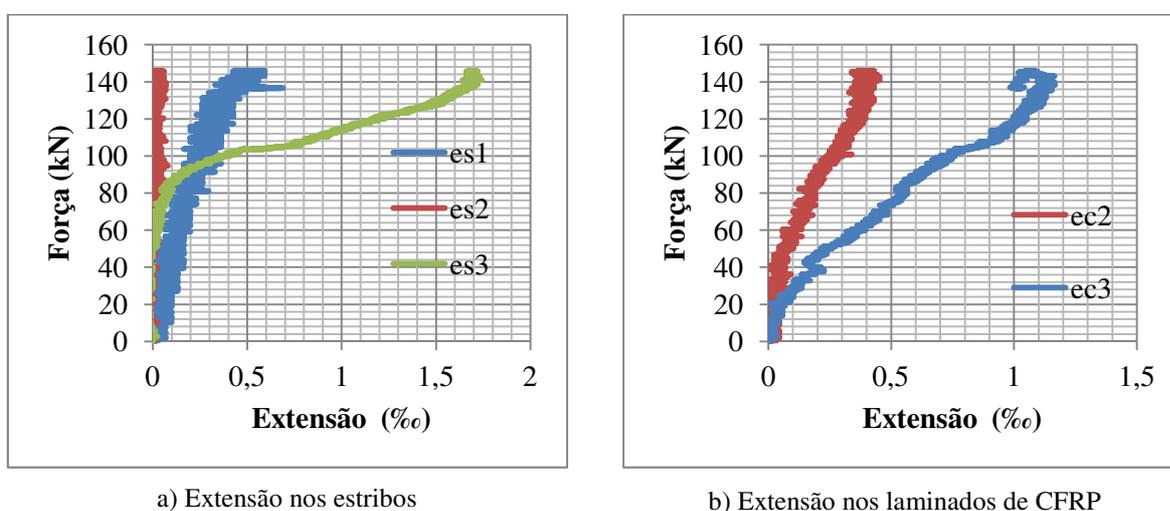


Figura 4.22 - Extensões transversais na Viga_2.

Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores das extensões máximas registadas nos extensómetros instalados nas armaduras de aço e nos laminados de CFRP durante o ensaio à rotura das vigas.

Tabela 4.1 - Extensões máximas registadas.

Viga	Extensómetro	Extensão (%)
Viga_1	es1	0,91
	es2	0,33
	es3	0,4
	es4	21,47
	es5	16,85
Viga_2	es1	0,69
	es2	0,79
	es3	1,74
	es4	6,48
	es5	5,61
	ec2	0,45
	ec3	1,17
	ec4	10,26
ec5	8,55	
	ec6	7,01

4.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O aumento de carga provocado pelo sistema de reforço de CFRP originou o surgimento de novas fendas no ensaio de rotura após a cedência das armaduras. O modo de rotura ocorrido, identificado como sendo o destacamento dos laminados de CFRP de reforço à flexão, tornou-se previsível com o aparecimento de várias fendas, algumas paralelas ao eixo da viga, na zona do betão de recobrimento na face tracionada.

Em termos de extensões verificadas nas armaduras e nos laminados de CFRP, verifica-se que as extensões estimadas no capítulo anterior para verificação do rendimento dos laminados de CFRP à flexão e ao corte, se aproximam dos valores obtidos pelos extensómetros. Na Tabela 4.2 indica-se os valores estimados no capítulo anterior e os valores medidos pelos extensómetros.

Tabela 4.2 - Comparação das extensões estimadas no Capítulo 3 com as extensões reais.

Localização	Estimativa das extensões no Capítulo 3 (‰)	Extensões medidas (‰)
Armadura longitudinal	10.66	6.48
Laminados de CFRP de reforço à flexão	12.65	10.26
Estribos	1.46	1.74
Laminados de CFRP de reforço ao corte	1.85	1.16

Analisando o valor máximo obtido para a extensão dos laminados de CFRP verifica-se que, devido à rotura prematura, não foi possível o aproveitamento total da capacidade máxima resistente dos laminados de CFRP. Assim, tal como se pode verificar na Tabela 4.3, atingiu-se um grau de mobilização dos laminados de CFRP de reforço à flexão de 68.93% e 7.9% para os laminados de CFRP de reforço ao corte.

