



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Solange Liliana Ribeiro Abreu

Comportamento cíclico de vigas de betão armado reforçadas ao corte por inserção de laminados de CFRP



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Solange Liliana Ribeiro Abreu

Comportamento cíclico de vigas de betão
armado reforçadas ao corte por inserção
de laminados de CFRP

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

outubro de 2013

Agradecimentos

No culminar deste trabalho, desejo expressar o meu reconhecimento às pessoas e entidades que das mais variadas formas contribuíram para a sua realização e por sua vez para a concretização dos objetivos propostos.

Esta dissertação foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade do Minho (UM). O trabalho experimental foi desenvolvido no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST). Ao LEST, ao DEC e à UM agradeço os meios colocados à minha disposição.

Ao Professor Salvador Dias, sob cuja orientação decorreu a realização da presente dissertação, quero expressar o meu agradecimento pelos seus ensinamentos, rigor científico, revisão crítica, orientação e disponibilidade prestada.

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

Ao António Matos e Marco Jorge manifesto a minha gratidão pela colaboração e apoio prestados na execução do trabalho experimental realizado no âmbito desta dissertação.

À empresa Casais o meu agradecimento pelo apoio prestado na conceção das vigas de betão armado. De igual modo, apresento os meus agradecimentos pelo contributo prestado pela empresa S&P Reinforcement no fornecimento dos laminados CFRP e do adesivo, e pela empresa UNIBETÃO (Central de Braga) no fornecimento de betão.

Um agradecimento especial aos meus amigos da Universidade do Minho pelo apoio constante, amizade, companheirismo e sentido de entajuda.

Um indispensável agradecimento a todos os meus amigos que, de uma forma ou de outra, me incentivaram, apoiaram e compreenderam as minhas ausências.

Agradeço também aos meus familiares pelo apoio e motivação que me deram e por compreenderem também as minhas ausências.

Por fim, um agradecimento muito especial aos meus Pais e ao meu Irmão, por todo o apoio e afeto que me deram, muitas vezes abdicando muito de si, para me proporcionar o tempo, espaço e apoio moral imprescindíveis para a minha formação. Aos meus Pais agradeço também o amor, a amizade, a educação e o sentido de responsabilidade que me transmitiram e que procuro honrar. Por todas estas razões dedico-lhes este trabalho.

Resumo

A presente dissertação resulta de uma investigação realizada sobre o reforço ao corte de vigas de betão armado utilizando a técnica da inserção de laminados de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) em entalhes efetuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas (técnica NSM). Concretamente, com esta investigação pretendeu-se dar um contributo em termos da avaliação da eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP, quando aplicada no reforço ao corte de vigas de betão armado sujeitas a carregamento cíclico.

Inicialmente este trabalho descreve a revisão bibliográfica efetuada sobre o atual estado de conhecimento referente à utilização de compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado, com particular destaque para o reforço ao corte de vigas de betão armado sujeitas a um carregamento monotónico e/ou a um carregamento cíclico. Posteriormente é apresentado o programa experimental que foi realizado, no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST), por forma a avaliar o efeito de um carregamento cíclico no comportamento de vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM). Foram estudadas duas soluções de reforço ao corte, uma com laminados inseridos na vertical e outra com laminados inclinados a 52° , e analisados dois níveis de carregamento cíclico. Por fim, são referidas as principais conclusões obtidas na realização desta investigação e indicam-se algumas perspetivas de desenvolvimento futuro.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço ao corte de vigas de betão armado; Inserção de laminados de CFRP; Carregamento monotónico; Carregamento cíclico; Comportamento experimental.

Abstract

The present dissertation is the result of a research about the shear strengthening 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 opened on the concrete cover of the lateral faces of the beam. Specifically, with this research it was intended to make a contribution in terms of evaluation the effectiveness of the NSM technique with CFRP laminates when applied in shear strengthening of RC beams subjected to cyclic loading.

This work starts with a literature review performed about the knowledge that currently exists in terms of use of CFRP materials in the strengthening of RC structures, with particular emphasis in the shear strengthening of RC beams submitted to monotonic loading and/or a cyclic loading. After performing a literature review the experimental program carried out in the present thesis is described. This experimental research was carried out in the Structures Laboratory of the Department of Civil Engineering of the University of Minho (LEST) and had the purpose to assess the effect of a cyclic loading in the behavior of RC beams strengthened in shear with NSM CFRP laminates. It was studied two NSM CFRP shear strengthening configurations, one with vertical laminates and other with inclined laminates at 52° , and two levels of cyclic loading. Finally, the main conclusions obtained in this research are presented and indicates some prospects for future development are indicated.

KEYWORDS: Shear strengthening of reinforced concrete beams; NSM CFRP laminates; Monotonic loading; Cyclic loading; Experimental behavior.

Índice geral

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO / PALAVRAS - CHAVE	iii
ABSTRACT / KEYWORDS	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xv
CAPÍTULO 1 - Introdução	1.1
1.1 - 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 - Utilização de materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado.....	2.1
2.2 - Técnicas de reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP.....	2.5
2.3 - Comportamento de vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos.....	2.21
2.3.1 - Comportamento geral de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos.....	2.22
2.3.2 - Parâmetros que influenciam a eficácia da técnica de reforço por inserção de laminados de CFRP.....	2.23
2.4 - Comportamento à fadiga de estruturas de betão armado reforçadas com materiais compósitos de CFRP.....	2.29
2.4.1 - Considerações gerais.....	2.29
2.4.2 - Aplicação da técnica da colagem externa (EBR).....	2.32
2.4.3 - Aplicação da técnica da inserção com varões e laminados de CFRP (NSM).....	2.38

CAPÍTULO 3 - Programa experimental	3.1
3.1 - Conceção dos modelos.....	3.1
3.2 - Caracterização dos materiais	3.4
3.3 - Aplicação do reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM).....	3.8
3.4 - Sistema de ensaio e instrumentação das vigas	3.12
3.5 - Apresentação dos resultados.....	3.17
3.5.1 - Vigas sujeitas a carregamento monotónico	3.17
3.5.1.1 - Capacidade de carga das vigas até à rotura.....	3.17
3.5.1.2 - Modos de rotura.....	3.21
3.5.1.3 - Extensões nas armaduras transversais e nos laminados de CFRP.....	3.25
3.5.2 - Vigas sujeitas a carregamento cíclico.....	3.28
3.5.2.1 - Carregamento cíclico das vigas.....	3.28
3.5.2.2 - Capacidade de carga das vigas até à rotura	3.30
3.5.2.3 - Modos de rotura.....	3.33
3.5.2.4 - Extensões nas armaduras transversais e nos laminados de CFRP (ensaio monotónico).....	3.36
3.5.3 - Efeito do carregamento cíclico.....	3.38
CAPÍTULO 4 - Considerações finais	4.1
4.1 - Conclusões gerais.....	4.1
4.2 - Desenvolvimentos futuros.....	4.3
CAPÍTULO 5 - Referências bibliográficas	5.1

Índice de figuras

CAPÍTULO 2 - Revisão bibliográfica

Figura 2.1 - Tipos de reforços possíveis usando compósitos de FRP colados externamente (adaptado de Juvandes, 1999).....	2.2
Figura 2.2 - Diagrama tensão vs. extensão de diferentes tipos de fibras, de aço convencional (A500) e de cordões de aço de armadura de pré-esforço (Barros, 2004).....	2.4
Figura 2.3 - Materiais compósitos de CFRP : sistemas pré-fabricados (varões e laminados) e sistemas curados “in situ” (mantas e tecidos) (Dias, 2008).....	2.5
Figura 2.4 - Técnicas de reforço ao corte com compósitos de CFRP.....	2.6
Figura 2.5 - Configurações possíveis para o reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP (Khalifa, 1999).....	2.7
Figura 2.6 - Fases de aplicação do reforço ao corte com faixas discretas de duas camadas de manta de CFRP unidirecional coladas externamente (Dias, 2008).....	2.8
Figura 2.7 - Princípios de aplicação do reforço com CFRP utilizando a técnica da colagem externa (EBR) (Dias <i>et al.</i> , 2006).....	2.9
Figura 2.8 - Exemplos do modo de rotura por destacamento do CFRP.....	2.10
Figura 2.9 - Procedimento para a aplicação do reforço de CFRP segundo a técnica NSM (Dias, 2008).....	2.11
Figura 2.10 - Princípios de aplicação do reforço com CFRP utilizando a técnica da inserção (NSM) (Dias, 2008).....	2.12
Figura 2.11 - Grau de ancoragem conferido pelas técnicas EBR e NSM (Dias (2008) adaptado de Carolin (2003))	2.12
Figura 2.12 - Geometria das vigas da série B ensaiadas por Dias e Barros (2010) (dimensões em mm).....	2.13
Figura 2.13 - Localização dos estribos de aço (traço cheio), laminados (tracejado) e mantas de CFRP (Dias e Barros, 2010).....	2.14
Figura 2.14 - Comparação do grau de eficácia do CFRP (Dias e Barros, 2010).....	2.15
Figura 2.15 - Soluções de reforço adotadas por Cisneros <i>et al.</i> (2012).....	2.16
Figura 2.16 - Esquema dos ensaios realizados por Cisneros <i>et al.</i> (2012).....	2.17

Figura 2.17 - Técnicas de reforço utilizadas por Chaallal <i>et al.</i> (2011).....	2.19
Figura 2.18 - Esquema do ensaio realizado por Chaallal <i>et al.</i> (2011) (dimensões em mm).....	2.20
Figura 2.19 - Modos de rotura de algumas das vigas ensaiadas por Chaallal <i>et al.</i> (2011).....	2.21
Figura 2.20 - Comportamento de uma viga de betão armado reforçada ao corte por inserção de laminados de CFRP (comparação com uma viga não reforçada) (Dias, 2008).....	2.22
Figura 2.21 - Variação de V_f com o aumento da classe de resistência do betão (f_{cm}) (Dias, 2008).....	2.23
Figura 2.22 - Efeito da percentagem de estribos na eficácia do reforço de CFRP.....	2.25
Figura 2.23 - Efetividade do reforço de CFRP (ε_{fe}) em função da percentagem ρ_f (Dias, 2008).....	2.25
Figura 2.24 - Efetividade do reforço de CFRP (ε_{fe}) em função da orientação do CFRP (Dias, 2008).....	2.25
Figura 2.25 - Vigas testadas por Costeira (2010) (dimensões em mm).....	2.27
Figura 2.26 - Força vs. Deslocamento na secção de aplicação da carga (Costeira, 2010).....	2.28
Figura 2.27 - Modos de rotura das vigas com laminados de CFRP inseridos inclinados a 52° (Costeira, 2010).....	2.29
Figura 2.28 - Viaduto de Santa Teresa reforçado com CFRP (Arquez, 2010).....	2.30
Figura 2.29 - Laminados pré-fabricados de CFRP em forma de L concebidos para o reforço ao corte de vigas de betão armado (Sika® CarboShear L®, 2003).....	2.32
Figura 2.30 - Viga S4 (Czaderski, 2002) e S6 (Czaderski e Motavalli (2004)).....	2.33
Figura 2.31 - Deslocamentos a meio vão da viga S6 durante todas as fases do teste em comparação com a viga S4 (Czaderski e Motavalli, 2004).....	2.34
Figura 2.32 - Geometria das vigas ensaiadas por Chaallal <i>et al.</i> (2009) (dimensões em mm).....	2.34
Figura 2.33 - Deslocamento vs. ciclo.....	2.36
Figura 2.34 - Extensão na armadura transversal vs. ciclo.....	2.36

Figura 2.35 - Força de corte vs. deslocamento no ponto aplicação da carga para as vigas ensaiadas por Bae <i>et al.</i> (2013).....	2.38
Figura 2.36 - Vigas testadas por Goebel <i>et al.</i> (2012).....	2.39
CAPÍTULO 3 - Programa experimental	
Figura 3.1 - Geometria das vigas a ensaiar (dimensões em mm).....	3.1
Figura 3.2 - Localização dos laminados de CFRP (tracejado): a) reforço com laminados verticais (vigas 3S-7LV-M e 3S-7LV-C); b) reforço com laminados inclinados a 52° (vigas 3S-9LI-M e 3S-9LI-C).....	3.3
Figura 3.3 - Ensaio realizado para a caracterização do betão.....	3.5
Figura 3.4 - Ensaio para a caracterização das armaduras de aço e respetivo modo de rotura (Costeira, 2010).....	3.6
Figura 3.5 - Laminado de CFRP utilizado.....	3.7
Figura 3.6 - Provetes de CFRP e respetivas dimensões (Costeira, 2010).....	3.7
Figura 3.7 - Ensaio de tração uniaxial de um provete de laminado de CFRP e respetivo modo de rotura (Costeira, 2010).....	3.7
Figura 3.8 - Realização dos entalhes nas faces laterais das vigas.....	3.9
Figura 3.9 - Corte e limpeza dos laminados usados.....	3.10
Figura 3.10 - Sequência da aplicação do reforço ao corte de uma viga de betão armado com laminados de CFRP usando a técnica NSM.....	3.11
Figura 3.11 - Esquema geral do ensaio monotónico à rotura.....	3.13
Figura 3.12 - Esquema geral do ensaio cíclico.....	3.14
Figura 3.13 - Disposição dos cinco transdutores de deslocamentos (LVDT's) (dimensões em mm).....	3.14
Figura 3.14 - Extensómetros elétricos utilizados na instrumentação dos laminados.....	3.15
Figura 3.15 - Disposição dos quatro extensómetros aplicados nos laminados de CFRP instrumentados (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4).....	3.15
Figura 3.16 - Instrumentação dos laminados de CFRP.....	3.15
Figura 3.17 - Disposição dos três extensómetros aplicados no estribo de aço instrumentado (Ext.1, Ext.2 e Ext.3).....	3.16

Figura 3.18 - Localização dos estribos e dos laminados de CFRP instrumentados: a) reforço com laminados verticais (vigas 3S-7LV-M e 3S-7LV-C); b) reforço com laminados inclinados a 52° (vigas 3S-9LI-M e 3S-9LI-C).....	3.16
Figura 3.19 - Curvas de comportamento Força vs. Deslocamento na secção de aplicação da carga.....	3.18
Figura 3.20 - Efeito da percentagem e da orientação do CFRP na eficácia da técnica NSM no reforço ao corte de vigas de betão armado de altura elevada.....	3.19
Figura 3.21 - Padrão de fendilhação instalado nas vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M (face da frente).....	3.20
Figura 3.22 - Padrão de fendilhação instalado nas vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M (face de trás).....	3.20
Figura 3.23 - Alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-7LV-M.....	3.22
Figura 3.24 - Pormenores do modo de rotura da viga 3S-7LV-M.....	3.23
Figura 3.25 - Alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-9LI-M.....	3.24
Figura 3.26 - Pormenores do modo de rotura da viga 3S-9LI-M.....	3.25
Figura 3.27 - Variação das extensões no estribo de aço instrumentado da viga 3S-7LV-M e da viga 3S-9LI-M.....	3.26
Figura 3.28 - Variação das extensões nos laminados instrumentados da viga 3S-7LV-M e da viga 3S-9LI-M.....	3.26
Figura 3.29 - Padrão de fendilhação da viga 3S-7LV-C antes do carregamento cíclico.....	3.28
Figura 3.30 - Padrão de fendilhação da viga 3S-7LV-C após o carregamento cíclico.....	3.29
Figura 3.31 - Padrão de fendilhação da viga 3S-9LI-C antes do carregamento cíclico.....	3.30
Figura 3.32 - Padrão de fendilhação da viga 3S-9LI-C após o carregamento cíclico.....	3.30
Figura 3.33 - Curvas de comportamento Força vs. Deslocamento na secção de aplicação da carga.....	3.31
Figura 3.34 - Padrão de fendilhação instalado nas vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C (face da frente).....	3.32
Figura 3.35 - Padrão de fendilhação instalado nas vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C (face da trás).....	3.33

Figura 3.36 - Alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-7LV-C.....	3.34
Figura 3.37 - Pormenor do modo de rotura da viga 3S-7LV-C.....	3.34
Figura 3.38 - Alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-9LI-C.....	3.35
Figura 3.39 - Pormenores do modo de rotura da viga 3S-9LI-C.....	3.36
Figura 3.40 - Variação das extensões no estribo de aço instrumentado da viga 3S-7LV-C e da viga 3S-9LI-C.....	3.37
Figura 3.41 - Variação das extensões nos laminados instrumentados da viga 3S-7LV-C e da viga 3S-9LI-C.....	3.37
Figura 3.42 - Comparação da fenda de rotura de corte das vigas 3S-7LV-M e 3S-7LV-C	3.40

Índice de tabelas

CAPÍTULO 2 - Revisão bibliográfica

Tabela 2.1 - Propriedades típicas de resinas utilizadas em materiais compósitos de FRP (Barros, 2007).....	2.3
Tabela 2.2 - Propriedades típicas do betão, do aço e de fibras de carbono (adaptado de Dias (2008) e NP EN 1992-1-1 (2010)).....	2.4
Tabela 2.3 - Propriedades das vigas ensaiadas e resultados dos ensaios realizados por Cisneros <i>et al.</i> (2012).....	2.17
Tabela 2.4 - Resultados experimentais das vigas ensaiadas por Chaallal <i>et al.</i> (2011).....	2.20
Tabela 2.5 - Sistemas de reforço ao corte adotados nas vigas ensaiadas por Costeira (2010).....	2.26
Tabela 2.6 - Principais resultados em termos de capacidade de carga de cada viga (Costeira, 2010).....	2.28
Tabela 2.7 - Tabela de classificação da fadiga em função do número de ciclos (Hsu, 1981).....	2.30
Tabela 2.8 - Melhorias do desempenho à fadiga de vigas de betão armado devido à presença do reforço de CFRP (Kim e Heffernan, 2008).....	2.31
Tabela 2.9 - Definição do carregamento cíclico para as vigas ensaiadas por Chaallal <i>et al.</i> (2009).....	2.35
Tabela 2.10 - Resultados experimentais dos ensaios realizados por Chaallal <i>et al.</i> (2009).....	2.36

CAPÍTULO 3 - Programa experimental

Tabela 3.1 - Definição das soluções de reforço de CFRP adotadas nas vigas ensaiadas.....	3.3
Tabela 3.2 - Principais propriedades do betão e do aço das vigas ensaiadas (Costeira, 2010).....	3.6
Tabela 3.3 - Principais propriedades do laminado de CFRP utilizado (Costeira, 2010).....	3.8
Tabela 3.4 - Principais propriedades do adesivo S&P®Resin 220 epoxy adhesive (S&P, 2008).....	3.8

Tabela 3.5 - Tipo de carregamento imposto nas vigas ensaiadas.....	3.13
Tabela 3.6 - Principais resultados em termos de capacidade de carga das vigas (ensaios monotónicos).....	3.18
Tabela 3.7 - Extensões registadas nos extensómetros colados nos laminados das vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M.....	3.27
Tabela 3.8 - Principais resultados em termos de capacidade de carga das vigas ensaiadas (ensaio à rotura após o carregamento cíclico).....	3.31
Tabela 3.9 - Extensões registadas nos extensómetros colados nos laminados das vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C (ensaio monotónico).....	3.38
Tabela 3.10 - Resultados experimentais das vigas 3S-7LV-M, 3S-7LV-C, 3S-9LI-M e 3S-9LI-C.....	3.39

Capítulo 1

Introdução

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A necessidade de reforçar e reabilitar estruturas de betão armado pode estar associada a um conjunto variado de circunstâncias tais como, a redução da resistência dos materiais resultante da sua degradação (carbonatação do betão e corrosão das armaduras), a ocorrência de acidentes (sismos, incêndios, explosões e atos de vandalismo), erros de projeto e/ou erros de construção. Além disso, frequentemente existe a necessidade de reforçar estruturas de betão armado para que estas possam desempenhar novas funções com segurança (mudança do tipo de utilização em edifícios com um aumento de cargas, aumento dos volumes de tráfego em pontes e alteração do sistema estrutural).

O desenvolvimento tecnológico tornou possível o aparecimento de materiais de elevado desempenho, eficazes do ponto de vista arquitetónico, estrutural e de durabilidade, como é o caso dos materiais compósitos de CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono). Estes materiais apresentam várias características relevantes tais como, elevada rigidez e resistência à tração, baixo peso específico, bom comportamento à fadiga e elevada resistência à corrosão. É também de referir que os CFRP apresentam grande versatilidade quer em termos de dimensões (disponíveis em várias espessuras, tipos de secção transversal e com dimensões de comprimento quase infinitas), quer em termos de adaptabilidade a qualquer tipo de superfície. As técnicas de reforço que recorrem a materiais compósitos CFRP são de fácil e rápida execução e as soluções de reforço introduzem poucas alterações na arquitetura inicial das estruturas, uma vez que, com recurso a pequenas quantidades de reforço é possível obter consideráveis aumentos da capacidade de carga dos elementos estruturais.

A técnica da colagem externa do CFRP, designada na literatura internacional por “*Externally Bonded Reinforcement*” (EBR), e a técnica da inserção do CFRP no betão de recobrimento, designada na literatura internacional por “*Near Surface Mounted*” (NSM), são duas técnicas de reforço com CFRP que podem ser usadas para reforçar estruturas de betão armado. A técnica NSM apresenta várias vantagens relativamente à técnica EBR, das quais se destacam: a maior resistência a fenómenos de descolamento/arrancamento do CFRP, dada a existência de dupla área de colagem do CFRP; a maior proteção do reforço face a atos de vandalismo, a impactos, a temperaturas elevadas e à ação de agentes ambientais adversos pelo facto do

reforço estar inserido e não colado externamente; não é necessário proceder à preparação da superfície a reforçar, sendo apenas necessário proceder à abertura dos entalhes.

Existe um determinado tipo de estruturas de betão armado que ao longo do seu período de vida útil são solicitadas por um número elevado de carregamentos cíclicos, como é o caso das pontes e dos viadutos. A necessidade de reforçar este tipo de estruturas torna necessário que haja conhecimento ao nível do comportamento à fadiga de estruturas de betão armado reforçadas com CFRP. Estudos já realizados com a técnica da colagem externa com CFRP e com a técnica da inserção de varões de CFRP comprovaram que a presença do reforço à flexão de CFRP aumenta a resistência à fadiga das vigas reforçadas quando comparadas com as vigas não reforçadas.

No âmbito da análise da viabilidade da aplicação da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço de pontes e viadutos, torna-se necessário avaliar o efeito da fadiga na eficácia da referida técnica de reforço. Neste contexto, a presente dissertação terá como objeto de estudo avaliar o desempenho da técnica NSM com laminados de CFRP, quando aplicada no reforço ao corte de vigas de betão armado sujeitas a carregamento cíclico.

1.2 - OBJETIVOS DO TRABALHO

De um modo geral, com a presente dissertação pretendeu-se avaliar experimentalmente o comportamento cíclico de vigas de betão armado reforçadas ao corte por inserção de laminados de CFRP. Assim, a investigação realizada no âmbito da presente dissertação visou atingir os seguintes objetivos:

- Verificar a eficácia da técnica da inserção de laminados de CFRP quando aplicada no reforço ao corte de vigas de betão armado sujeitas a um carregamento cíclico;
- Avaliar o efeito da orientação do reforço de CFRP no comportamento de vigas de betão armado reforçadas ao corte com a técnica da inserção de laminados de CFRP e sujeitas a carregamento cíclico.
- Avaliar o efeito do nível de carregamento cíclico no comportamento de vigas de betão armado reforçadas ao corte com a técnica da inserção de laminados de CFRP.

1.3 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é composta por 5 capítulos, incluindo a introdução, as considerações finais e as referências bibliográficas.

No Capítulo 1 é feito o enquadramento geral sobre o tema da dissertação, são definidos os objetivos a serem alcançados com a realização deste trabalho de investigação e é apresentada a forma como a presente dissertação se encontra estruturada.

No Capítulo 2, é descrito, de uma forma resumida, o trabalho de pesquisa bibliográfica realizado sobre a temática da presente dissertação. Inicialmente, é feito o enquadramento da utilização dos materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado. Seguidamente, são apresentadas as técnicas de reforço ao corte que recorrem aos referidos materiais, com particular relevo para a técnica da inserção de laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM). Posteriormente, será abordado o comportamento à fadiga de vigas de betão armado reforçadas ao corte com materiais compósitos de CFRP, onde serão apresentados alguns trabalhos experimentais já realizados no âmbito desta temática

No Capítulo 3 é descrito, detalhadamente, o programa experimental realizado no âmbito da presente dissertação. A primeira parte deste capítulo é destinada à descrição dos modelos de vigas testadas, à caracterização dos materiais utilizados, à aplicação do reforço de CFRP, à descrição do tipo de ensaios realizados e à instrumentação colocada nas vigas. Posteriormente, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no presente programa experimental.

No Capítulo 4 são apresentadas as considerações finais sobre a investigação desenvolvida no âmbito da presente dissertação. Ainda, neste capítulo, são apontadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

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

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

No presente capítulo é apresentado o resultado da pesquisa bibliográfica efetuada sobre a temática da presente dissertação. Inicialmente, é feito o enquadramento da utilização dos materiais compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão armado. Seguidamente, são apresentadas as técnicas de reforço ao corte que recorrem aos referidos materiais, com particular relevo para a técnica da inserção de laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM). Neste contexto, será feita referência aos aspetos tecnológicos da aplicação dos reforços de CFRP e ao desempenho estrutural dos elementos reforçados. Posteriormente, será abordado o comportamento à fadiga de vigas de betão armado reforçadas ao corte com materiais compósitos de CFRP onde serão apresentados alguns trabalhos experimentais já realizados no âmbito desta temática

2.1 - UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE CFRP NO REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

Os níveis de segurança desejados para as estruturas de betão armado podem, em alguns casos, não ser os mais adequados devido a fatores como a redução da resistência dos materiais, resultante da sua degradação (carbonatação do betão e corrosão das armaduras); a ocorrência de acidentes (sismos, incêndios, explosões, cheias ou atos de vandalismo); a existência de erros de projeto e/ou de construção; o aumento da sobrecarga de utilização (por exemplo motivada por uma mudança do tipo de utilização da estrutura). Dos vários tipos de intervenção existentes para fazer face a estes problemas, refira-se a demolição total ou parcial da estrutura, a imposição de medidas restritivas ao uso da estrutura, a modificação do sistema estrutural, a substituição ou introdução de novos elementos estruturais ou o reforço de elementos estruturais.

No que se refere ao reforço de estruturas de betão armado, as técnicas habitualmente utilizadas são a colagem de chapas metálicas, o encamisamento das secções e a aplicação de pré-esforço exterior. Com vista à colmatação dos aspetos menos positivos associados às técnicas de reforço tradicionalmente utilizadas (Dias, 2008) e tendo em conta o surgimento de novos materiais com elevado desempenho, surgiram as técnicas de reforço que recorrem à utilização de materiais compósitos de FRP (*Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros

Reforçados com Fibras). Na Figura 2.1 apresentam-se exemplos de reforços possíveis de elementos estruturais de betão armado usando materiais compósitos de FRP.

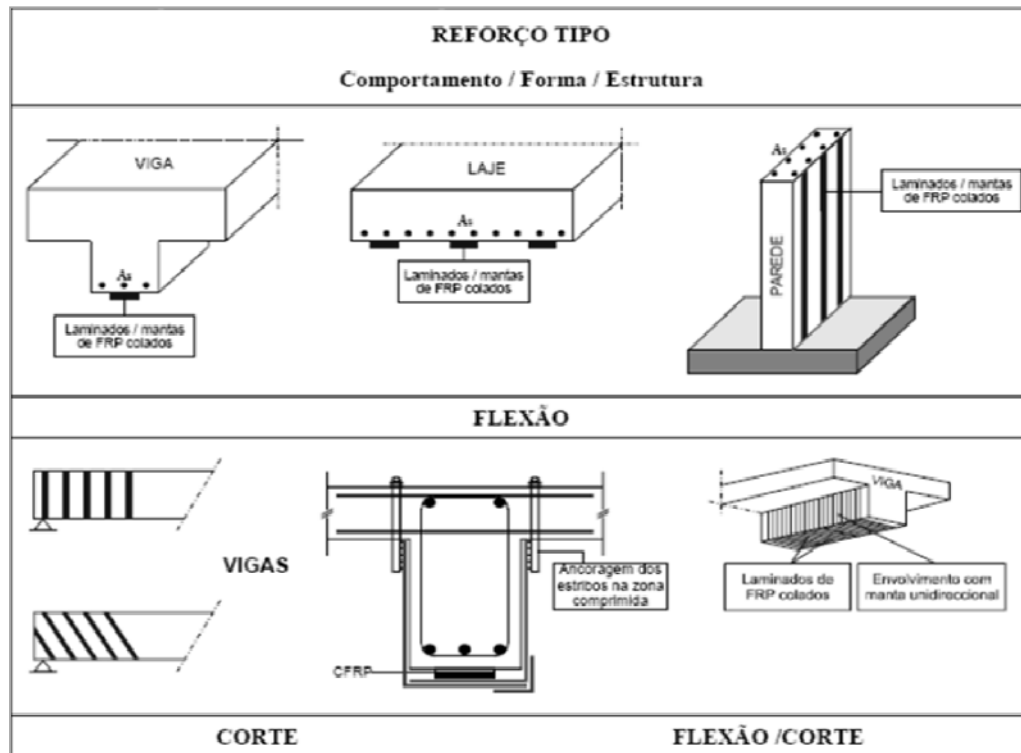


Figura 2.1 - Tipos de reforços possíveis usando compósitos de FRP colados externamente (adaptado de Juvandes, 1999).

Os materiais compósitos de FRP são constituídos por fibras embebidas numa matriz polimérica (a resina). As fibras asseguram a resistência e rigidez necessária ao compósito, enquanto que a matriz protege as fibras da ação direta de agentes ambientais, garante que estas funcionem em conjunto, assegura uma melhor distribuição de tensões pelo sistema fibroso e evita a micro-encurvadura das fibras quando o compósito é submetido a esforços de compressão (Firmo, 2010).

A matriz deve possuir elevadas características do ponto de vista da durabilidade e apresentar um comportamento dúctil. Os dois tipos de resinas mais utilizados nos materiais compósitos de FRP são as polyester e as epóxi, sendo mais recorrente a escolha de resinas do tipo epóxi, devido à boa aderência à grande maioria dos materiais, à boa resistência mecânica e aos agentes agressores do meio ambiente, e também pelo facto de não absorverem água. Na Tabela 2.1 apresentam-se algumas propriedades dos dois tipos de resina anteriormente referidos.

Tabela 2.1 - Propriedades típicas de resinas utilizadas em materiais compósitos de FRP (Barros, 2007).

Resina	Módulo de elasticidade à tração [GPa]	Resistência à tração [MPa]	Extensão na rotura [%]	Densidade [Kg/m³]
Polyester	2,1 - 4,1	20 - 100	1,0 - 6,5	1000 - 1450
Epóxi	2,5 - 4,1	55 - 130	1,5 - 9,0	1100 - 1300

As fibras têm a forma de filamentos de pequeno diâmetro, tem módulo de elasticidade e resistência à tração elevados, baixa densidade e apresentam um comportamento frágil. O comportamento das fibras pode ser influenciado por parâmetros como, a forma, a orientação, o grau de concentração e a composição química. As principais fibras utilizadas nos FRP para intervenções de reforço de estruturas de betão são as de vidro (G), as de aramida (A) e as de carbono (C), sendo os respetivos compósitos denominados internacionalmente por GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro), AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida) e CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono).

Na Figura 2.2 apresenta-se o diagrama de comportamento tensão vs. extensão para os seguintes materiais: aço convencional tipo A500, cordões de aço de armadura de pré-esforço, fibras de carbono HM (HM – fibras com elevado módulo de elasticidade), fibras de carbono HS (HS – fibras de elevada resistência), fibras de aramida e fibras de vidro. A análise desta figura permite verificar o comportamento frágil das fibras dos FRP em contraste com o comportamento dúctil do aço. Dos três tipos de fibras anteriormente referidos (aramida, vidro e carbono), destacam-se as de carbono, uma vez que são as que apresentam melhores propriedades mecânicas, são imunes à corrosão, não absorvem água e são mais resistentes a ataques químicos.

Na Tabela 2.2 apresentam-se os valores típicos das propriedades do betão, do aço e de fibras de carbono. Verifica-se que a densidade das fibras de carbono é cerca de 25% da do aço e 75% da do betão. Para além de serem mais leves, as fibras de carbono apresentam, em termos de rigidez e de capacidade máxima resistente, valores que superam amplamente os do betão e do aço (Dias, 2008).

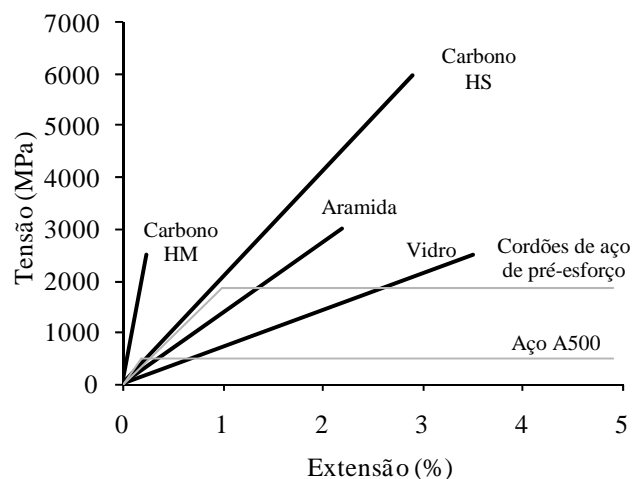


Figura 2.2 - Diagrama tensão vs. extensão de diferentes tipos de fibras, de aço convencional (A500) e de cordões de aço de armadura de pré-esforço (Barros, 2004).

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

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

(a) Propriedades das fibras de carbono, não do compósito.

Os materiais compósitos de CFRP apresentam várias características relevantes tais como, elevada rigidez e resistência à tração, baixo peso específico, bom comportamento à fadiga e elevada resistência à corrosão. É também de referir que os CFRP apresentam grande versatilidade quer em termos de dimensões (disponíveis em várias espessuras, tipos de secções transversais e com dimensões de comprimento quase infinitas), quer em termos de adaptabilidade a qualquer tipo de superfície. As técnicas de reforço que recorrem a materiais compósitos de CFRP são de fácil e rápida execução e as soluções de reforço introduzem poucas alterações na arquitetura inicial das estruturas, uma vez que, com recurso a pequenas quantidades de reforço é possível obter consideráveis aumentos da capacidade dos elementos estruturais (Dias, 2008).

Os CFRP comercializados para o reforço estrutural dividem-se em dois grupos: os sistemas pré-fabricados (laminados e varões) e os sistemas curados “in situ” (sistemas unidireccionais - mantas; sistemas multidireccionais - tecidos). Na Figura 2.3 apresentam-se exemplos

representativos das formas comerciais dos CFRP referidas anteriormente. Os sistemas pré-fabricados apresentam-se sob a forma de perfis e as suas características mecânicas e físicas são asseguradas pelos seus fornecedores. A espessura do laminado é em regra de 1 a 2 mm, sendo o armazenamento feito em rolos com comprimento superior a 50 metros (Azevedo, 2008). O elemento que estabelece a ligação entre o CFRP e o betão é o adesivo. Nos sistemas curados “in situ”, o processo de fabrico do compósito de CFRP é efetuado no local a reforçar, sendo a matriz e as fibras fornecidas em separado. Nestes sistemas efetua-se a aplicação de feixes de fibras contínuas sobre uma resina epoxídica previamente espalhada na superfície de betão a reforçar. Após a colocação das fibras procede-se à sua impregnação com resina de saturação, e só depois do endurecimento da resina é que se obtém o compósito de CFRP. As mantas apresentam tipicamente espessuras entre 0,1 e 0,2 mm e larguras de 25 a 50 cm, sendo armazenadas em rolos de elevado comprimento (superior a 50 metros) (Azevedo, 2008).

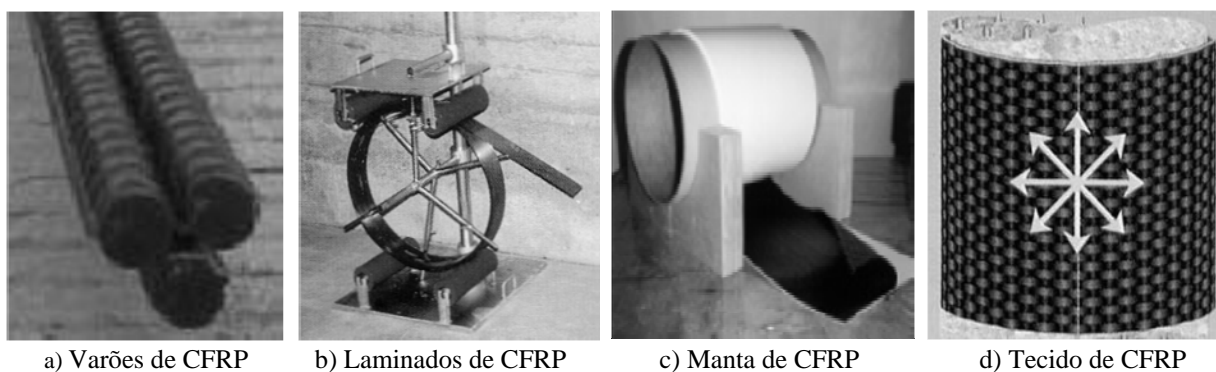


Figura 2.3 - Materiais compósitos de CFRP : sistemas pré-fabricados (varões e laminados) e sistemas curados “in situ” (mantas e tecidos) (Dias, 2008).

2.2 - TÉCNICA DE REFORÇO AO CORTE DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM COMPÓSITOS DE CFRP

O reforço ao corte de uma viga de betão armado com CFRP baseia-se na colocação deste com as fibras orientadas transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal às potenciais fendas de corte.

Na Figura 2.4 apresentam-se detalhes das técnicas de reforço ao corte de vigas de betão armado com materiais compósitos de CFRP desenvolvidas até ao momento, designadamente, a técnica da colagem externa (técnica EBR - “Externally Bonded Reinforcement”), a técnica

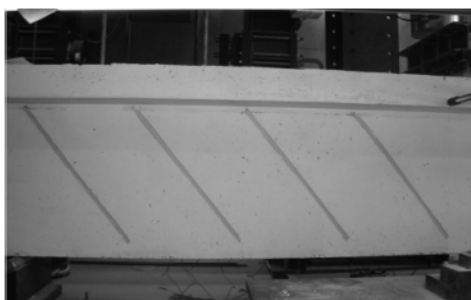
que se baseia na inserção do CFRP (varões ou laminados) em entalhes realizados no betão de recobrimento (técnica NSM - “Near Surface Mounted”) e a técnica que consiste na introdução de varões de CFRP em furos executados no betão (técnica ETS - “Embedded Through-Section”).



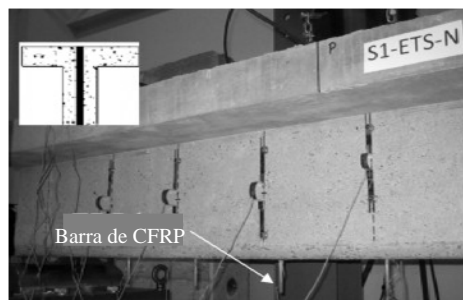
a) Colagem externa de mantas de CFRP (Khalifa, 1999)



b) Inserção de varões de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento (De Lorenzis e Nanni, 2001)



c) Inserção de laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento (Costeira, 2010)



d) Incorporação através da secção de barras de CFRP (Godat *et al.*, 2013)

Figura 2.4 - Técnicas de reforço ao corte com compósitos de CFRP.

A técnica da colagem externa com compósitos de CFRP foi a primeira a ser investigada no âmbito do reforço ao corte de vigas de betão armado. Esta técnica consiste na colagem do CFRP nas faces do elemento a reforçar e, de acordo com a Figura 2.5, existe um conjunto variado de soluções de reforço possíveis em termos da configuração da superfície colada, da distribuição do reforço de CFRP, da orientação das fibras, da sobreposição de camadas com orientações diferentes e da adoção de mecanismos exteriores de fixação.

A título de exemplo, na Figura 2.6 apresentam-se as principais etapas da aplicação do reforço ao corte de uma viga de betão armado reforçada ao corte com mantas de CFRP coladas externamente. Concretamente, aplicando a técnica EBR, foram aplicadas faixas discretas de duas camadas de manta de CFRP unidirecional.

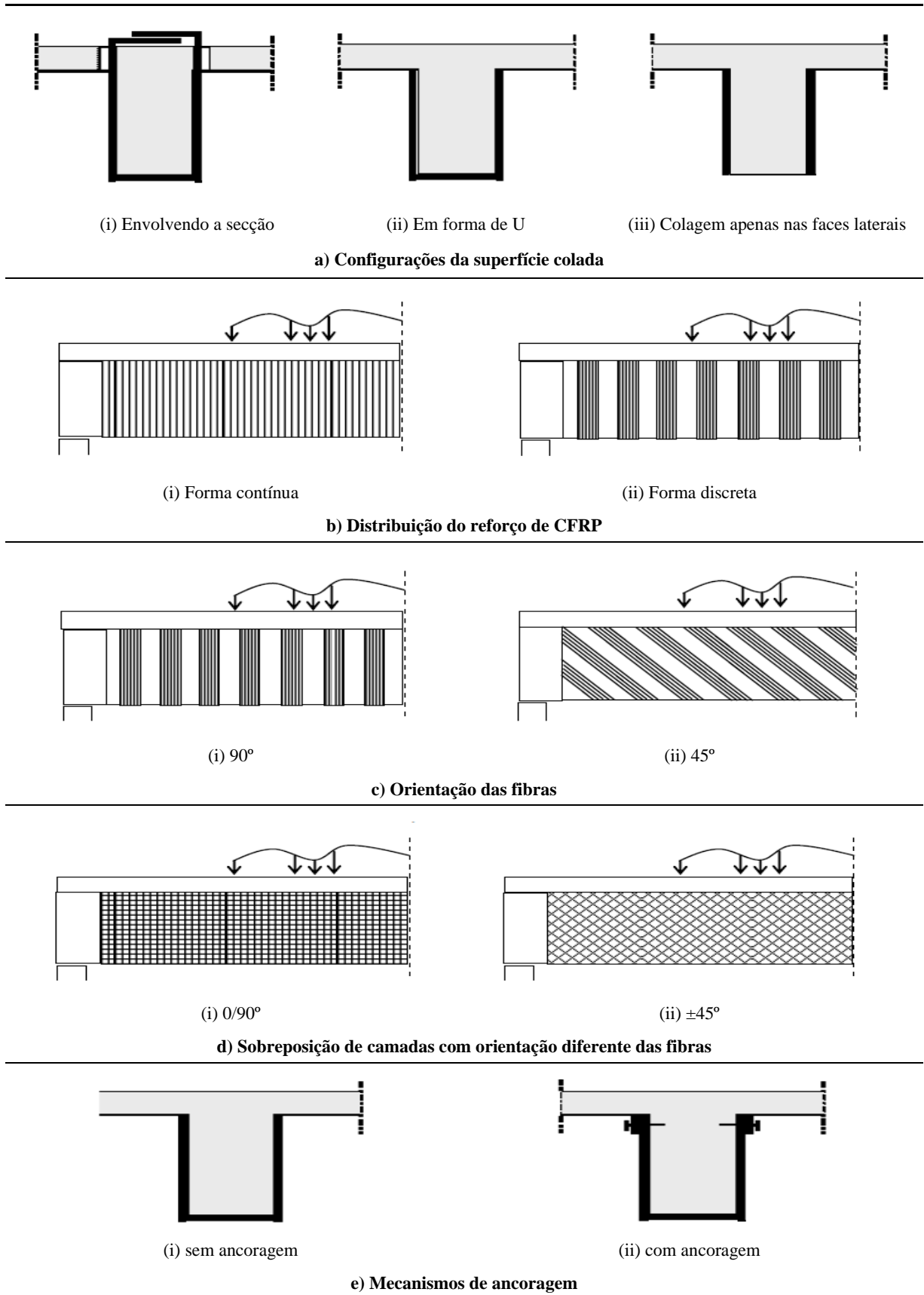


Figura 2.5 - Configurações possíveis para o reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP (Khalifa, 1999).