Tabela 4.3 - Grau de mobilização do sistema de reforço de CFRP testado.

Viga	Reforço	ϵ_{max} (‰)	Grau de mobilização do CFRP (%)	Modo de rotura
Viga_2	Flexão	10.26	69.28	Destacamento do CFRP de reforço à flexão
	Corte	1.17	7.9	

4.4.CONCLUSÕES

Este capítulo tinha como objetivos compreender o comportamento estrutural das vigas testadas e a mobilização dos mecanismos de reforço da viga com CFRP durante o ensaio de rotura. Nesse sentido as principais conclusões são:

- O aumento da capacidade resistente da viga reforçada originou o surgimento de novas fendas após a plastificação das armaduras longitudinais e a transferência gradual das tensões de tração das armaduras para os laminados de CFRP.
- Na viga reforçada, instantes antes do destacamento dos laminados de CFRP de reforço à flexão, foi possível observar a formação de várias fendas, algumas paralelas ao eixo da viga, na zona do betão de recobrimento da face tracionada. Deste modo, parece ser

possível prever a rotura da viga nos casos em que o modo de rotura seja o verificado no presente estudo.

- Devido à rotura da viga reforçada ter sido provocada por esforços de flexão, os laminados de CFRP de reforço ao corte não foram significativamente solicitados, tendo sido mobilizados em cerca de 7.9% da sua capacidade máxima resistente.
- A extensão máxima registada nos extensómetros instalados nos laminados de CFRP de reforço à flexão foi de 10.26%. Tendo em consideração que no ensaio de caracterização dos laminados de CFRP, o valor médio da extensão de rotura obtido foi de 14.81% verificou-se um grau de mobilização dos laminados de CFRP de 69.28%.

Capítulo 5

Conclusões Gerais e Desenvolvimentos Futuros

No presente capítulo são apresentadas as principais conclusões do programa experimental realizado no âmbito desta dissertação e apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

O trabalho experimental realizado na presente dissertação teve como objetivos avaliar a exequibilidade e a eficiência do reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado pré-fendilhadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento (técnica NSM). O comportamento de uma viga com escala próxima da realidade, reforçada com laminados de CFRP em condições de serviço, foi comparado com o comportamento de uma viga semelhante não reforçada, tendo-se também procedido à caracterização de todos os materiais intervenientes para uma completa interpretação dos resultados. As principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho foram:

- A aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado revelou-se de fácil e rápida execução. No entanto é importante um rigoroso controlo de qualidade e o rigor dos procedimentos necessários à sua aplicação.
- A aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado em serviço, proporcionou à viga reforçada consideráveis acréscimos de capacidade de carga.
- Tendo por base a viga de referência sem reforço com laminados de CFRP, a solução de reforço testada proporcionou um acréscimo de carga de cedência das armaduras de 19.4% e um acréscimo de carga máxima de 56.7%.
- As curvas de comportamento força *versus* flecha na secção de aplicação da carga obtidas no ensaio de rotura das vigas permitiram concluir que o sistema de reforço utilizado

proporcionou um aumento de rigidez da viga reforçada. A flecha no ponto de aplicação da carga quando atingida a carga máxima foi de 121.95 mm para a viga de referência e de 63.39 mm para a viga reforçada.

- O aumento da capacidade resistente da viga reforçada originou o surgimento de novas fendas após a plastificação das armaduras longitudinais e a transferência gradual das tensões de tração das armaduras para os laminados de CFRP.
- Na viga reforçada, instantes antes do destacamento dos laminados de CFRP de reforço à flexão foi possível observar a formação de várias fendas, algumas paralelas ao eixo da viga, na zona do betão de recobrimento da face tracionada. Deste modo, parece ser possível prever a rotura da viga nos casos em que o modo de rotura seja o verificado no presente estudo.
- A extensão máxima registada nos extensómetros instalados nos laminados de CFRP de reforço à flexão foi de 10.26%. Tendo em consideração que no ensaio de caracterização dos laminados de CFRP o valor médio das extensões de rotura obtidas foi de 14.81% verificou-se um grau de mobilização dos laminados de CFRP de 69.28%.
- Devido à rotura da viga reforçada ter sido provocado por esforços de flexão, os laminados de CFRP de reforço ao corte não foram significativamente solicitados, tendo sido mobilizados a cerca de 7.9% da sua capacidade de carga total.
- O modo de rotura da viga reforçada foi o destacamento dos laminados de CFRP de reforço à flexão.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A presente dissertação apresenta uma contribuição para o nível do conhecimento existente relativamente à aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP para o reforço simultâneo à flexão e ao corte de vigas de betão armado. No futuro mais alguns aspetos devem ser objeto de análise, nomeadamente:

- A monitorização de um maior número de laminados de reforço ao corte para confirmação do nível de mobilização atingido em aplicações do mesmo género.
- A identificação de possíveis efeitos de interação entre os dois tipos de reforço aplicados, pela análise mais detalhada do comportamento mecânico de vigas reforçadas utilizando o mesmo sistema.

- O desenvolvimento de modelos analíticos de apoio ao projeto, que com base nestes e em resultados do mesmo tipo apresentem um suporte para o auxílio do projeto de reforço baseado no sistema estudado.
- A modelação do comportamento da viga reforçada utilizando o Método dos Elementos Finitos.

Capítulo 6

Referências bibliográficas

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

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

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

Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Riskalla, S.H. e Triantafillou, T.C. “*Fiber-reinforced polymer composite for construction - State-of-the-art review*”. Journal of Composites for Construction, vol. 6, nº2, May, 2002.

Barbero, Ever J. “*Introduction to Composite Materials Design*”. Taylor & Francis Group, 1999.

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

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

Blaschko, M., e K. Zilch. “*Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits*”. Technical University of Munich, Munich, Germany, 1999.

Buyukozturk, Oral, Oguz Gunes, e Erdem Karaca. “*Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites*”. Construction and Building Materials 18, 2004.

Carolin, A. “*Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*”. Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Suécia: Doctoral Thesis, 2003.

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

CPC 8. “*Modulus of elasticity of concrete in compression. RILEM Recommendation for the Testing and Use of Constructions Materials*”. 1975.

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

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

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

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

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

Dias, S.J.E., e J.A.O. Barros. “*Reforço ao corte de vigas T de betão armado por inserção de laminados de CFRP*”. Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2005. Olinda, Recife, Brasil, 2-7 Setembro, 2005. Volume VII, pp. 445-461.

Dias, S.J.E., Juvandes, L. e Figueiras, J.A. “*Estruturas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas de CFRP*”. Revista IBRACOM de Estruturas, vol. 2, nº2, Junho, 2006.

El-Hacha, R., e S.H. Riskalla. “*Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures*”. ACI Structural Journal, vol.101, nº5, September-October, 2004: 717-726.

EN ISO 527-5. “*Determination of tensile properties of plastic. Part5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*”. 1997.

Filho, J.N.S. “*Análise experimental de vigas "T" em concreto reforçadas à flexão com FRP submetidas a carregamentos pseudo-estáticos e cíclicos*”. Universidade de Brasília: Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, 2005.

Firmo, J. “*Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP)*”. IST, Lisboa: Dissertação de Mestrado, 2010.

ISO 527-2. “*Plastics - Determination of tensile properties; Parte 2: testconditions for moduling and extrusion plastics*”. International Standard, 1993.

Juvandes, L., S.J.E. Dias, e J.A. Figueiras. “*Eficiência do reforço de faixas de laje com sistemas compósitos de CFRP*”. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, nº52 Setembro, 2003.

Kotynia, R. “*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, 2007.

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

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

NP EN 10002-1. “*Materiais metálicos: Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio (à temperatura ambiente)*”. 1990.

NP EN 12390-3. “*Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes*”. (Ed.3), 2011.

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

REBAP. “*Regulamento de estruturas e betão armado e pré-esforçado*”. Decreto-Lei nº349-C/83 de 30 de Julho, Porto: Porto Editora, 211 pp, 1983.

S&P. “*Reinforcement International AG*”. S&P Clever Reinforcement Company , CH-6448, Brunnen, Switzerland, 2013. <http://www.sp-reinforcement.eu>.