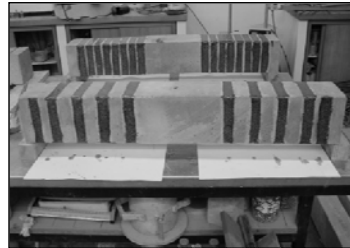


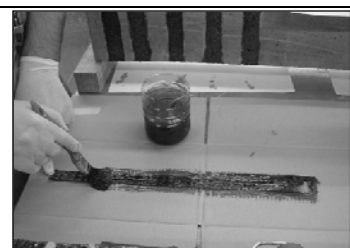
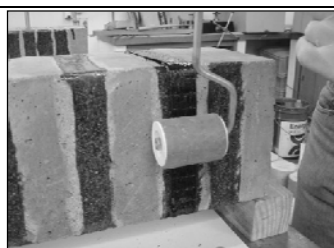
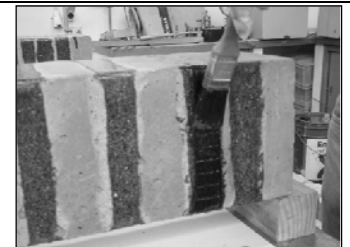


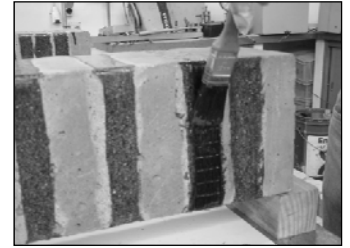
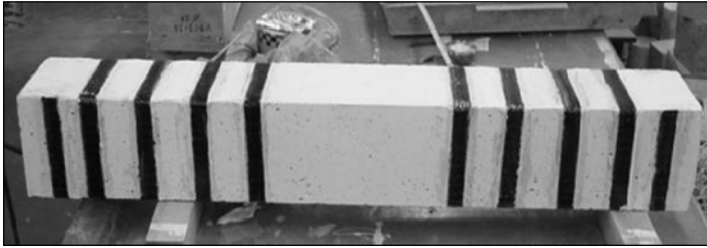
		
Preparação da superfície: esmerilagem	Após a aplicação do primário	Obtenção das faixas de manta com 25 mm de largura - corte na direção das fibras
		
Aplicação da 1ª camada de resina no betão	Aplicação de resina na 1ª camada de manta	Colagem da 1ª camada de manta - Alinhamento das fibras
		
Aplicação de resina sobre a 1ª camada de manta	Aplicação de resina na 2ª camada de manta	Colagem da 2ª camada de manta
		
Aplicação de resina sobre a 2ª camada de manta	Aspetto final da viga após a execução do reforço (face tracionada virada para cima)	

Figura 2.6 - Fases de aplicação do reforço ao corte com faixas discretas de duas camadas de manta de CFRP unidirecional coladas externamente (Dias, 2008).

Na Figura 2.7 apresentam-se resumidamente os procedimentos básicos que devem ser seguidos antes, durante e após a execução de um reforço de CFRP aplicado segundo a técnica da colagem externa (EBR). Trata-se de um conjunto de procedimentos que são a base para um rigoroso controlo de qualidade, quer da execução do reforço como dos materiais utilizados por forma a garantir um bom desempenho do reforço de CFRP.

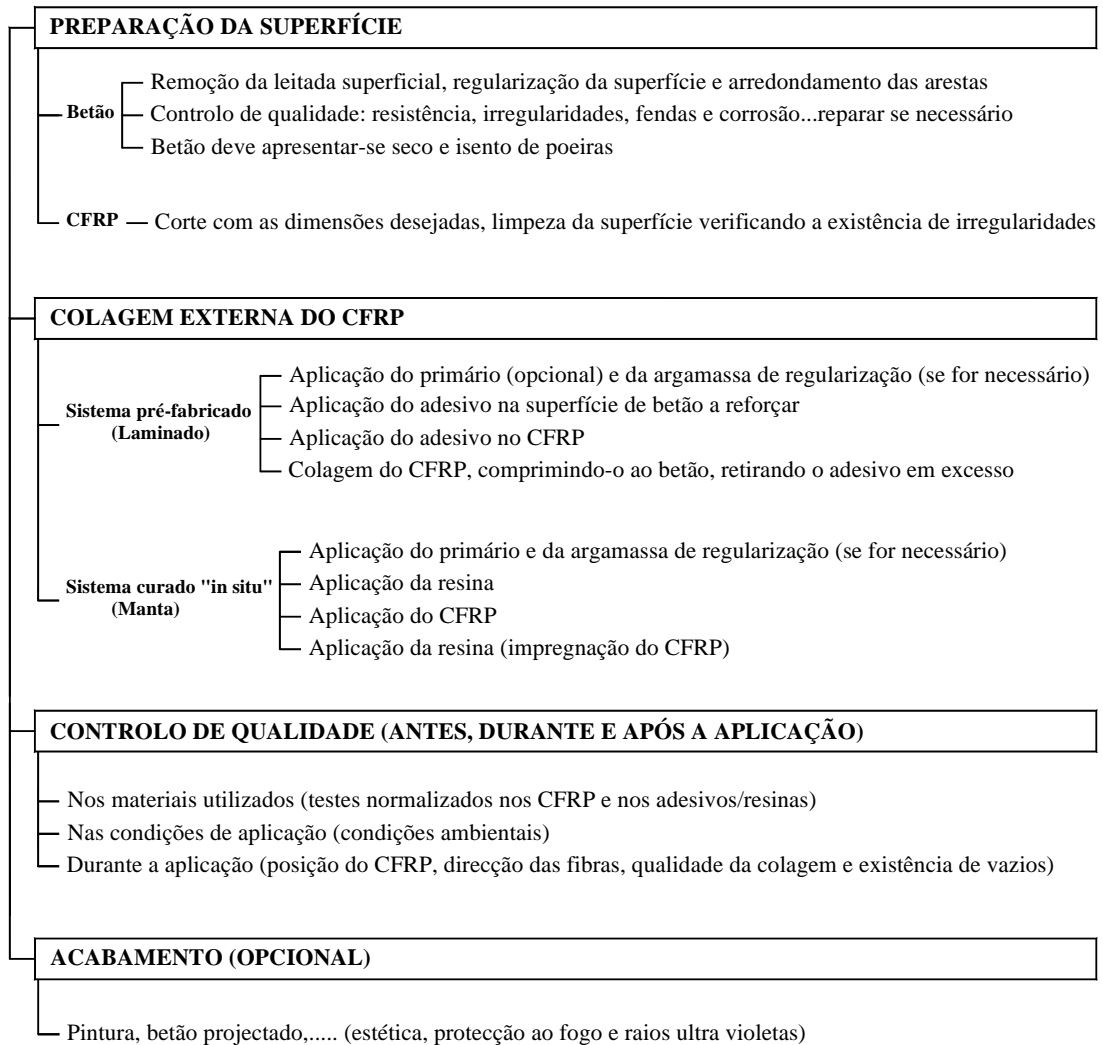


Figura 2.7 - Princípios de aplicação do reforço com CFRP utilizando a técnica da colagem externa (EBR) (Dias *et al.*, 2006).

A investigação experimental já realizada em termos do reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP colados externamente permitiu comprovar que este tipo de reforço proporciona consideráveis acréscimos na capacidade resistente ao esforço transversal das vigas (Bousselham e Chaallal, 2004). No entanto, tem-se verificado que tipicamente o modo de rotura associado à técnica EBR é o destacamento prematuro do CFRP (Figura 2.8) com níveis baixos de mobilização do CFRP.



(Khalifa, 1999)



(Dias, 2008)

Figura 2.8 - Exemplos do modo de rotura por destacamento do CFRP.

Nos últimos anos, com o objetivo de aumentar o nível de mobilização do CFRP e de proporcionar ao reforço melhores condições de proteção (do que as garantidas pela técnica EBR) a atos de vandalismo, a impactos, a temperaturas elevadas e à ação de agentes ambientais adversos, surgiu a técnica de reforço NSM com compósitos de CFRP, que consiste na inserção do CFRP em entalhes executados no betão de recobrimento. Nesta técnica de reforço podem ser usados varões (Figura 2.4b) ou laminados (Figura 2.4c). A fixação do CFRP ao betão é feita por intermédio de um adesivo epóxi.

Na Figura 2.9 apresentam-se os passos fundamentais referentes à aplicação do reforço ao corte de uma viga de betão armado com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento das faces laterais da viga. Os referidos passos são: execução de entalhes na face dos elementos a reforçar; limpeza dos entalhes através da aplicação de ar comprimido por forma a garantir as melhores condições de aderência entre o adesivo e o betão; corte dos laminados e posterior limpeza com acetona por forma a garantir as melhores condições de aderência entre o adesivo e o CFRP; produção do adesivo epoxídico segundo as recomendações do fabricante; preenchimento dos entalhes com adesivo; aplicação do adesivo nas faces do laminado; introdução dos laminados nos entalhes retirando-se o adesivo em excesso (Dias, 2008).

Tal como no caso da técnica EBR, o desempenho da técnica NSM com compósitos de CFRP também depende do controlo de qualidade assegurado, quer nos procedimentos de reforço como dos materiais aplicados. Na Figura 2.10 apresenta-se um organigrama que regista, de uma forma resumida, os procedimentos básicos que devem ser seguidos antes, durante e após a aplicação do reforço CFRP aplicado de acordo com a técnica NSM.







		
Execução dos entalhes	Limpeza dos entalhes	Corte dos laminados
		
Limpeza dos laminados	Produção do adesivo	Preenchimento dos entalhes com adesivo
		
Aplicação do adesivo no laminado	Colocação dos laminados nos entalhes	

Figura 2.9 - Procedimento para a aplicação do reforço de CFRP segundo a técnica NSM (Dias, 2008).

Quando comparada com a técnica EBR, a técnica NSM apresenta algumas vantagens: por garantir uma maior área de colagem (ver Figura 2.11) confere um maior grau de fixação do CFRP ao betão. Este facto origina um retardamento do destacamento do CFRP ou até pode mesmo proporcionar a rotura do elemento reforçado; pelo facto do reforço estar inserido e não colado externamente garante uma maior proteção ao reforço face a atos de vandalismo, a impactos, a temperaturas elevadas e à ação de agentes ambientais adversos; em termos da execução do reforço refira-se que, ao contrário do que acontece na técnica EBR, usando a técnica NSM não é necessário efetuar o tratamento da superfície de betão a reforçar (apenas é necessário proceder à abertura dos entalhes).

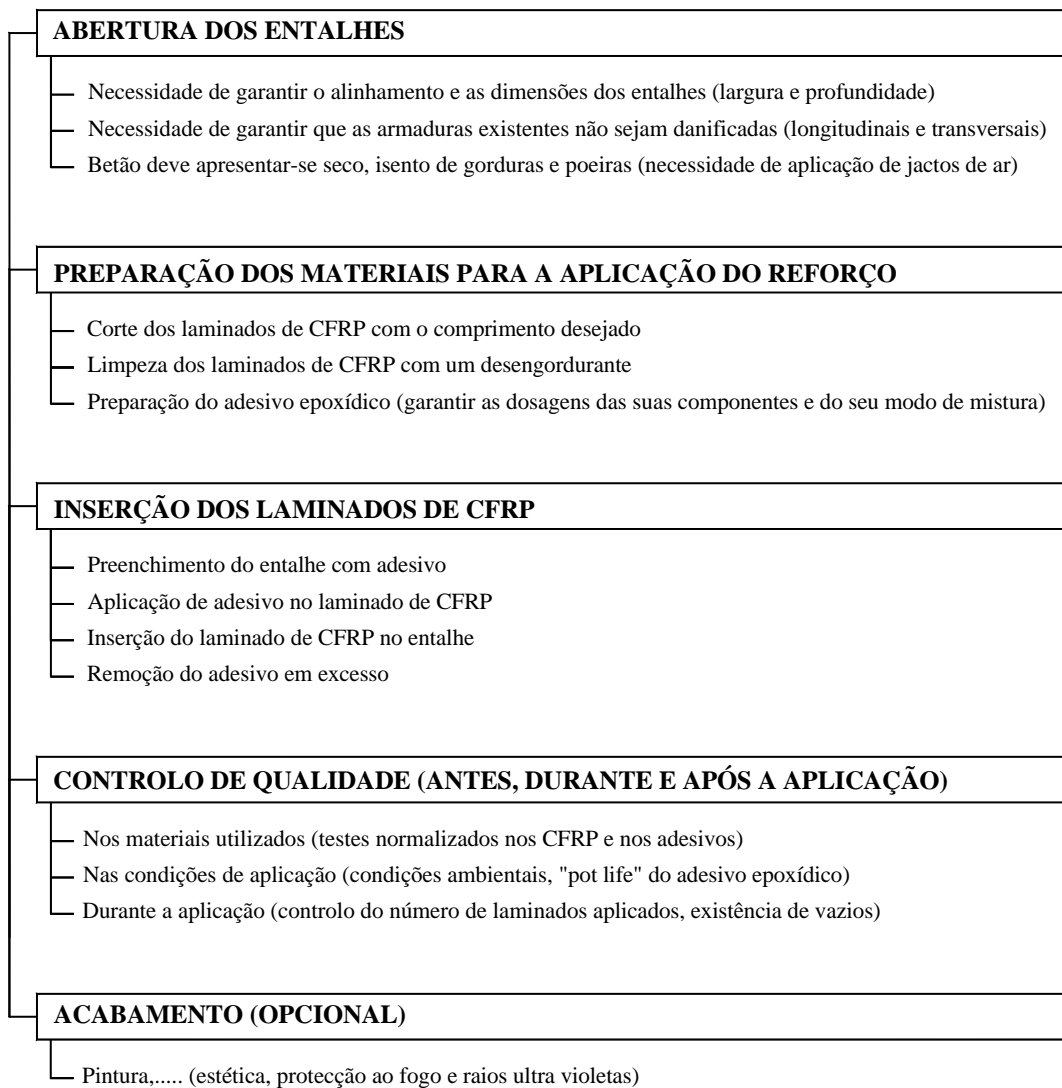


Figura 2.10 - Princípios de aplicação do reforço com CFRP utilizando a técnica da inserção (NSM) (Dias, 2008).

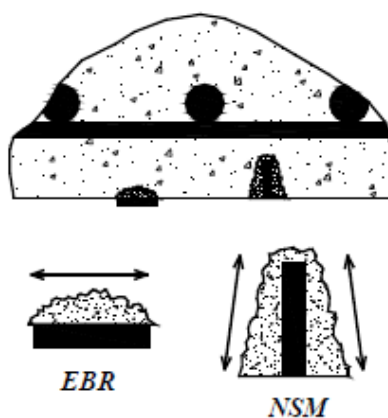


Figura 2.11 - Grau de ancoragem conferido pelas técnicas EBR e NSM (Dias (2008) adaptado de Carolin (2003)).

Dias e Barros (2010) realizaram uma investigação experimental onde compararam o grau de eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP com a técnica EBR usando mantas de CFRP quando aplicadas no reforço ao corte de vigas de betão armado. No total foram ensaiadas à flexão em três pontos de carga até à rotura 15 vigas com secção transversal em T (Figura 2.12): uma viga sem qualquer reforço ao corte (C-R); uma viga com estribos $\phi 6//112,5$ mm (viga 7S-R com ρ_{sw} de 0,28%); uma viga com estribos $\phi 6//300$ mm (viga 2S-R com ρ_{sw} de 0,10%); doze vigas contendo estribos $\phi 6//300$ mm (ρ_{sw} de 0,10%) e reforçadas ao corte com distintas soluções de CFRP. Destas doze vigas com estribos $\phi 6//300$ mm reforçadas ao corte com CFRP, em nove o reforço foi aplicado usando a técnica NSM com laminados de CFRP (foram testadas 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 o reforço foi aplicado usando a técnica da colagem externa (EBR) com mantas de CFRP. Assim, para cada percentagem de laminados de CFRP inseridos testada foi concebida uma solução de reforço de CFRP colado externamente.

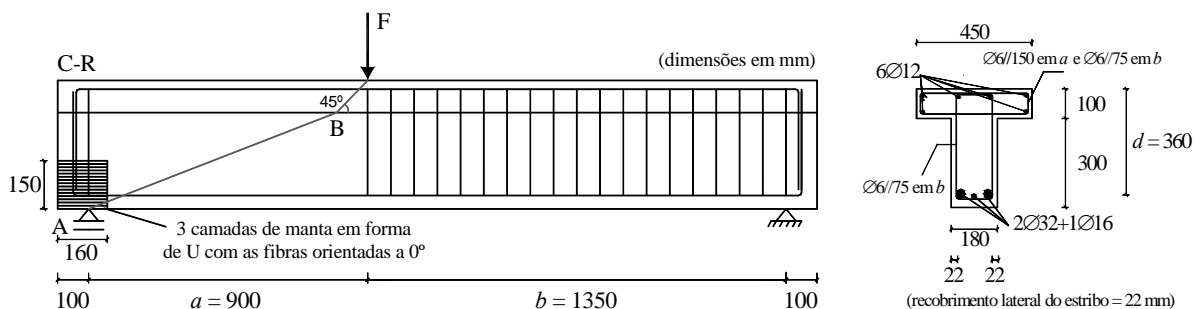


Figura 2.12 - Geometria das vigas da série B ensaiadas por Dias e Barros (2010) (dimensões em mm).

O pré-dimensionamento das vigas foi efetuado de forma a terem rotura por corte no vão de corte a (Figura 2.12) e a obtenção da maior percentagem de CFRP aplicada nas vigas, teve como princípio impor que estas vigas tivessem uma capacidade de carga máxima semelhante à da viga 7S-R (viga com $\phi 6//112,5$ mm no vão de corte a). Os reforços de CFRP foram aplicados no vão de corte a distribuídos ao longo da linha AB (Figura 2.12), tendo o ponto B sido obtido considerando uma degradação da carga a 45° . Refira-se que a diferença entre as vigas ensaiadas estava apenas no vão de corte a , concretamente nos elementos aí colocados para resistir ao esforço transversal. Os laminados utilizados nesta série de vigas tinham uma secção transversal de $1,4 \times 9,5$ mm², enquanto que para o caso das mantas de CFRP foi adotada a solução de faixas discretas em forma de U, com as fibras orientadas a 90°

relativamente ao eixo da viga, e com dimensões de 0,176 mm de espessura e 60 mm de largura. Na Figura 2.13 apresentam-se as soluções de reforço testadas por Dias e Barros (2010).

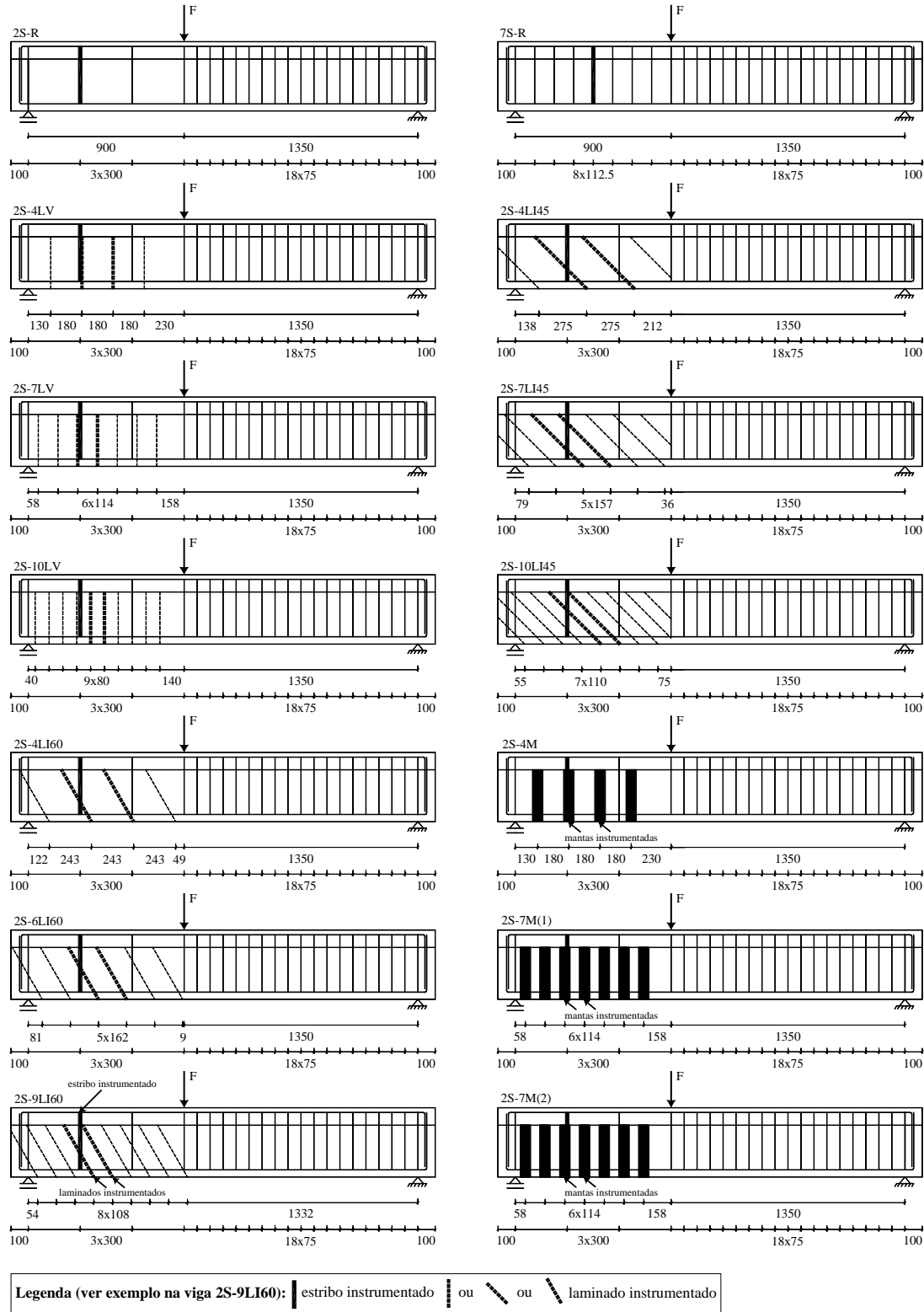


Figura 2.13 - Localização dos estribos de aço (traço cheio), laminados (tracejado) e mantas de CFRP (Dias e Barros, 2010).

Os resultados obtidos no programa experimental desenvolvido por Dias e Barros (2010) permitiram concluir que a técnica NSM com laminados de CFRP, independentemente da orientação e da percentagem do CFRP, foi mais eficaz que a técnica EBR com mantas de CFRP. Com efeito, tendo como base o valor da capacidade de carga máxima da viga não reforçada (viga 2S-R), as soluções com laminados inseridos conduziram a um aumento médio da capacidade máxima de carga de 30,3%, enquanto que as mantas coladas externamente conduziram a um aumento médio da capacidade máxima de carga de 10,4%. Verifica-se assim que o aumento médio proporcionado pela técnica EBR foi cerca de um terço do aumento médio proporcionado pela técnica NSM. Na Figura 2.14 apresenta-se o grau de eficácia do reforço de CFRP, quantificado em termos do aumento percentual da capacidade de carga máxima obtido nas vigas reforçadas quando comparado com a viga não reforçada, para as várias soluções de reforço testadas.

De acordo com os valores registados nos extensómetros colados nos CFRP (Figura 2.14), o valor médio da extensão máxima registada foi de 8,4‰ nas vigas reforçadas com laminados inseridos e 6,5‰ para o caso das vigas reforçadas com mantas coladas externamente. Desta forma, os autores verificaram que a técnica NSM conseguiu mobilizar melhor as elevadas potencialidades dos reforços de CFRP.

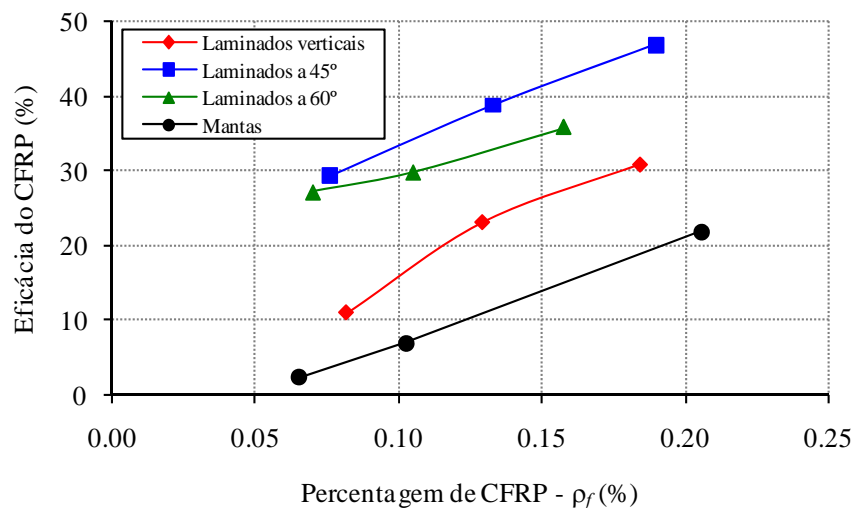
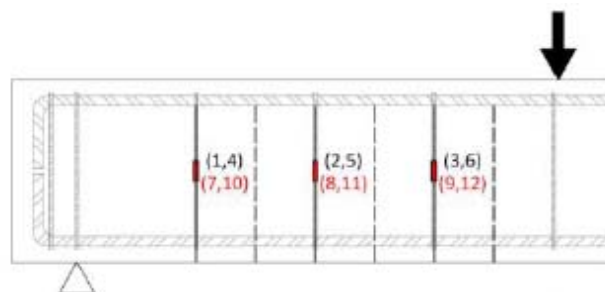


Figura 2.14 - Comparação do grau de eficácia do CFRP (Dias e Barros, 2010).

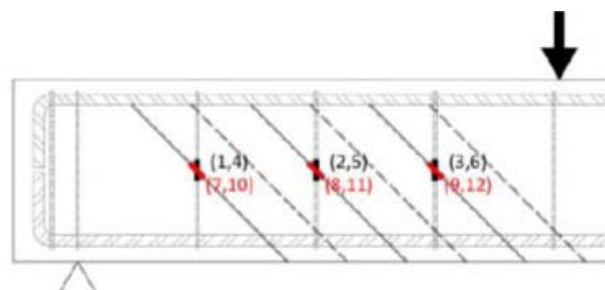
Cisneros *et al.* (2012) realizaram um estudo experimental sobre o reforço ao corte de vigas de betão armado segundo a técnica NSM, onde analisaram variáveis como: o tipo de CFRP, a orientação do reforço de CFRP e o espaçamento entre os elementos de CFRP. Foram testadas 17 vigas de betão armado de secção transversal rectangular com $200 \times 350 \text{ mm}^2$, com 3,75 m

de comprimento. Estes autores adotaram as seguintes soluções de reforço: inserção de varões ou de laminados de CFRP; reforço de CFRP inserido na vertical (90°) ou a 45°; espaçamento entre CFRP's consecutivos de 115 mm (6 varões ou 6 laminados de CFRP em cada face da viga) ou 230 mm (3 varões ou 3 laminados de CFRP em cada face da viga) ao longo do vão de corte. Os varões de CFRP tinham 8 mm de diâmetro e 30 cm de comprimento, enquanto que os laminados de CFRP tinham uma secção transversal de $2,5 \times 15 \text{ mm}^2$ e um comprimento de 30 cm.

As soluções de reforço com 6 varões ou 6 laminados de CFRP (inseridos na vertical ou a 45°) adotadas neste estudo são apresentadas na Figura 2.15.



a) Reforço ao corte com 6 varões ou 6 laminados de CFRP inseridos na vertical



b) Reforço ao corte com 6 varões ou 6 laminados de CFRP inseridos a 45°

Figura 2.15 - Soluções de reforço adotadas por Cisneros *et al.* (2012).

As vigas foram sujeitas a ensaios à flexão em três pontos de carga e foi adotada uma estratégia para numa mesma viga se efetuarem dois tipos de ensaio. Assim, o esquema estrutural do primeiro ensaio da viga está representado na Figura 2.16a), enquanto que o esquema estrutural do segundo ensaio da mesma viga está representado na Figura 2.16b). Na Tabela 2.3 apresentam-se as propriedades das vigas ensaiadas por Cisneros *et al.* (2012) e os resultados obtidos em termos de força máxima de corte e de ganho de resistência ao corte conferido pelo CFRP.

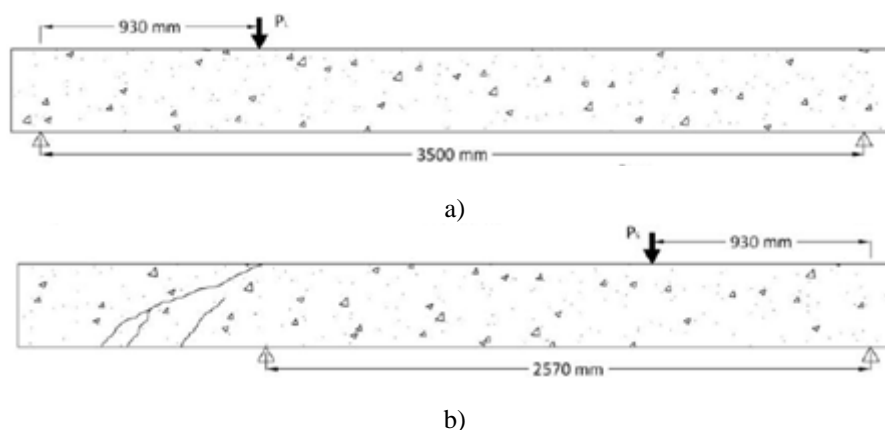


Figura 2.16 - Esquema dos ensaios realizados por Cisneros *et al.* (2012).

Tabela 2.3 - Propriedades das vigas ensaiadas e resultados dos ensaios realizados por Cisneros *et al.* (2012).

Vigas	Reforço de CFRP	Orientação do CFRP [°]	Espaçamento do CFRP [mm]	Força máxima de corte [kN]	Ganho de resistência ao corte [%]
Referência	-	-	-	113,97	-
B90-6a	Varões de CFRP	90	115	117,52	7,60
B90-6b				117,58	
B90-3a	Varões de CFRP	90	230	170,52	49,72
B90-3b				163,44	
B45-6a	Varões de CFRP	45	115	155,66	53,17
B45-6b				189,19	
B45-3a	Varões de CFRP	45	230	180,99	75,66
B45-3b				212,86	
S90-6a	Laminados de CFRP	90	115	117,07	13,58
S90-6b				131,67	
S90-3a	Laminados de CFRP	90	230	188,02	50,34
S90-3b				147,35	
S45-6a	Laminados de CFRP	45	115	173,56	68,49
S45-6b				206,21	
S45-3a	Laminados de CFRP	45	230	183,82	80,47
S45-3b				221,01	

Cisneros *et al.* (2012) verificaram que o reforço de CFRP orientado a 45° foi mais eficaz do que quando colocado na vertical; que o aumento da resistência ao corte das vigas foi mais

evidente quando se reduziu o espaçamento entre os elementos de reforço; que os laminados obtiveram melhor desempenho do que os varões.

Com efeito, o aumento médio na resistência ao corte conferido pelo CFRP foi de 46,5% e de 53,2% para as vigas reforçadas com varões e com laminados de CFRP, respetivamente. Assim, o acréscimo de resistência ao corte registado nas vigas reforçadas com varões de CFRP foi, em média, cerca de 87% do registado nas vigas reforçadas com laminados de CFRP. Apesar de possuírem menor secção transversal (cerca de 34% da secção transversal dos varões), os laminados tinham maior perímetro de colagem (aproximadamente 40% superior ao dos varões) o que proporcionou uma ligação mais eficaz do CFRP ao betão. Relativamente à orientação do reforço, foi verificado um aumento médio de 30,3% e 69,4% na resistência ao corte para as vigas reforçadas com o CFRP a 90° e a 45°, respetivamente. Em relação ao espaçamento entre elementos de CFRP, foi registado um aumento médio de 35,7% e 64% na resistência ao corte para as vigas com um espaçamento do CFRP de 230 mm e 115 mm, respetivamente.

Em alternativa à técnica da colagem externa (EBR) e à técnica da inserção no betão de recobrimento (NSM), recentemente foi desenvolvida uma nova técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP: a técnica ETS que consiste na inserção de varões de CFRP em furos executados no betão, não no betão de recobrimento, mas numa profundidade superior à do betão de recobrimento (Figura 2.4d). Por forma a fixar os varões de CFRP ao betão é utilizado um adesivo epoxídico.

A técnica ETS apresenta algumas vantagens em relação às técnicas de reforço anteriormente referidas (EBR e NSM). Com efeito, ao contrário das técnicas EBR e NSM onde o CFRP é, respetivamente, colado à superfície e inserido no betão de recobrimento, na técnica ETS o CFRP é introduzido numa zona da secção da viga onde o betão, além de estar confinado, é potencialmente de melhor qualidade. O posicionamento do CFRP proporciona também uma maior segurança à ocorrência do fenómeno do destacamento do reforço. Adicionalmente, com o reforço de CFRP aplicado com a técnica ETS, existe uma maior resistência ao fogo, às condições ambientais adversas e garante uma maior proteção do reforço face a atos de vandalismo.

Chaallal *et al.* (2011) realizaram um estudo experimental sobre o reforço ao corte de vigas de betão armado com a técnica ETS, onde estudaram a eficácia desta técnica e compararam o seu

desempenho com o das técnicas EBR e NSM. Na Figura 2.17 estão representadas as técnicas de reforço ao corte utilizadas no programa experimental de Chaallal *et al.* (2011), através do qual foram avaliados os seguintes parâmetros: o grau de eficácia da técnica ETS, em comparação com o da técnica EBR com mantas de CFRP e com o da técnica NSM com varões de CFRP; a presença de armadura transversal (estribos de aço); e a percentagem de armadura transversal (espaçamento dos estribos). Foram testadas 12 vigas de betão armado com secção transversal em T com 4,52 m de comprimento e 406 mm de altura (a alma tinha 304 mm de altura e 152 mm de largura, enquanto que o banzo tinha 102 mm de altura e 508 mm de largura). Foram testadas três séries de vigas, a série SO que continha vigas sem presença de armadura transversal (estribos) e as séries S1 e S3 que englobavam vigas com estribos com 8 mm de diâmetro espaçados de 175 mm e 260 mm, respetivamente. Em cada uma das séries foi testada uma viga sem reforço de CFRP (vigas S0-CON, S1-CON e S3-CON), uma viga reforçada com a técnica ETS (vigas S0-ETS, S1-ETS e S3-ETS), uma viga reforçada com a técnica NSM (vigas S0-NSM, S1-NSM e S3-NSM) e uma viga reforçada com a técnica EBR (vigas S0-EBR, S1-EBR e S3-EBR).

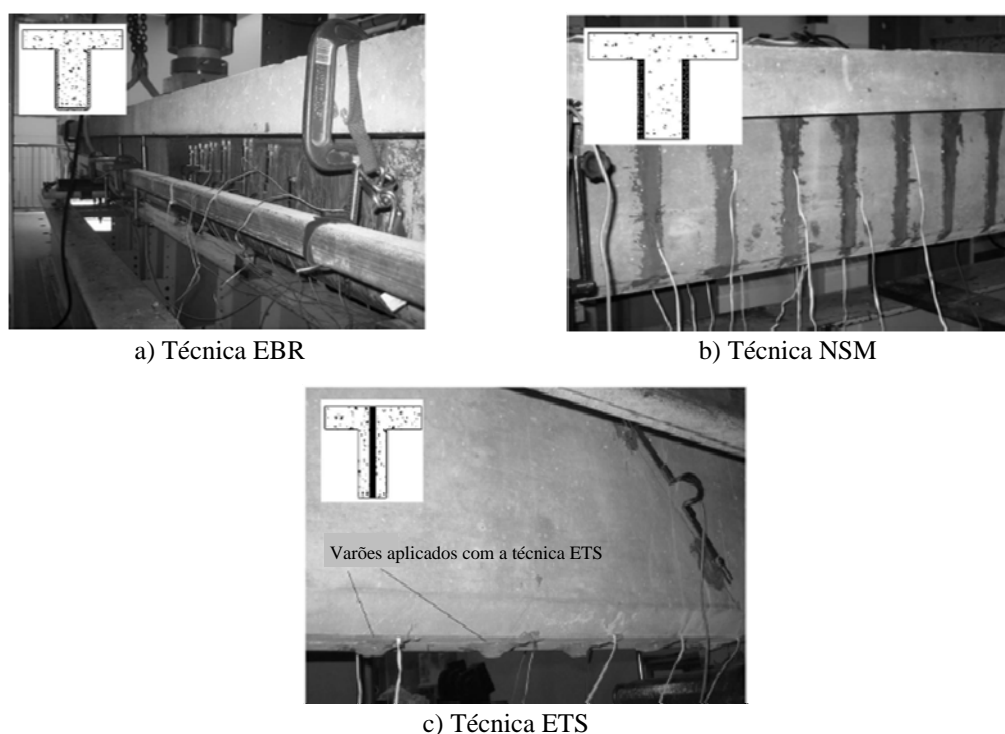


Figura 2.17 - Técnicas de reforço utilizadas por Chaallal *et al.* (2011).

O reforço ao corte foi executado com: varões de CFRP (revestidos com areia) com 9,5 mm e 12,7 mm de diâmetro, respetivamente para as vigas reforçadas com a técnica NSM e ETS. Os

varões de CFRP foram colocados com um espaçamento de 130 mm. Para as vigas reforçadas com a técnica EBR foram aplicadas de forma contínua mantas de CFRP (0,12 mm de espessura) coladas em forma de U.

As vigas foram testadas à rotura por intermédio da realização de ensaios à flexão em três pontos de carga (Figura 2.18). Os resultados deste programa experimental estão apresentados na Tabela 2.4.

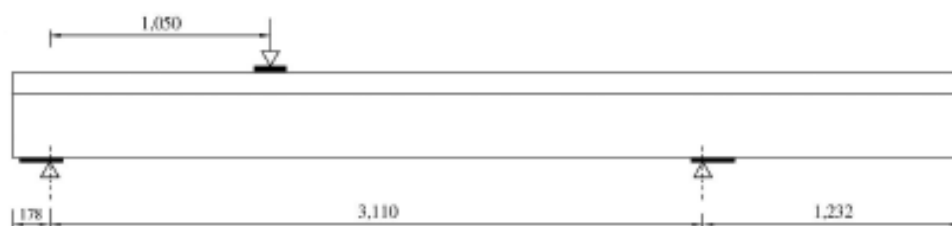


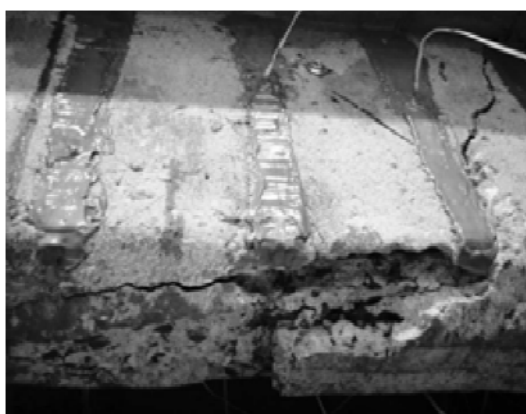
Figura 2.18 - Esquema do ensaio realizado por Chaallal *et al.* (2011) (dimensões em mm).

Tabela 2.4 - Resultados experimentais das vigas ensaiadas por Chaallal *et al.* (2011).

Técnica de reforço	Viga	Carga de rotura [kN]	Resistência ao corte [kN]	Resistência ao corte conferida pelos estribos [kN]	Resistência ao corte conferida pelo CFRP [kN]	Ganho de resistência ao corte conferido pelo CFRP [%]	Deslocamento no ponto de aplicação da carga [mm]	Modo de rotura
Sem reforço	S0-CON	122,7	81,3	0,0	0,0	0	2,6	Corte
	S1-CON	350,6	232,2	150,9	0,0	0	11,9	Corte
	S3-CON	294,0	194,7	98,5	0,0	0	11,2	Corte
EBR	S0-EBR	181,2	120,0	0,0	38,7	48	4,2	Corte
	S1-EBR	378,5	250,7	150,9	18,5	8	14,5	Corte
	S3-EBR	335,2	222,0	98,5	27,3	14	11,3	Corte
NSM	S0-NSM	198,0	131,1	0,0	49,8	61	6,1	Corte
	S1-NSM	365,0	241,7	150,9	9,5	4	13,1	Corte
	S3-NSM	380,0	251,6	98,5	56,9	29	11,7	Corte
ETS	S0-ETS	273,0	180,8	0,0	99,5	122	9,9	Corte
	S1-ETS	397,0	262,9	150,9	30,7	13	15,9	Flexão
	S3-ETS	425,5	281,8	98,5	87,1	45	15,2	Flexão

Da análise da Tabela 2.4 conclui-se que as vigas reforçadas com a técnica ETS, independentemente da existência ou não de armaduras transversais e independentemente da

percentagem de armadura transversal, tiveram melhor desempenho que as vigas reforçadas com a técnica EBR e que as vigas reforçadas com a técnica NSM. Com efeito, o aumento médio na capacidade resistente ao esforço transversal atingiu 23% para as vigas reforçadas com a técnica EBR, 31% para as vigas reforçadas com a técnica NSM e 60% para as vigas reforçadas com a técnica ETS. As vigas reforçadas com a técnica EBR atingiram a rotura por destacamento do CFRP, enquanto que o modo de rotura das vigas reforçadas com a técnica NSM (Figura 2.19a) foi o destacamento do betão de recobrimento dos estribos de aço. O modo de rotura nas vigas reforçadas segundo a técnica ETS foi principalmente à flexão (séries S1 e S3) (Figura 2.19b).



a) Modo de rotura da viga S0-NSM



b) Modo de rotura da viga S1-ETS

Figura 2.19 - Modos de rotura de algumas das vigas ensaiadas por Chaallal *et al.* (2011).

Apesar das vantagens enunciadas anteriormente da técnica ETS face às técnicas EBR e NSM, existe um claro inconveniente associado a esta técnica que se prende com a dificuldade da execução dos furos para introdução do reforço. Em termos práticos, para se poder aplicar esta técnica de reforço é necessário aceder aos elementos estruturais não nas faces laterais, mas sim na parte superior ou na parte inferior da viga. Além disso, é necessário conhecer o local exato onde se situam as armaduras existentes na viga a reforçar para não ocorrer danificação das mesmas.

2.3 - COMPORTAMENTO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO REFORÇADAS AO CORTE COM LAMINADOS DE CFRP INSERIDOS

Tendo em conta o tema da presente dissertação, a secção seguinte será dedicada ao comportamento estrutural de vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de

CFRP inseridos. Esta secção será baseada na extensa investigação que tem vindo a ser realizada nesta área do conhecimento no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

2.3.1 - Comportamento geral de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos

O comportamento típico de uma viga de betão armado reforçada ao corte com inserção de laminados de CFRP, quando o reforço é efetuado antes da ocorrência de qualquer dano na viga, apresenta duas fases (ver Figura 2.20). Numa primeira fase (Fase I), o diagrama de comportamento da viga reforçada com CFRP acompanha o da viga não reforçada, até ao momento em que se iniciam as fendas de corte na viga não reforçada. A partir deste nível de carregamento (início da Fase II), a presença de CFRP juntamente com a dos estribos de aço proporcionam a existência de um mecanismo mais eficaz de contenção ao desenvolvimento das fendas de corte, garantindo um aumento de rigidez comparativamente ao que acontece na viga sem CFRP. A segunda fase termina quando a viga reforçada com CFRP atinge a sua capacidade máxima resistente. Nesta fase a viga apresenta uma capacidade de carga superior à correspondente viga não reforçada (Dias, 2008).

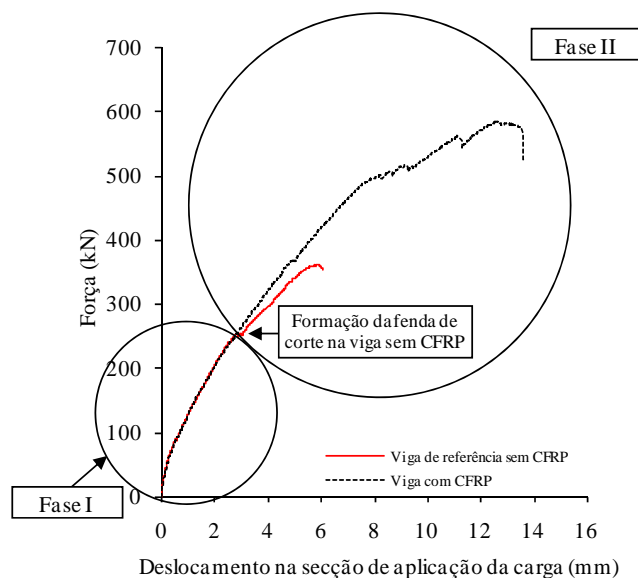


Figura 2.20 - Comportamento de uma viga de betão armado reforçada ao corte por inserção de laminados de CFRP (comparação com uma viga não reforçada) (Dias, 2008).

2.3.2 - Parâmetros que influenciam a eficácia da técnica de reforço por inserção de laminados de CFRP

Na investigação realizada por Dias (2008), foi possível identificar vários parâmetros que influenciam a eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP quando aplicada no reforço ao corte de vigas de betão armado, designadamente, a classe de resistência do betão, a orientação e a percentagem de CFRP e a percentagem de armadura transversal.

Dias (2008) testou nove configurações de reforço ao corte com laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM em vigas com $f_{cm} = 18,6$ MPa (f_{cm} é o valor médio da resistência à compressão do betão à data do ensaio das vigas), em vigas com $f_{cm} = 39,7$ MPa e em vigas com $f_{cm} = 59,4$ MPa. O valor médio da contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal (V_f) das várias configurações de reforço testadas foi de 35,4 kN, 54,2 kN e 97,0 kN para as vigas com f_{cm} igual a 18,6 MPa, 39,7 MPa e 59,4 MPa, respetivamente. Ou seja, tendo como base o valor obtido nas vigas com f_{cm} igual a 18,6 MPa, as mesmas soluções de reforço aplicados a vigas com f_{cm} igual a 39,7 MPa e 59,4 MPa tiveram desempenho 1,5 e 2,7 vezes superior, respetivamente. Na Figura 2.21 apresenta-se a linha de tendência da contribuição V_f com a resistência do betão (f_{cm}), onde é evidente que a eficácia da técnica em análise é claramente dependente da qualidade do betão. Apesar desta constatação foi também possível verificar que para betões de classe de resistência baixa é possível obter consideráveis acréscimos na resistência ao corte das vigas.

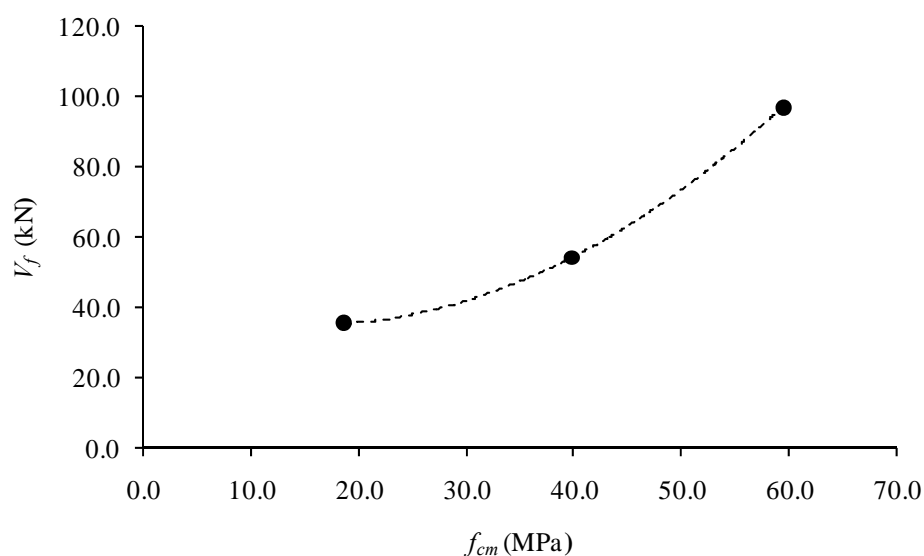


Figura 2.21 - Variação de V_f com o aumento da classe de resistência do betão (f_{cm}) (Dias, 2008).

O desempenho do CFRP em função da qualidade do betão anteriormente referido está diretamente relacionado com os modos de rotura que foram verificados nas vigas. Nas vigas de betão com a classe de resistência média 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 o modo de rotura foi o mesmo, mas pelo facto de o betão ser de classe mais baixa, a rotura ocorreu mais prematuramente do que nos casos das vigas anteriormente referidas. Para as vigas da classe de resistência mais elevada 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). Estes modos de rotura, relativamente aos ocorridos nas vigas com betões de classes de resistência mais baixas, proporcionaram aumentos consideráveis no rendimento do reforço de CFRP e no desempenho estrutural das vigas reforçadas.

Outro parâmetro que influenciou os modos de rotura das vigas foi a percentagem de CFRP. Com efeito, nas vigas com elevada percentagem de CFRP pode ocorrer um efeito de grupo, proporcionando o destacamento de uma parede de betão com CFRP (não existe a cedência individualizada do CFRP atravessado pela fenda de rotura de corte). Por este motivo, concluiu-se que existe um limite mínimo para o espaçamento dos CFRP's, abaixo do qual não se verifica qualquer vantagem em termos de capacidade resistente da viga.

A eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado também é influenciada pela percentagem de armadura transversal existente (estribos). Com efeito, no trabalho de Dias (2008) foram aplicadas quinze soluções de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos a vigas com uma percentagem de armadura transversal de 0,10% ($\rho_{sw} = 0,10\%$) e a vigas com $\rho_{sw} = 0,16\%$ - $0,17\%$. De acordo com o representado na Figura 2.22, existe uma diminuição da efetividade do reforço de CFRP com o aumento da percentagem de armadura transversal.

Tal como referido anteriormente, a percentagem de CFRP e a orientação do CFRP são também parâmetros que influenciam a eficácia do reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos. 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 2.23) e que os laminados inclinados foram mais eficazes que os laminados verticais (Figura 2.24). Na Figura 2.23 e 2.24 o parâmetro ε_{fe} diz respeito à extensão efetiva do CFRP (nível de mobilização do CFRP na altura da rotura da viga). Estas

constatações do efeito da percentagem e da orientação dos laminados de CFRP na eficácia do reforço podem também ser observadas na Figura 2.14.

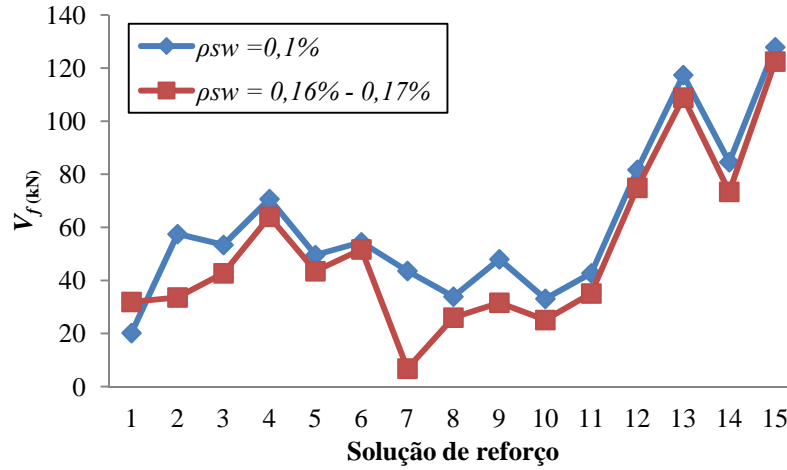


Figura 2.22 - Efeito da percentagem de estribos na eficácia do reforço de CFRP.

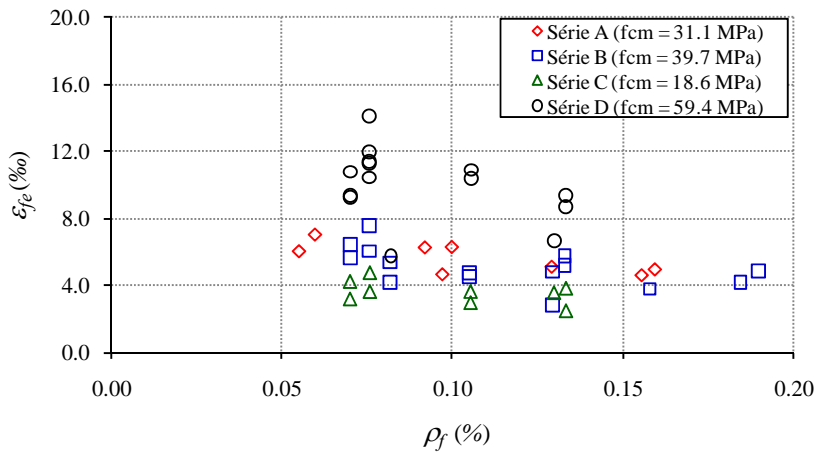


Figura 2.23 - Efetividade do reforço de CFRP (ϵ_{fe}) em função da percentagem ρ_f (Dias, 2008).

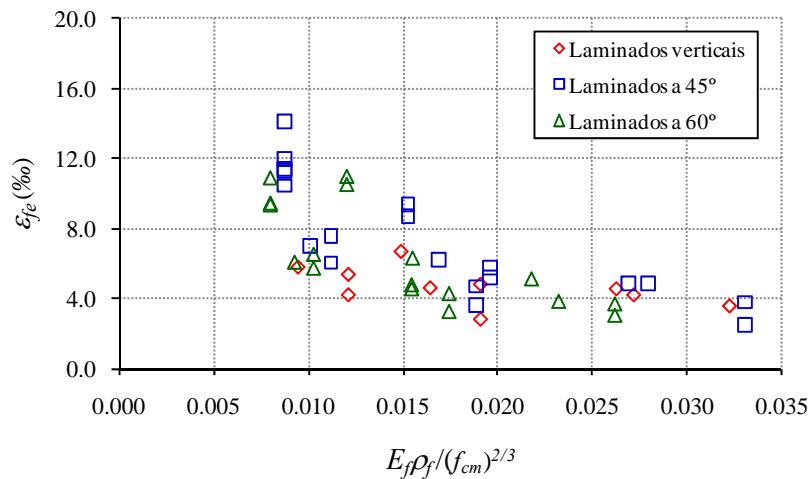


Figura 2.24 - Efetividade do reforço de CFRP (ϵ_{fe}) em função da orientação do CFRP (Dias, 2008).

No seguimento do trabalho desenvolvido por Dias (2008) foi efetuado um trabalho experimental (Costeira, 2010) onde foi avaliado o desempenho da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas altas. Com efeito, foram ensaiadas quatro vigas de betão armado, de secção transversal em T com 600 mm de altura e com a geometria indicada na Figura 2.25. As vigas foram sujeitas a ensaios à flexão em três pontos de carga até à rotura e os vãos de corte a e b tinham dimensões de 1400 mm e 2800 mm, respetivamente. Das quatro vigas anteriormente referidas, uma viga era de referência sem reforço de CFRP (3S-R) e as restantes três foram reforçadas ao corte com diferentes soluções em termos de orientação e de profundidade dos laminados de CFRP inseridos (vigas 3S-4LV-S, 3S-4LI-S, 3S-4LI-P). Nas vigas 3S-4LV-S e 3S-4LI-S, os laminados foram inseridos à superfície (entalhes efetuados com 15 mm de profundidade), enquanto que na viga 3S-4LI-P os laminados, foram inseridos em entalhes com uma profundidade (35 mm) superior à espessura do betão de recobrimento das armaduras transversais (22 mm). O comprimento dos laminados da viga 3S-4LI-P foi de 527 mm, enquanto que o comprimento dos laminados da viga 3S-4LI-S foi de 634 mm. Na viga 3S-4LV-S os laminados foram inseridos na vertical e nas vigas 3S-4LI-S e 3S-4LI-P os laminados foram inseridos em entalhes com uma inclinação de 52°.

Na Tabela 2.5 e na Figura 2.25 está registada a informação relativa aos sistemas de reforço ao corte adotados nas vigas testadas por Costeira (2010).

Tabela 2.5 - Sistemas de reforço ao corte adotados nas vigas ensaiadas por Costeira (2010).

Viga	Sistema de reforço ao corte no vão de corte a				
	Material	Quantidade	Porcentagem [%]	Espaçamento [mm]	Ângulo [°]
3S-R	Estribos de aço	3 ϕ 6	0,09		90
3S-4LV-S	Estribos de aço	3 ϕ 6	0,09		90
	Laminados de CFRP (NSM)	2 \times 4 laminados (1,4 \times 10 mm ²)	0,044		90
3S-4LI-S	Estribos de aço	3 ϕ 6	0,09	350	90
	Laminados de CFRP (NSM)	2 \times 4 laminados (1,4 \times 10 mm ²)	0,056		52
3S-4LI-P	Estribos de aço	3 ϕ 6	0,09		90
	Laminados de CFRP (NSM)	2 \times 4 laminados (1,4 \times 10 mm ²)	0,056		52

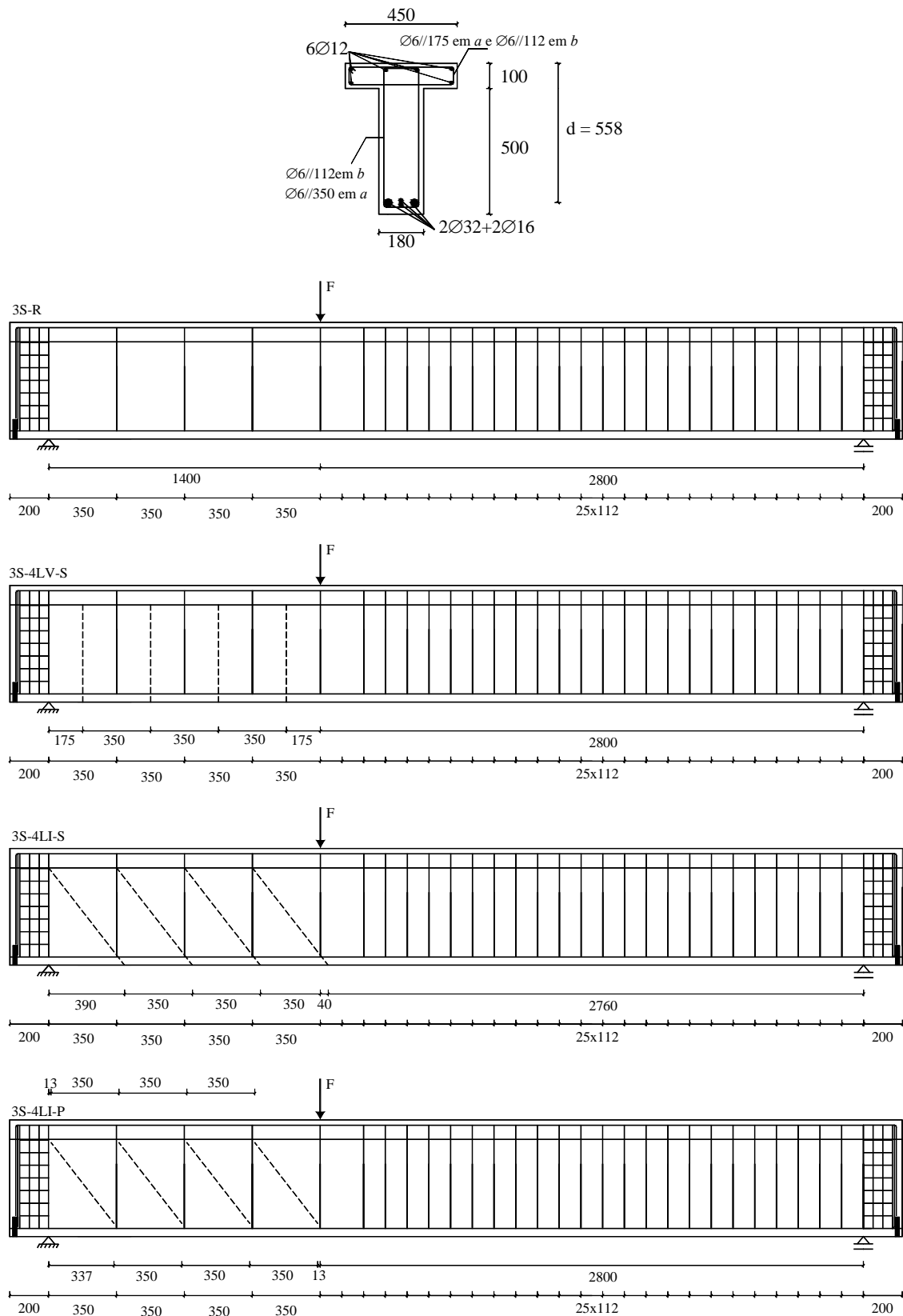


Figura 2.25 - Vigas testadas por Costeira (2010) (dimensões em mm).

Na Tabela 2.6 estão representados os principais resultados em termos da força máxima ($F_{m\acute{a}x}$), do acréscimo de carga máxima proporcionado pelo reforço de CFRP e do deslocamento no ponto de aplicação da carga referente a $F_{m\acute{a}x}$ ($u_{F_{m\acute{a}x}}$).

Na Figura 2.26 apresentam-se as curvas de comportamento correspondentes à relação entre a força aplicada e o deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas testadas.

Tabela 2.6 - Principais resultados em termos de capacidade de carga de cada viga (Costeira, 2010).

Viga	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\Delta F_{m\acute{a}x}/F_{m\acute{a}x}^{3S-R}$ [%]	$F_{m\acute{a}x}/F_{m\acute{a}x}^{3S-R}$	$u_{F_{m\acute{a}x}}$ [mm]
3S-R	331,4	0,0	1,00	10,68
3S-4LV-S	401,8	21,2	1,21	11,78
3S-4LI-S	491,7	48,4	1,48	13,35
3S-4LI-P	445,9	34,6	1,35	13,01

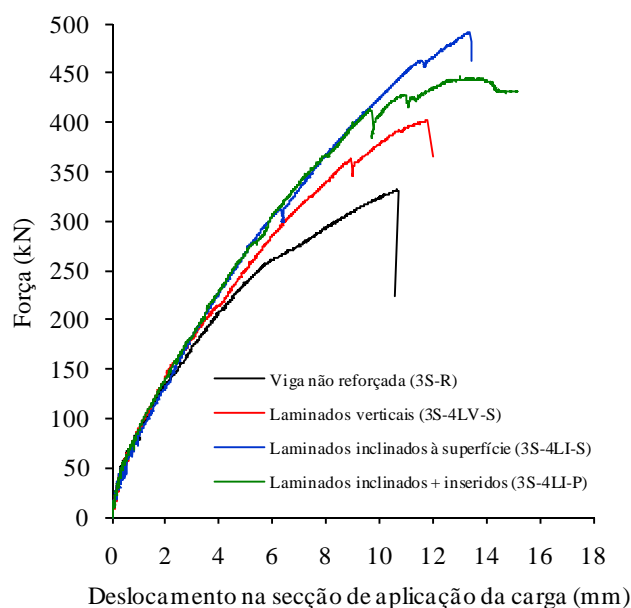


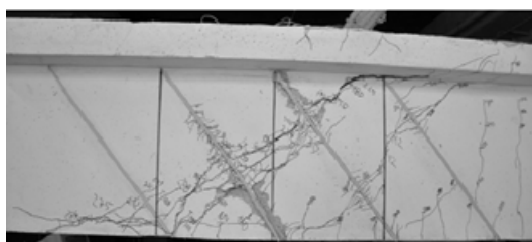
Figura 2.26 - Força vs. Deslocamento na secção de aplicação da carga (Costeira, 2010).

Costeira (2010) verificou que, tendo em consideração o comportamento da viga de referência 3S-R, a presença dos reforços de CFRP provocou um aumento da rigidez, um aumento da capacidade de carga máxima ($F_{m\acute{a}x}$) e um aumento da deformação na rotura ($u_{F_{m\acute{a}x}}$). As soluções de reforço adotadas conduziram a um acréscimo de carga máxima que variou entre os 21% e os 48%. Por sua vez, os acréscimos de deformação variaram entre os 10% e os 25%. Em termos de orientação do reforço de CFRP, constatou-se que as soluções com laminados

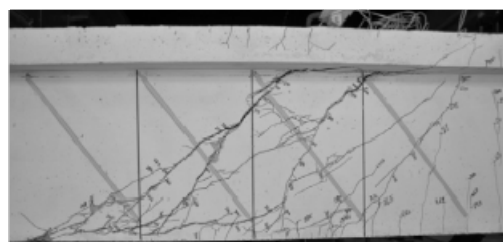
inclinados foram mais eficazes do que as soluções com laminados na vertical. Os valores da carga máxima ($F_{máx}$) e da flecha $u_{F_{máx}}$ da viga 3S-4LV-S foram, respetivamente, 82% e 88% dos valores registados na viga 3S-4LI-S.

Relativamente à profundidade de inserção dos laminados de CFRP, o autor concluiu que, a solução de reforço adotada na viga 3S-4LI-P (laminados inseridos a uma profundidade superior à do betão de recobrimento) não foi tão eficaz como a solução da viga 3S-4LI-S (laminados inseridos à superfície). Os valores da carga máxima ($F_{máx}$) e da flecha da viga 3S-4LI-P foram, respetivamente, 91% e 97% dos valores registados na viga 3S-4LI-S.

O modo de rotura, das vigas com laminados de CFRP inseridos à superfície, na vertical e a 52° , foi devido à cedência dos laminados centrais atravessados pela fenda de rotura de corte (ver Figura 2.27-a)), enquanto que, na viga com laminados inseridos a uma maior profundidade, ocorreu a rotura do laminado atravessado pela fenda de rotura de corte (ver Figura 2.27-b)).



a) Pormenores do modo de rotura da viga 3S-4LI-S



b) Pormenores do modo de rotura da viga 3S-4LI-P

Figura 2.27 - Modos de rotura das vigas com laminados de CFRP inseridos inclinados a 52° (Costeira, 2010).

Os resultados obtidos na investigação realizada por Costeira (2010) permitiram verificar que efetivamente a técnica de reforço ao corte com inserção de laminados de CFRP (técnica NSM) é bastante eficaz no caso de vigas de betão armado com altura elevada.

2.4 - COMPORTAMENTO À FADIGA DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO REFORÇADAS COM MATERIAIS COMPÓSITOS DE CFRP

2.4.1 - Considerações gerais

O termo fadiga, pode ser definido como um processo de dano gradual causado por tensões cíclicas, de difícil observação e que provoca mudanças na capacidade resistente do material.

A fadiga pode ser entendida como um modo de rotura que envolve a formação e o crescimento progressivo de uma fissura em qualquer elemento estrutural submetido a um carregamento variável no tempo (carregamento cíclico). A rotura por fadiga do material ocorre para um nível de tensão abaixo do valor que levaria à rotura quando submetido a um carregamento estático. Os carregamentos cíclicos que produzem fadiga são expressos em função das tensões máximas e mínimas aplicadas durante um determinado intervalo de tempo. Um ciclo de carregamento é definido como aquele que provoca uma variação de tensões entre o valor máximo e mínimo, regressando ao ponto inicial.

A deterioração progressiva e irreversível do material pode ocorrer após a aplicação de um número pequeno de ciclos, nos casos em que existem altos níveis de tensão, ou depois de mais de 10000 ciclos, quando o nível de tensão não é elevado. Hsu (1981) propôs uma classificação para a fadiga em estruturas de betão armado em função do espectro de carregamento cíclico a que estão sujeitas durante o seu período de vida útil (ver Tabela 2.7).

Tabela 2.7 - Tabela de classificação da fadiga em função do número de ciclos (Hsu, 1981).

Baixo ciclo			Alto ciclo				Altíssimo ciclo		
0	10^2	10^3	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9
Estruturas sujeitas a sismos			Pavimentos de aeroportos e pontes		Pontes e pavimentos em auto-estradas		Estruturas para escoamento de tráfego nas grandes cidades		Estruturas marinhas

Atualmente existe um número significativo de pontes e viadutos (estruturas sujeitas diariamente a cargas cíclicas provocadas pelo tráfego) que precisam de ser reparadas. Com efeito, este cenário está associado a um conjunto variado de circunstâncias já referidas na parte inicial deste capítulo. Uma das soluções possíveis para a resolução deste tipo de problemas é recorrer às técnicas de reforço com materiais compósitos de CFRP (Figura 2.28).

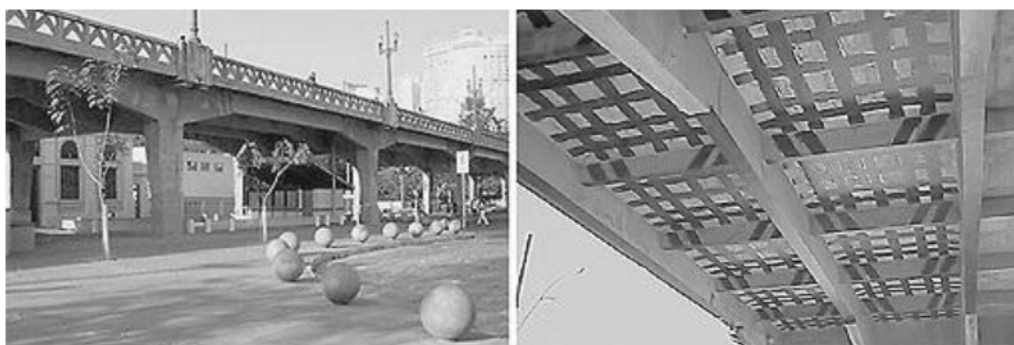


Figura 2.28 - Viaduto de Santa Teresa reforçado com CFRP (Arquez, 2010).

O período de tempo em que uma estrutura de betão armado consegue suportar um determinado carregamento cíclico pode ser aumentado por intermédio de uma intervenção de reforço com compósitos de CFRP. Com efeito, a presença do CFRP (estudos já realizados permitiram comprovar que os materiais de CFRP exibem melhor comportamento à fadiga do que o aço) permite uma redistribuição de tensões entre o aço e o CFRP, o que resulta em menores tensões na armadura de aço. A título de exemplo, na Tabela 2.8 apresentam-se resultados experimentais já obtidos sobre a melhoria do desempenho em termos de fadiga proporcionado pela presença dos reforços de CFRP.

Tabela 2.8 - Melhoria do desempenho à fadiga de vigas de betão armado devido à presença do reforço de CFRP (Kim e Heffernan, 2008).

Referência	Viga	Reforço	Carga máxima de fadiga		Rotura por fadiga	
			Carga [kN]	Nível [%]	nº de ciclos	Rácio ^(c)
Barnes e Mays (1999)	1	-	40	53 ^(a)	20×10 ³	95
	4	CFRP	40	53 ^(a)	1,9×10 ⁶	
Heffernan e Erki (2004)	NFa-M	-	98	70 ^(b)	290×10 ³	3,1
	CFa-M	CFRP	98	70 ^(b)	900×10 ³	
Masoud <i>et al.</i> (2005)	11-U	-	54	83 ^(b)	109×10 ³	2,1
	11-RII	CFRP	54	83 ^(b)	232×10 ³	

(a) Percentagem da carga máxima.

(b) Percentagem da carga correspondente à cedência das armaduras.

(c) Relação entre o número de ciclos que provocou a rotura da viga com CFRP e o número de ciclos que provocou a rotura da viga sem CFRP.

Embora o desempenho do CFRP no reforço de estruturas de betão armado sob carregamento monotónico tenha vindo a ser investigado intensamente, o comportamento à fadiga deste tipo de reforço é ainda relativamente pouco conhecido. Neste contexto, é de referir que a grande maioria dos estudos sobre o comportamento de elementos de betão armado reforçados com compósitos de CFRP sujeitos a carregamentos de fadiga estão relacionados com o reforço à flexão de vigas de betão armado usando a técnica EBR (Heffernan e Erki, 2004; Ekenel *et al.*, 2006; Kim e Heffernan, 2008) ou a técnica NSM (Yost *et al.*, 2007; Badawi e Soudki, 2009). Nas secções seguintes serão apresentados alguns estudos já efetuados no âmbito do reforço ao corte.

2.4.2 - Aplicação da técnica da colagem externa (EBR)

Até ao momento, a maior parte dos estudos experimentais realizados sobre o comportamento à fadiga de vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de CFRP dizem respeito à técnica da colagem externa. Neste contexto, de seguida, serão apresentados alguns desses trabalhos experimentais de forma a ilustrar o efeito da fadiga no comportamento estrutural das vigas, no desempenho do reforço de CFRP e nos modos de rotura.

Uma das alternativas de reforço ao corte de vigas de betão armado diz respeito à utilização de laminados de CFRP em forma de L, tal como representado na Figura 2.29. Com o objetivo de melhorar a aderência do reforço à superfície de betão, os referidos laminados (Figura 2.29) têm uma zona de extremidade rugosa.

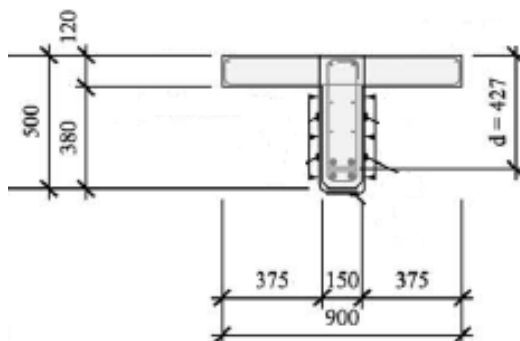


Figura 2.29 - Laminados pré-fabricados de CFRP em forma de L concebidos para o reforço ao corte de vigas de betão armado (Sika® CarboShear L®, 2003).

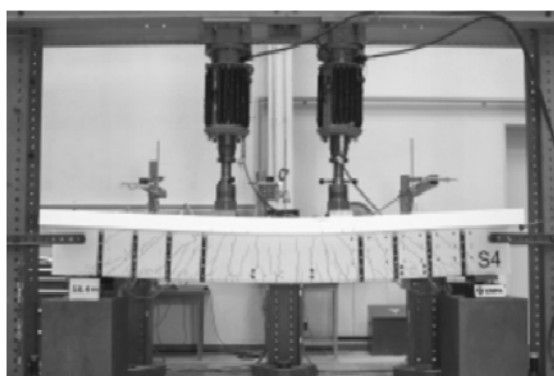
Vários programas experimentais (Czaderski, 2000; Czaderski, 2002) foram realizados no Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA) com vigas de betão armado, de secção em T, reforçadas ao corte com os mencionados laminados de CFRP pré-fabricados em forma de L. Os resultados obtidos nestas investigações demonstraram a aptidão deste tipo de laminados para o reforço ao corte de vigas de betão armado.

Czaderski e Motavalli (2004), com o objetivo de avaliar o desempenho à fadiga de vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de CFRP em forma de L, ensaiaram uma viga de betão armado (viga S6) com secção transversal em T representada na Figura 2.30. A viga foi submetida a cinco milhões de ciclos de carga com uma frequência de cerca de 4,4 Hz, sendo posteriormente levada à rotura por intermédio de um carregamento monotónico. Previamente, no âmbito de outro estudo, Czaderski (2002) testou uma viga semelhante à viga S6, a viga S4, mas que não foi submetida a carregamento cíclico (a viga S4 foi apenas submetida a um carregamento monotónico até à rotura, Figura 2.30). Os laminados utilizados tinham uma curvatura de 90° com raio interno de 25 mm, uma espessura de 1,4 mm (valor médio) e uma largura de 40 mm (Sika® CarboShear L®, 2003). Os laminados de CFRP em

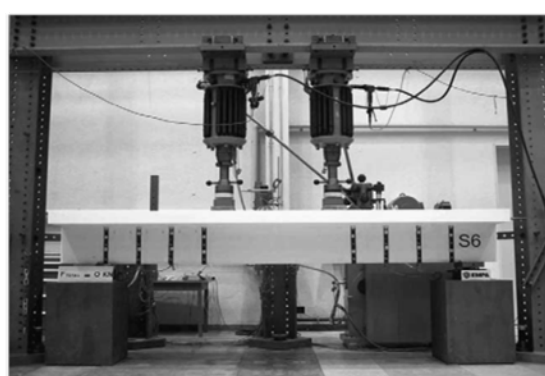
forma de L foram aplicados na alma da viga de betão armado, foram ancorados em furos efetuados no banzo e fixados nas partes laterais da alma, tendo sido sobrepostos na parte inferior da alma.



Secção transversal das vigas



Viga S4 (Czaderski, 2002)



Viga S6 (Czaderski e Motavalli, 2004)

Figura 2.30 - Viga S4 (Czaderski, 2002) e S6 (Czaderski e Motavalli, 2004).

Numa primeira fase, a viga S4 foi carregada gradualmente até atingir a carga $F_{total} = 450$ kN de forma a produzir um determinado padrão de fendilhação. Em seguida foi submetida a cinco milhões de ciclos de carga, com carga superior $F_{sup} = 450$ kN e inferior $F_{inf} = 300$ kN. Após o carregamento cíclico a viga foi submetida a um ensaio monotónico até à rotura. Os níveis de carga do carregamento cíclico foram fixados de modo a não provocar a rotura prematura por fadiga dos estribos de aço. A carga superior $F_{sup} = 450$ kN correspondia a 59% da $F_{máx}$, enquanto a menor carga $F_{inf} = 300$ kN correspondia a 39% da $F_{máx}$ ($F_{máx} = 765$ kN foi a carga máxima alcançada na viga S4, determinada durante o teste à rotura).

Os resultados do ensaio de fadiga da viga S6 permitiram concluir que os laminados de CFRP em forma de L permaneceram intactos durante os cinco milhões de ciclos de carga, demonstrando, assim, a sua aptidão para o reforço ao corte de vigas betão armado com secção transversal em T em que o fenómeno de fadiga possa ser determinante. O ensaio à rotura da

viga S6 mostrou que a carga máxima atingida (Figura 2.31), assim como o modo de rotura (esmagamento do betão com as armaduras longitudinais em cedência), coincidiram com o verificado na viga S4 (viga sem qualquer carga de fadiga).

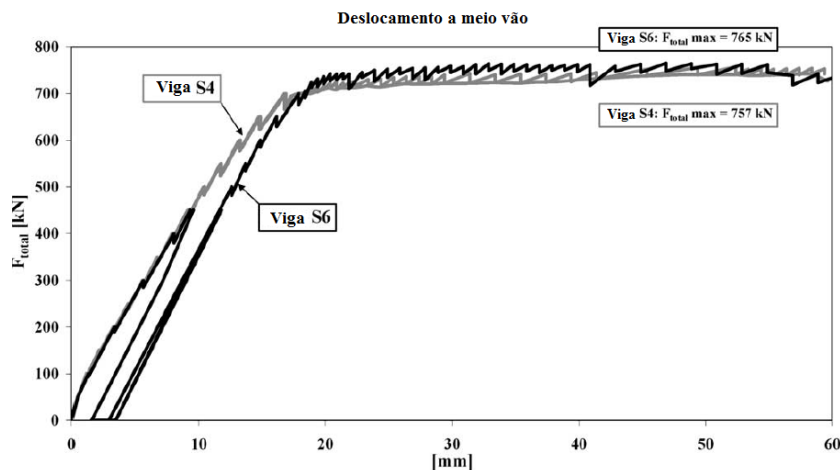


Figura 2.31 - Deslocamentos a meio vão da viga S6 durante todas as fases do teste em comparação com a viga S4 (Czaderski e Motavalli, 2004).

Chaallal *et al.* (2009) efetuaram um programa de ensaios experimentais, para avaliar o comportamento à fadiga de vigas de betão armado reforçadas ao corte com mantas de CFRP coladas externamente. Neste contexto, foram avaliados parâmetros como a percentagem de CFRP e a existência ou não de armadura transversal. No total foram ensaiadas seis vigas de betão armado de secção transversal em T (Figura 2.32) com 4,52 m de comprimento. Como armadura longitudinal foram adotados quatro varões com 25,2 mm de diâmetro distribuídos em duas camadas. Nas vigas que continham armadura transversal, esta era constituída por estribos de aço com diâmetro de 8 mm que estavam espaçados de 175 mm. As mantas de CFRP foram aplicadas continuamente em forma de U, ao longo da zona de teste. A espessura do CFRP utilizado era, respetivamente, de 0,1 mm e 0,2 mm para o caso do reforço com uma (1L) e duas camadas (2L) de manta.

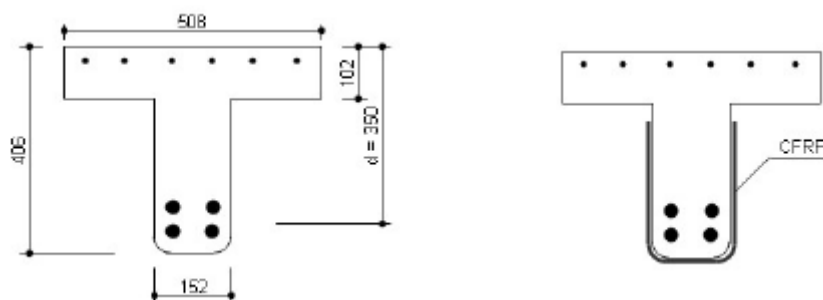


Figura 2.32 - Geometria das vigas ensaiadas por Chaallal *et al.* (2009) (dimensões em mm).

As vigas de referência, sem reforço de CFRP, tinham "0L" na sua designação, enquanto que as vigas reforçadas ao corte com uma ou duas camadas de manta de CFRP tinham na sua designação, respetivamente, "1L" ou "2L". O símbolo "S0" foi utilizado para designar as vigas sem armadura transversal enquanto "S1" referiu-se às vigas que continham estribos de aço.

O carregamento cíclico a que as vigas foram sujeitas teve um limite máximo de cinco milhões de ciclos de carga (frequência de 2 Hz). Os valores da carga mínima e da carga máxima aplicadas durante o carregamento cíclico correspondiam, respetivamente, a 35% e a 65% da carga máxima prevista para as vigas (Tabela 2.9). As vigas que não atingiram a rotura no decorrer do carregamento cíclico foram posteriormente ensaiadas monotonicamente até à rotura.

Tabela 2.9 - Definição do carregamento cíclico para as vigas ensaiadas por Chaallal *et al.* (2009).

Viga	Capacidade prevista, F [kN]	Carga Máxima [kN]	Carga Mínima [kN]
S0-0L	103	67	36
S0-1L	208	135	73
S0-2L	246	160	86
S1-0L	219	142	77
S1-1L	325	211	114
S1-2L	362	235	127

Na Tabela 2.10 estão resumidos os resultados dos testes de fadiga e dos testes monotónicos efetuados por Chaallal *et al.* (2009). As vigas reforçadas com uma camada de manta não apresentaram sinais significativos de danos durante o teste no qual foram impostos cinco milhões de ciclos de carga. Este resultado demonstra claramente o benefício deste tipo de reforço face ao fenómeno da fadiga. As vigas reforçadas com duas camadas de CFRP (ou seja, as vigas S0-2L e S1-2L) atingiram a rotura no âmbito do carregamento cíclico que se deu por descolamento do CFRP. Os resultados obtidos nas vigas S0-2L e S1-2L evidenciaram a importância da necessidade de recorrer a sistemas de fixação do CFRP para reforços com maior rigidez para limitação da rotura prematura.

Tabela 2.10 - Resultados experimentais dos ensaios realizados por Chaallal *et al.* (2009).

Viga	Teste de fadiga		Teste Monotónico
	Número de ciclos aplicados para a rotura	Rotura	Carga última, F [kN]
S0-0L	5000000	Não	145
S0-1L	5000000	Não	199
S0-2L	700000	Sim	NA
S1-0L	5000000	Não	390
S1-1L	5000000	Não	392
S1-2L	2100000	Sim	NA

Na Figura 2.33 apresenta-se a variação da deformação na secção de aplicação da carga com o aumento do número de ciclos para o valor da carga máxima do ensaio cíclico. As vigas ensaiadas apresentaram um aumento inicial da deformação nos primeiros ciclos. Esta primeira fase é seguida por outra, caracterizada pelo facto dos deslocamentos permanecerem mais ou menos constantes durante o ensaio de fadiga. A exceção foram as vigas S0-2L e S1-2L, nas quais se registou um aumento repentino dos deslocamentos na altura da rotura, atribuído à degradação da rigidez das vigas sob carga cíclica. Na Figura 2.34 apresenta-se a variação da extensão na armadura transversal com o aumento do número de ciclos para o valor da carga máxima do ensaio cíclico. Durante os ciclos iniciais houve um acentuado aumento no valor das extensões. Depois houve um aumento lento e constante. Na viga S1-2L houve um aumento repentino das extensões na altura da rotura da viga.

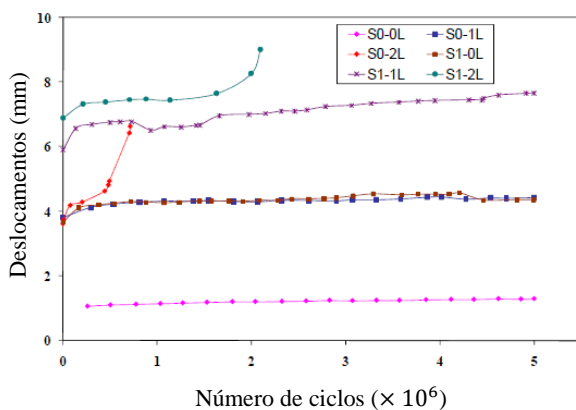


Figura 2.33 - Deslocamentos vs. ciclo.

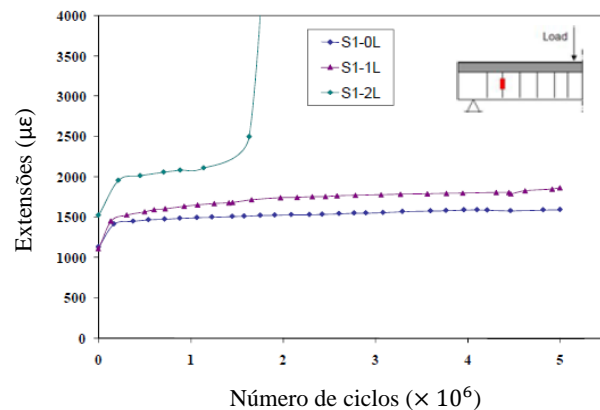


Figura 2.34 - Extensão na armadura transversal vs. ciclo.

Bae *et al.* (2013) realizaram um estudo experimental onde analisaram o comportamento à fadiga de vigas de betão armado reforçadas ao corte com mantas de CFRP coladas externamente. Foram testadas três vigas: uma viga de referência sem reforço ao corte (viga Ctrl), uma viga reforçada e testada apenas sob carregamento monotónico até à rotura (viga Str) e uma viga reforçada sujeita, numa primeira fase a um carregamento cíclico e, posteriormente, a um carregamento monotónico até à rotura (viga Str-Ftg). As vigas ensaiadas apresentavam secção transversal em T com 934 mm de altura (a alma tinha 457 mm de largura e 762 mm de altura, enquanto que o banzo tinha 178 mm de altura e 1067 mm de largura) por 12,8 m de comprimento. A armadura de esforço transversal adotada foi estribos com 9,5 mm de diâmetro espaçados de 305 mm. O reforço ao corte adotado para as vigas Str e Str-Ftg foi constituído por faixas discretas de uma camada de CFRP (254 mm de largura) espaçadas de 127 mm. A percentagem de reforço de CFRP utilizada foi de 0,048%.

As vigas foram ensaiadas à flexão sob três pontos de carga, sendo que, tal como anteriormente foi referido, duas delas foram sujeitas apenas a carregamento monotónico até à rotura (vigas Ctrl e Str). A terceira viga (viga Str-Ftg) foi sujeita, numa primeira fase a dois milhões de ciclos de carga com uma frequência de 1 Hz e, posteriormente, solicitada até à rotura com um carregamento monotónico. A carga de rotura obtida no ensaio estático da viga Str foi usada para determinar a carga mínima e máxima do carregamento cíclico da viga Str-Ftg. O valor inferior (232 kN) e superior (464 kN) da força de corte aplicada no carregamento cíclico desta viga correspondia, respetivamente, a 30% e 60% da capacidade resistente ao corte máxima da viga Str. Na Figura 2.35 apresenta-se as curvas de comportamento força de corte vs. deslocamento na secção de aplicação da carga para as vigas ensaiadas por Bae *et al.* (2013).

Tendo em conta os resultados obtidos, os autores concluíram que a solução de reforço ao corte testada proporcionou um aumento da resistência ao corte de 26,3%. Sob carregamento cíclico observou-se que dois dos três estribos que atravessavam a fenda crítica cederam e o nível de tensão na interface da ligação do CFRP colado externamente alcançou 2,38 MPa, tendo ocorrido a descolagem do CFRP após um milhão de ciclos. Mesmo com a descolagem completa das faixas de CFRP, a viga Str-Ftg suportou dois milhões de ciclos de carga. Além disso, a resistência ao corte da viga Str-Ftg (obtido no ensaio monotónico após o carregamento cíclico) foi superior, embora ligeiramente, à resistência ao corte da viga de referência (Figura 2.35).

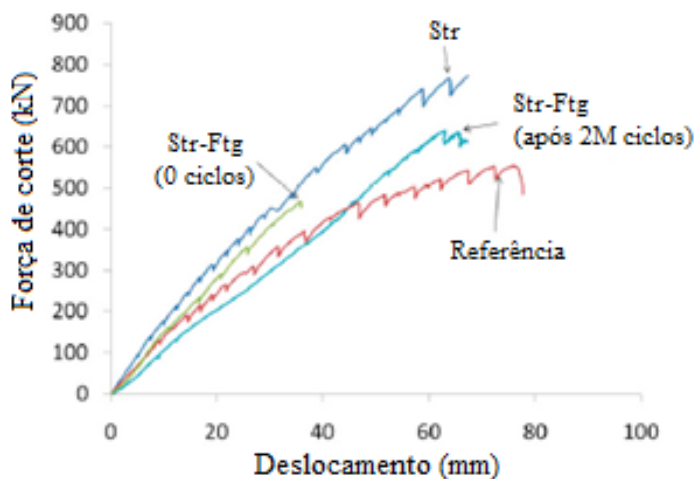
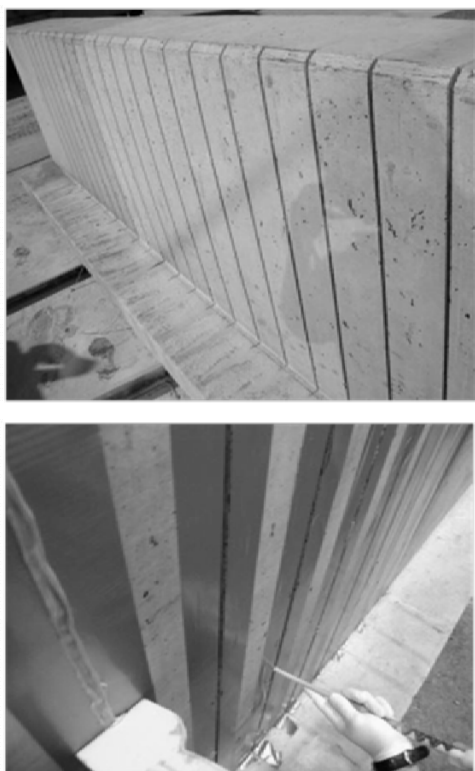


Figura 2.35 - Força de corte vs. Deslocamento no ponto aplicação da carga para as vigas ensaiadas por Bae *et al.* (2013).

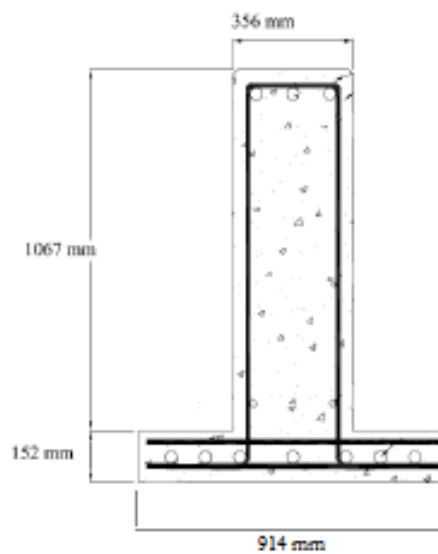
2.4.3 - Aplicação da técnica da inserção com varões e laminados de CFRP (NSM)

Goebel *et al.* (2012) realizaram um programa experimental para avaliar o desempenho e a durabilidade do reforço ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento (NSM) (Figura 2.36a). No total foram testadas dez vigas de betão armado, mas no âmbito da temática desta dissertação apenas serão analisadas duas dessas vigas, nomeadamente, as vigas IT.7.22.6.S e IT.7.22.6.FTG: a primeira, uma viga de referência que foi ensaiada monotonicamente à rotura e a segunda, uma viga sujeita a carga de fadiga e posteriormente ensaiada monotonicamente até à rotura. A secção transversal das vigas está representada na Figura 2.36b. As vigas foram reforçadas ao corte com laminados de CFRP com uma secção transversal de $2 \times 16 \text{ mm}^2$, espaçados a 152 mm.

A viga IT.7.22.6.FTG foi submetida a um milhão de ciclos de carga com uma frequência de 0,6 Hz, cujo intervalo de carga variou entre 266,5 kN e 595,5 kN. Uma vez que esta viga não atingiu a rotura ao longo do ensaio de fadiga, foi posteriormente ensaiada monotonicamente à rotura. Os autores deste estudo verificaram que os ciclos de fadiga considerados não afetaram negativamente o comportamento da viga testada. A carga de rotura registada nas vigas IT.7.22.6.S e IT.7.22.6.FTG foi de 2286 kN e 2500 kN, respetivamente. Desta forma, verificou-se um aumento da capacidade de carga máxima de cerca 9,4% da viga IT.7.22.6.FTG relativamente à viga IT.7.22.6.S.



a)



b)

Figura 2.36 - Vigas testadas por Goebel *et al.* (2012).

Capítulo 3

Programa experimental

O presente capítulo tem como objetivo apresentar de forma detalhada o programa experimental realizado com a finalidade de avaliar o comportamento cíclico de vigas de betão armado reforçadas ao corte por inserção de laminados de CFRP. A primeira parte deste capítulo é destinada à descrição dos modelos de vigas testadas, à caracterização dos materiais utilizados, à aplicação do reforço de CFRP, à descrição do sistema de ensaio usado e à instrumentação colocada nas vigas. Posteriormente, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no presente programa experimental.

3.1 - CONCEÇÃO DOS MODELOS

De forma a ser possível alcançar os objetivos estipulados para a presente dissertação, foi realizado um programa experimental que contemplou quatro vigas de betão armado (vigas 3S-7LV-M, 3S-7LV-C, 3S-9LI-M e 3S-9LI-C). De acordo com a Figura 3.1, as vigas ensaiadas apresentavam uma secção transversal em T com 600 mm de altura (a alma tinha 500 mm de altura e 180 mm de largura, enquanto que o banzo tinha 100 mm de altura e 450 mm de largura). As vigas tinham um vão livre de 4,20 m e um vão de corte a e b de 1,4 m e 2,8 m, respetivamente.

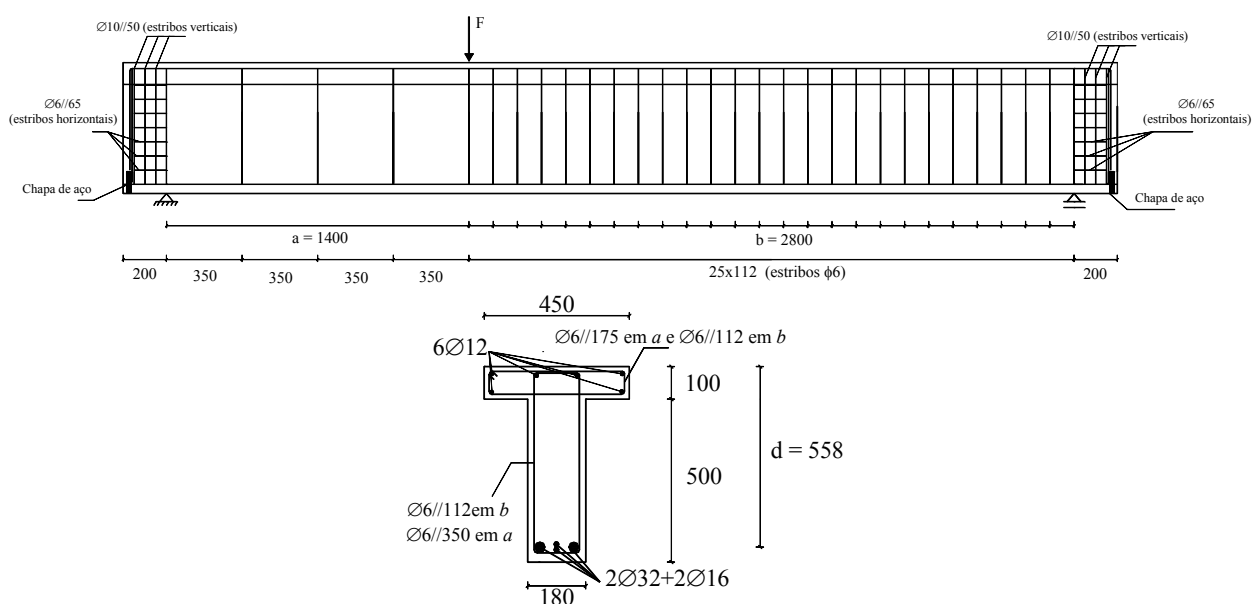


Figura 3.1 - Geometria das vigas a ensaiar (dimensões em mm).

A armadura longitudinal de tração das vigas foi dimensionada para que a rotura das vigas fosse por corte (carga de rotura por corte inferior à carga de rotura por flexão), tendo as vigas sido armadas com dois varões de 32 mm de diâmetro ($2\phi 32$) e dois varões de 16 mm de diâmetro ($2\phi 16$). Além disso, para que a rotura por corte fosse delimitada sempre à mesma zona da viga (vão de corte a), as vigas foram suficientemente bem estribadas no outro vão de corte (vão de corte b) com estribos verticais (2 ramos) de 6 mm de diâmetro espaçados de 112 mm ($\phi 6//112$ mm), de acordo com o representado na Figura 3.1. No vão de corte a foram colocados estribos verticais (2 ramos) de 6 mm de diâmetro espaçados de 350 mm ($\phi 6//350$ mm).

De acordo com o referido anteriormente, o programa experimental englobou quatro vigas de betão armado que foram reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. No total foram analisadas duas soluções de reforço que se distinguiam pela orientação conferida ao CFRP e pelo número de laminados. Assim, foram testadas duas orientações dos laminados de CFRP em relação ao eixo da viga, designadamente, na vertical (90°) e inclinados a 52° . As vigas 3S-7LV-M e 3S-7LV-C foram reforçadas ao corte com sete laminados dispostos verticalmente em cada uma das faces do vão de corte a , e as vigas 3S-9LI-M e 3S-9LI-C foram reforçadas ao corte com nove laminados inclinados a 52° em cada uma das faces do vão de corte a . Independentemente da orientação do CFRP, os laminados foram colocados com um espaçamento de 175 mm. A secção transversal dos laminados de CFRP utilizados no reforço ao corte das vigas em estudo era de $1,4 \times 10 \text{ mm}^2$.

As soluções de reforço ao corte que foram testadas tiveram como base as soluções de reforço adotadas no trabalho elaborado por Costeira (2010), cujas vigas ensaiadas, em termos de betão armado, eram semelhantes às vigas ensaiadas no presente trabalho experimental (mesma betonagem). Com efeito, enquanto nas soluções de reforço ao corte testadas por Costeira (2010), o espaçamento dos laminados era de 350 mm (quer para a solução de laminados na vertical como na solução de laminados inclinados a 52°), o espaçamento dos laminados nas vigas do presente programa experimental foi de metade do referido valor, ou seja, 175 mm (quer para a solução de laminados na vertical como na solução de laminados inclinados a 52°).

Na Figura 3.2 e na Tabela 3.1 é apresentada informação relativa ao reforço ao corte com laminados de CFRP adotado em cada uma das quatro vigas e o tipo de ensaio a que as vigas

A percentagem de armadura longitudinal de tração, ρ_{sl} , foi obtida por:

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

em que A_{sl} é a área da secção transversal dos varões de aço colocados longitudinalmente na face tracionada, b_w é a largura da secção transversal da viga e d é a distância a partir da fibra de betão mais comprimida ao baricentro dos varões de aço da armadura longitudinal de tração.

A percentagem de armadura transversal (estribos verticais), ρ_{sw} , foi obtida por:

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s_w} \times 100 \quad (3.2)$$

em que A_{sw} é a área resistente ao corte de cada um dos estribos de aço colocados na viga com um espaçamento s_w .

A percentagem de reforço de CFRP foi quantificada por:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot a_f \cdot b_f}{b_w \cdot s_f \cdot \sin \theta_f} \times 100 \quad (3.3)$$

em que $a_f = 1,4$ mm e $b_f = 10$ mm são as dimensões da secção transversal do laminado, e tal como anteriormente foi referido, s_f é o espaçamento entre laminados consecutivos e θ_f é a inclinação dos laminados.

As vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M foram ensaiadas monotonicamente até à rotura, enquanto que as vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C foram, numa primeira fase, sujeitas a carregamento cíclico (um milhão de ciclos) e posteriormente foram ensaiadas monotonicamente até à rotura. O nível de carregamento cíclico (força mínima e máxima do carregamento cíclico) das vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C foi definido tendo em conta o comportamento obtido no ensaio à rotura das vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M. Na secção 3.4 será apresentado com detalhe o critério adotado para o carregamento cíclico das vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C.

3.2 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A avaliação da resistência à compressão do betão utilizado na conceção das vigas foi efetuada experimentalmente à data da realização do ensaio das vigas. De acordo com a EN 206-1

(2000), efetuaram-se ensaios de compressão uniaxial em três cilindros de betão com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Previamente à realização destes ensaios a superfície da parte superior dos provetes cilíndricos foi devidamente regularizada. Na Figura 3.3 apresentam-se fotografias ilustrativas dos ensaios realizados para a caracterização do betão.

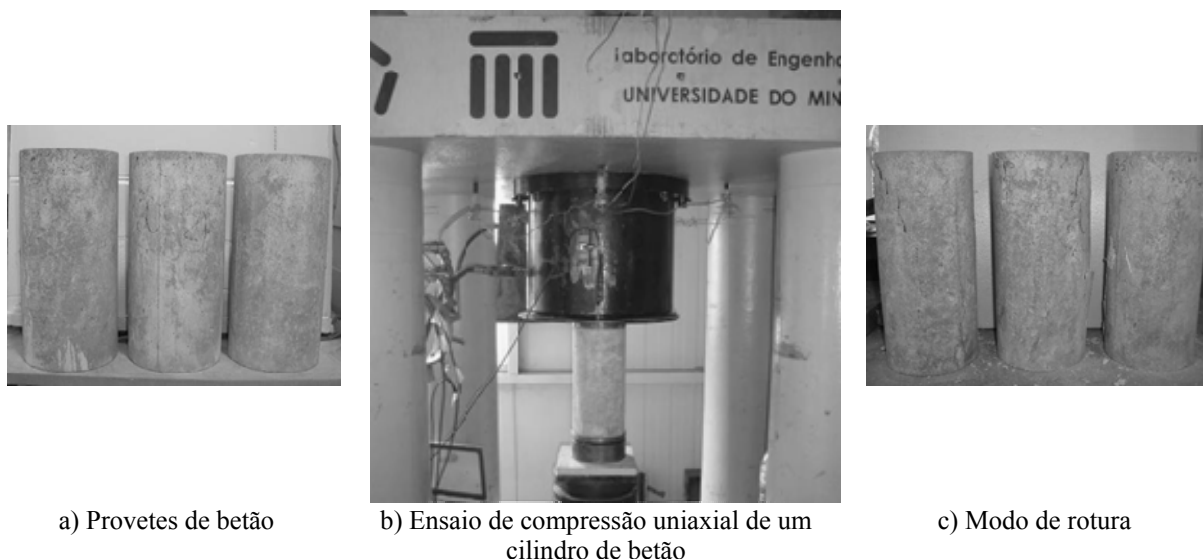
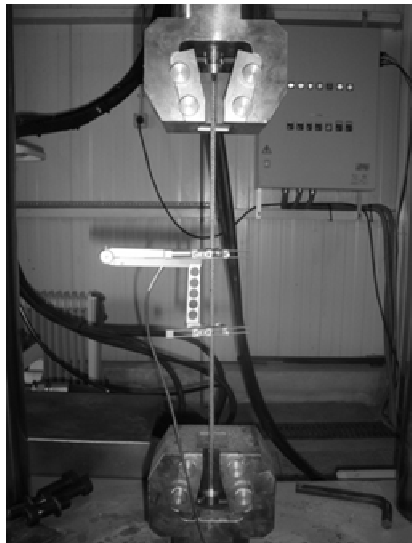


Figura 3.3 - Ensaios realizados para a caracterização do betão.

No âmbito da presente dissertação apenas foram realizados os ensaios de caracterização do betão. A caracterização do aço das armaduras e dos laminados de CFRP foi efetuada por Costeira (2010). Com efeito, tal como referido anteriormente, as vigas de betão armado usadas no presente programa experimental foram executadas conjuntamente com as vigas testadas por Costeira (2010). Além disso, o laminado de CFRP usado para o reforço das vigas testadas no âmbito desta dissertação era do mesmo rolo de onde foi retirado o laminado para o reforço das vigas testadas por Costeira (2010).

Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de varões de aço nervurado de 6 mm, 12 mm, 16 mm e 32 mm de diâmetro, cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente através de ensaios de tração uniaxial efetuados segundo o estipulado na EN 10002-1 (1990). Na Figura 3.4 estão representadas fotografias ilustrativas dos ensaios realizados para a caracterização do aço das armaduras. Foram ensaiados seis provetes de cada tipo de aço com um comprimento de 50 cm. Na Tabela 3.2 estão registados os valores médios das principais propriedades mecânicas, obtidas experimentalmente, tanto para o betão como para os aços utilizados.



a) Ensaio de tração uniaxial



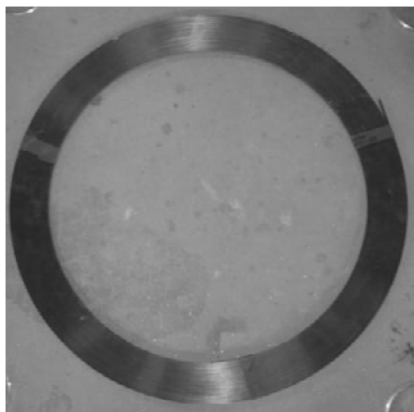
b) Modo de rotura

Figura 3.4 - Ensaio para a caracterização das armaduras de aço e respetivo modo de rotura (Costeira, 2010).

Tabela 3.2 - Principais propriedades do betão e do aço das vigas ensaiadas (Costeira, 2010).

Betão	Resistência à compressão [MPa]				
	$f_{cm} = 40,4$ MPa (à data do ensaio das vigas)				
Aço	Resistência à tração [MPa]	$\phi 6$	$\phi 12$	$\phi 16$	$\phi 32$
		f_{sym} (Tensão de cedência)	565,1	566,5	560,8
	f_{sum} (Tensão última)	682,6	661,5	675,0	781,9

Os laminados de CFRP utilizados no presente programa experimental possuíam a seguinte designação, S&P CFK®150/2000, tal como representado na Figura 3.5. A caracterização destes laminados foi efetuada experimentalmente através da realização de ensaios de tração uniaxial segundo a ISO 527-5 (1997). No total foram ensaiados quatro provetes de CFRP com 250 mm de comprimento e 10 mm de largura (Figura 3.6). Na Tabela 3.3 apresentam-se os valores médios das propriedades dos laminados obtidos a partir dos ensaios de tração uniaxial realizados (Figura 3.7), concretamente da resistência máxima à tração, do módulo de elasticidade e da extensão máxima.

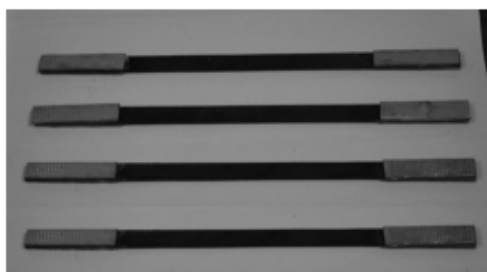


a) Rolo de laminado de CFRP utilizado



b) Referência do fabricante

Figura 3.5 - Laminado de CFRP utilizado.

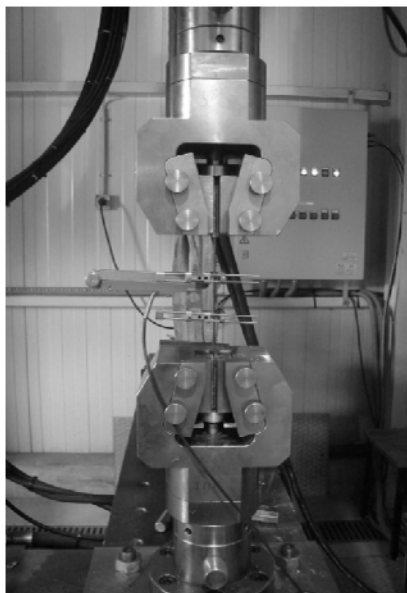


a) Provetes de laminados de CFRP

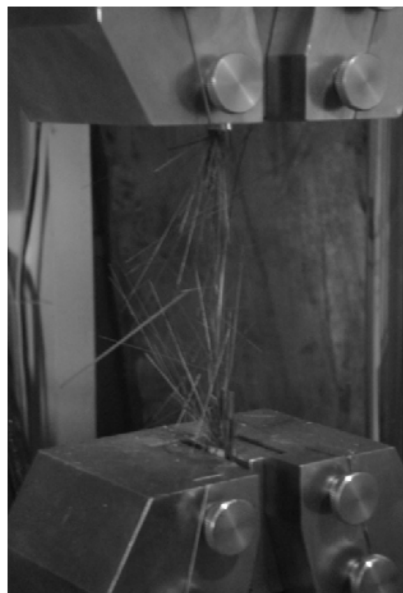


b) Dimensões do provete

Figura 3.6 - Provete de CFRP e respectivas dimensões (Costeira, 2010).



a) Ensaio de tração uniaxial



b) Modo de rotura

Figura 3.7 - Ensaio de tração uniaxial de um provete de laminado de CFRP e respetivo modo de rotura (Costeira, 2010).

Tabela 3.3 - Principais propriedades do laminado de CFRP utilizado (Costeira, 2010).

Laminado <i>pré-fabricado</i>	Resistência à tração [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Extensão máxima [‰]
	3009,3	169,2	17,8

O adesivo utilizado para a fixação dos laminados, com a designação comercial de “S&P®Resin 220 epoxy adhesive” (S&P, 2008), é fornecido em dois componentes, A e B, que se misturam no ato da sua aplicação, e cuja razão recomendada, em volume e em peso, é de quatro unidades de componente A por cada unidade de componente B. O adesivo adotado caracteriza-se por ter um tempo de trabalhabilidade (“pot life”) de, aproximadamente, 60 minutos a qual deverá ser efetuada com uma temperatura entre os 20°C e os 30°C (Costeira, 2010). As principais propriedades indicadas pelo fornecedor estão apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Principais propriedades do adesivo S&P®Resin 220 epoxy adhesive (S&P, 2008).

Propriedades	Valor
Densidade (Componente A e B) [g/cm ³]	1,75
Resistência à compressão [MPa]	> 90
Resistência à tração por flexão [MPa]	> 30
Resistência do adesivo – betão; 3 dias; 20°C [MPa]	3
Resistência do adesivo – Laminado CFK da S&P [MPa]	3
Validade do adesivo pronto [minutos]	> 60
Idade mínima do betão antes aplicar o adesivo [semanas]	3 a 6
Razão da mistura [A/B]	4/1

3.3 - APLICAÇÃO DO REFORÇO AO CORTE COM LAMINADOS DE CFRP INSERIDOS (TÉCNICA NSM)

A técnica de reforço ao corte testada no âmbito da presente dissertação foi a técnica da inserção de laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas (técnica NSM).

O sucesso da técnica NSM com laminados de CFRP passa por um rigoroso controlo de qualidade da execução do reforço. Esses procedimentos estão resumidos e descritos no organograma da Figura 2.10.

A execução do reforço de CFRP nas vigas ensaiadas no presente programa experimental englobou as seguintes etapas:

- Após a marcação da posição exata dos entalhes nas faces laterais dos elementos a reforçar (Figura 3.8a), estes foram executados com cerca de 5 mm de largura e 15 mm de profundidade, recorrendo a uma máquina de corte com disco diamantado e com um dispositivo de controlo do alinhamento e da profundidade do entalhe (Figura 3.8b). Este controlo permitiu que fosse garantido o facto de não haver danos nas armaduras existentes (transversais e longitudinais). Na Figura 3.8c encontra-se representado o aspeto final da face lateral de uma viga após a execução dos entalhes.



a) Marcação dos entalhes



b) Abertura dos entalhes

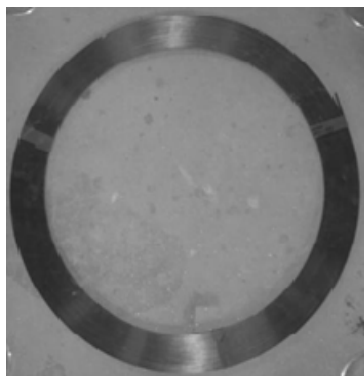


c) Entalhes efetuados no betão de recobrimento da face lateral da viga

Figura 3.8 - Realização dos entalhes nas faces laterais das vigas.

- Os laminados de CFRP, fornecidos em rolo (Figura 3.9a) com a secção transversal de $1,4 \times 10 \text{ mm}^2$, foram cortados, de acordo com o representado na Figura 3.9b, transversalmente ao eixo das fibras com o comprimento desejado (500 mm para o reforço das vigas 3S-7LV-M e 3S-7LV-C e 634 mm para o reforço das vigas 3S-9LI-M e 3S-9LI-

C). Após este corte, e de forma a garantir as melhores condições de aderência entre a adesivo e o CFRP, os laminados foram limpos com acetona (Figura 3.9c) eliminando-se assim qualquer tipo de sujidade que o CFRP possa conter (pó, gorduras, etc.).



a) Rolo de laminados de CFRP



b) Corte dos laminados



c) Limpeza dos laminados

Figura 3.9 - Corte e limpeza dos laminados usados.

- Após a execução dos entalhes (Figura 3.10a) procedeu-se à limpeza dos entalhes com a aplicação de ar comprimido (Figura 3.10b) por forma a garantir as melhores condições de aderência na ligação betão-adesivo. Previamente à aplicação do reforço de CFRP verificou-se que a superfície de betão na zona dos entalhes estava seca e isenta de gorduras e partículas soltas.
- Depois da colocação do número exato de laminados a aplicar na viga junto da mesma, procedeu-se à produção do adesivo. O adesivo epoxídico foi produzido de acordo com as recomendações do fabricante, atendendo à dosagem das suas duas componentes (a resina – componente A e o endurecedor – componente B), ao modo e tempo de mistura e ao tempo prático de utilização (Figura 3.10d).
- Os entalhes foram preenchidos com adesivo recorrendo a uma espátula (Figura 3.10e).
- O adesivo foi aplicado nas faces dos laminados (Figura 3.10f).
- Os laminados foram introduzidos nos entalhes (Figura 3.10g), retirando-se posteriormente o adesivo em excesso (Figura 3.10h). Verificou-se a não existência de bolhas de ar que pudessem comprometer as condições da ligação betão-adesivo-CFRP.

Na Figura 3.10i encontra-se representado o aspeto final da viga após a execução do reforço ao corte com laminados de CFRP usando a técnica NSM.

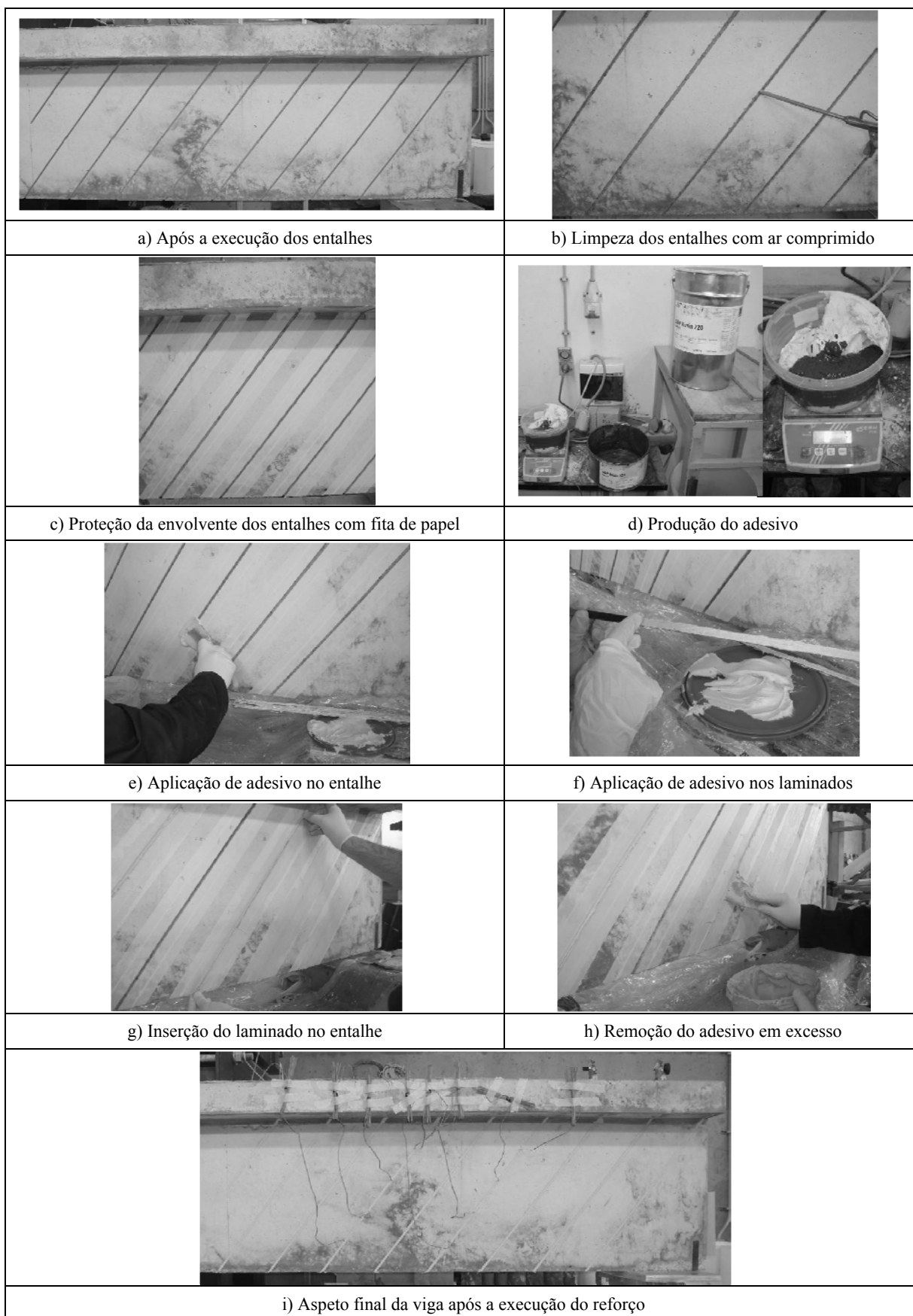


Figura 3.10 - Sequência da aplicação do reforço ao corte de uma viga de betão armado com laminados de CFRP usando a técnica NSM.

3.4 - SISTEMA DE ENSAIO E INSTRUMENTAÇÃO DAS VIGAS

Como foi referido anteriormente, duas das quatro vigas que fazem parte deste programa experimental foram ensaiadas monotonicamente até à rotura sem que tivessem sido submetidas a um carregamento cíclico (vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M). As restantes duas vigas, semelhantes às duas anteriormente referidas (viga 3S-7LV-C semelhante à viga 3S-7LV-M e viga 3S-9LI-C semelhante à viga 3S-9LI-M) foram sujeitas, numa primeira fase, a um ensaio cíclico e, posteriormente, foram testadas à rotura por intermédio de um carregamento monotónico. Em termos do carregamento monotónico das vigas à rotura, os ensaios foram realizados por controlo de deslocamentos com uma velocidade de deformação de 0,01 mm/s. O carregamento cíclico que foi imposto às vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C foi efetuado com uma frequência de 2Hz.

A viga 3S-7LV-C foi inicialmente carregada até uma carga de 285 kN e de seguida descarregada. Posteriormente, foi solicitada com um carregamento cíclico (um milhão de ciclos) em que os valores da carga mínima e máxima deste carregamento eram de 185 kN e 285 kN, respetivamente. Concretamente, a viga 3S-7LV-C foi carregada até aos 235 kN e depois foi sujeita a ciclos de ± 50 kN (amplitude de 100 kN). A definição do nível de carga a aplicar no carregamento cíclico da viga 3S-7LV-C teve em conta o comportamento obtido no ensaio da viga 3S-7LV-M que foi efetuado previamente (secção 3.5.2). Assim, a carga mínima (185 kN) e máxima (285 kN) do carregamento cíclico da viga 3S-7LV-C correspondem, respetivamente, a 40% e a 60% da carga máxima da viga 3S-7LV-M.

A viga 3S-9LI-C foi inicialmente carregada até uma carga de 360 kN e de seguida descarregada. Posteriormente, foi solicitada com um carregamento cíclico (um milhão de ciclos) em que os valores da carga mínima e máxima deste carregamento eram de 240 kN e 360 kN, respetivamente. Concretamente, a viga 3S-9LI-C foi carregada até aos 300 kN e depois foi sujeita a ciclos de ± 60 kN (amplitude de 120 kN). A definição do nível de carga a aplicar no carregamento cíclico da viga 3S-9LI-C teve em conta o comportamento obtido no ensaio da viga 3S-9LI-M que foi efetuado previamente (ver secção 3.5.2). Assim, a carga mínima (240 kN) e máxima (360 kN) do carregamento cíclico da viga 3S-9LI-C correspondem, respetivamente, a 40% e a 60% da carga máxima da viga 3S-9LI-M.

Na Tabela 3.5 apresenta-se os dados principais sobre o tipo de ensaios a que as vigas foram submetidas.

Tabela 3.5 - Tipo de carregamento imposto nas vigas ensaiadas.

Viga	Reforço de CFRP	Tipo de carregamento	Nível de carga cíclica			Número de ciclos
			$F_{min} - F_{max}^{(a)}$ [kN]	Intervalo [kN]	Frequência [Hz]	
3S-7LV-M	2×7 laminados de CFRP (1,4×10 mm ²)	Monotónico	0	---	0	0
3S-7LV-C		Cíclico + Monotónico	185 - 285 (40% - 60%)	100	2	1000000
3S-9LI-M	2×9 laminados de CFRP (1,4×10 mm ²)	Monotónico	0	---	0	0
3S-9LI-C		Cíclico + Monotónico	240 - 360 (40% - 60%)	120	2	1000000

(a) O valor entre parêntesis refere-se à percentagem da carga máxima ocorrida na viga semelhante solicitada apenas com carregamento monotónico até à rotura (O valor da carga máxima foi de 472,1 kN na viga 3S-7LV-M e de 605 kN na viga 3S-9LI-M).

As vigas foram submetidas a ensaios à flexão em três pontos de carga. Nas Figuras 3.11 e 3.12 apresentam-se, respetivamente, o esquema geral do ensaio monotónico à rotura e o esquema geral do ensaio cíclico. Para a instrumentação recorreu-se a uma célula de carga (no caso do ensaio monotónico à rotura, a capacidade de carga máxima da célula era de 1000 kN e no caso do ensaio cíclico a capacidade de carga máxima da célula era de 500 kN), a transdutores de deslocamentos (LVDT's) e a extensómetros elétricos. Para medir os deslocamentos em diferentes secções da viga foram utilizados cinco LVDT's, colocados na secção de aplicação da carga, nas secções do vão de corte a afastadas a $0,25a$, $0,50a$ e $0,75a$ da secção de aplicação da carga e na secção a meio do vão de corte b (Figura 3.13).



Figura 3.11 - Esquema geral do ensaio monotónico à rotura.

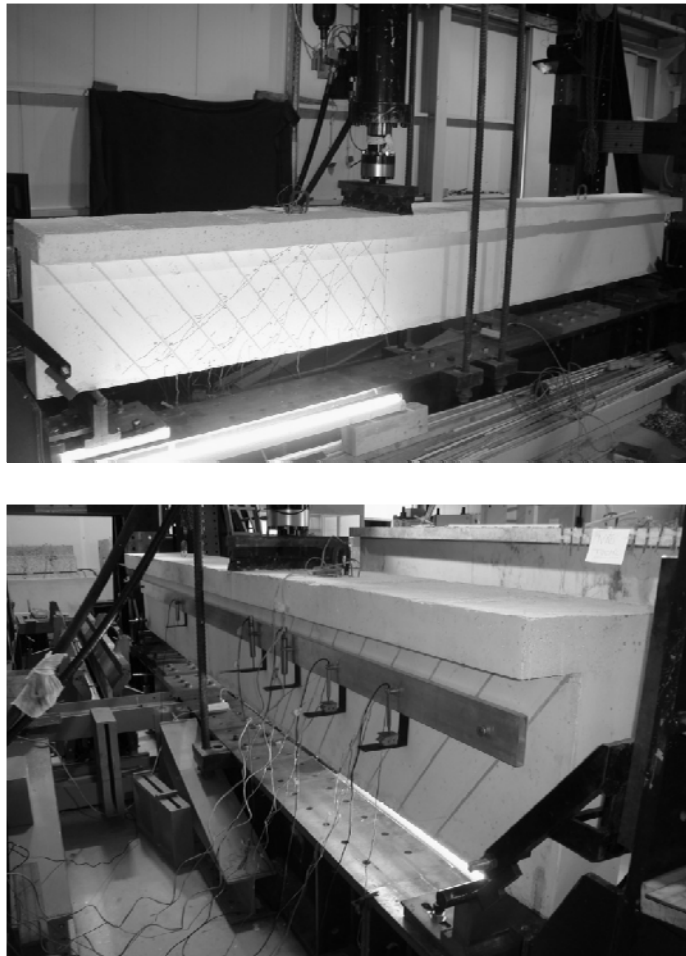


Figura 3.12 - Esquema geral do ensaio cíclico.

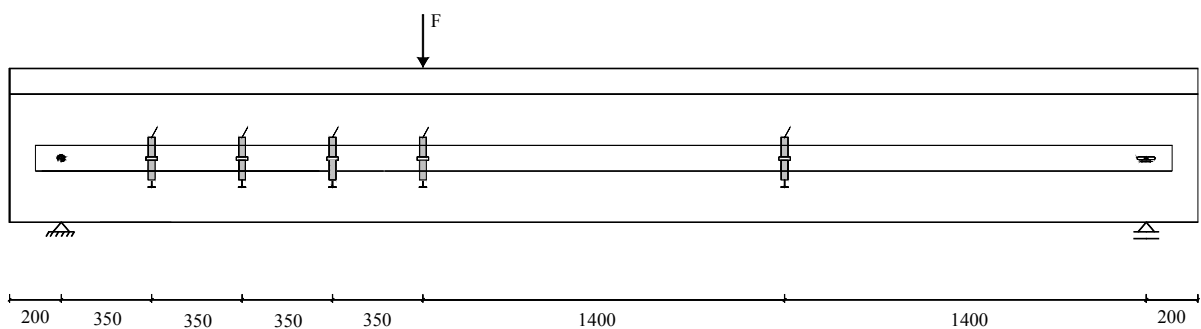


Figura 3.13 - Disposição dos cinco transdutores de deslocamentos (LVDT's) (dimensões em mm).

O comportamento do CFRP ao longo do carregamento das vigas foi obtido através da instrumentação de dois laminados de CFRP com extensómetros eléctricos (Figura 3.14). Concretamente, em cada um dos laminados foram colados quatro extensómetros eléctricos de acordo com a disposição representada na Figura 3.15. Por forma a minimizar os efeitos de perturbações na ligação betão-adesivo-CFRP, causados pela presença dos extensómetros

elétricos, estes foram colocados de forma alternada nas faces dos laminados tal como representado na Figura 3.15. Na Figura 3.16 apresenta-se uma fotografia do tipo de extensómetros utilizado e exemplos de laminados instrumentados.



Figura 3.14 - Extensómetros elétricos utilizados na instrumentação dos laminados.

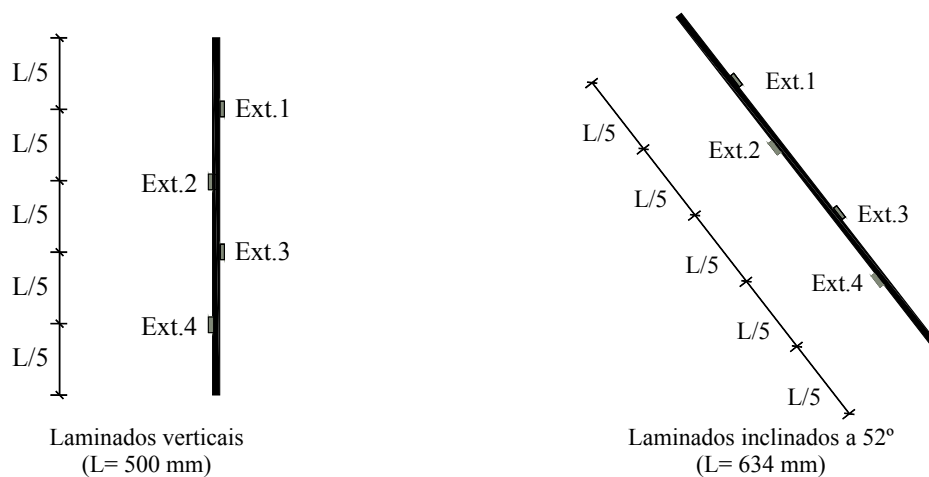


Figura 3.15 - Disposição dos quatro extensómetros aplicados nos laminados de CFRP instrumentados (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4).

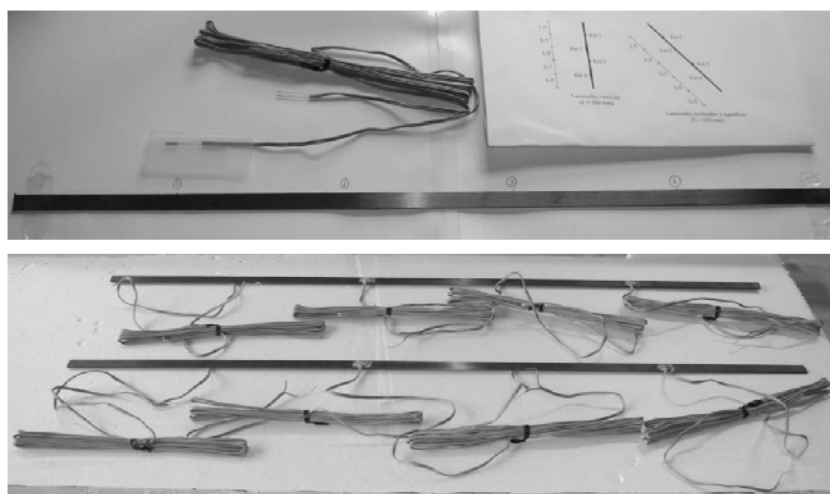


Figura 3.16 - Instrumentação dos laminados de CFRP.

O comportamento da armadura transversal ao longo do carregamento das vigas foi registado por intermédio da instrumentação do estribo posicionado na secção a meio do vão de corte a . Neste estribo foram colados três extensómetros elétricos de acordo com a disposição apresentada na Figura 3.17. Na Figura 3.18 está representada a localização dos estribos e dos laminados de CFRP instrumentados nas quatro vigas do presente programa experimental.

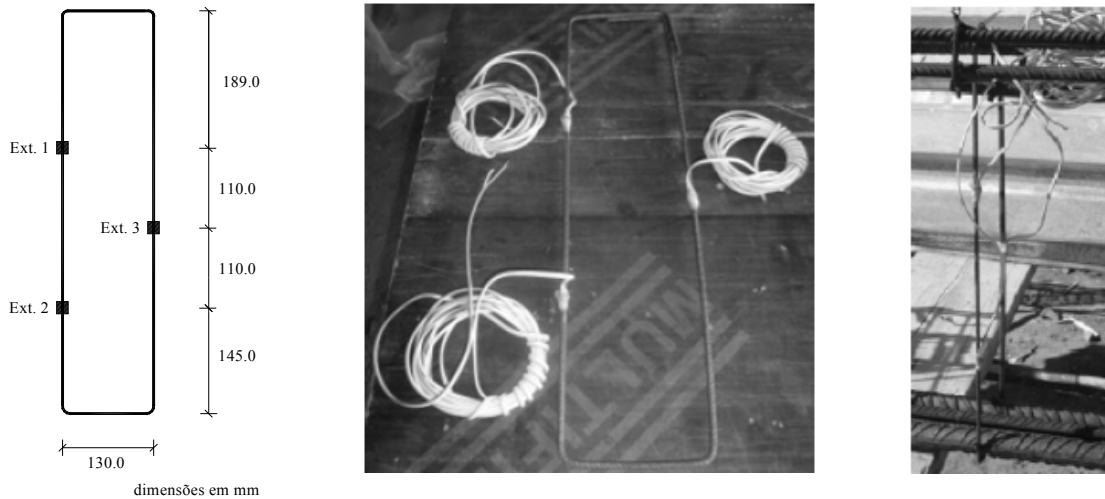


Figura 3.17 - Disposição dos três extensómetros aplicados no estribo de aço instrumentado (Ext.1, Ext.2 e Ext.3).

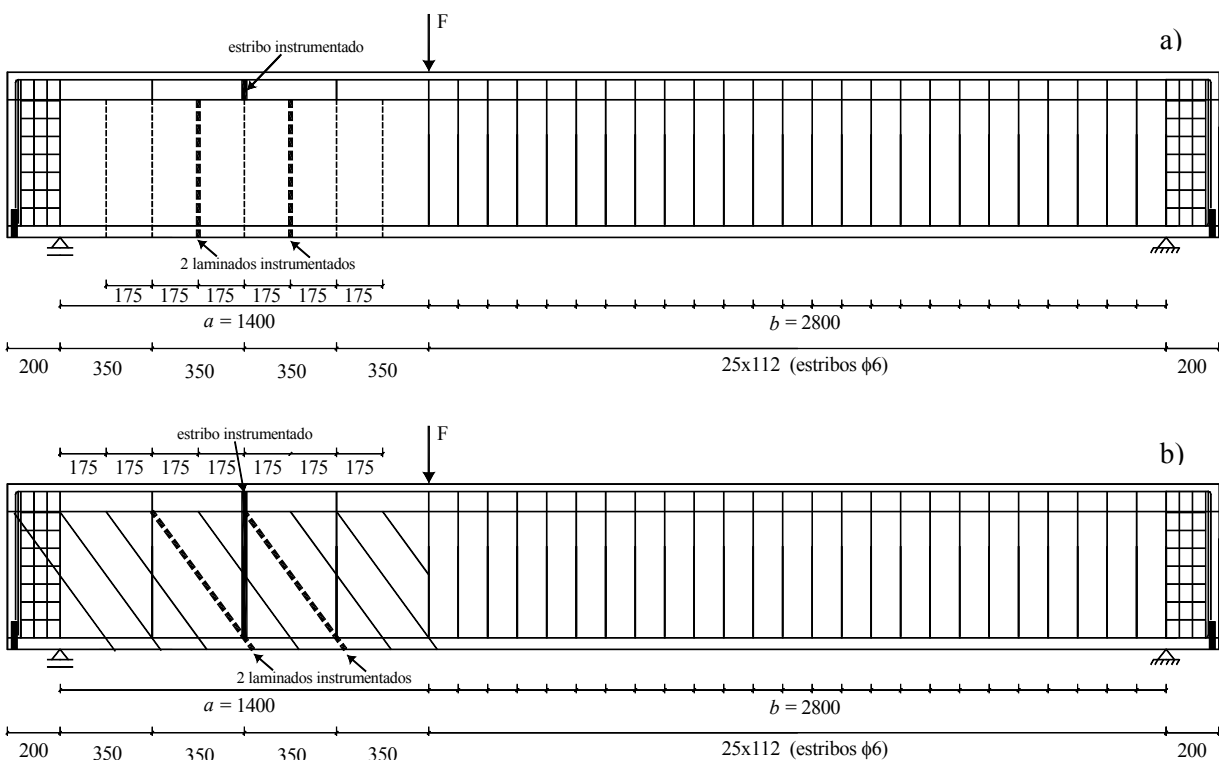


Figura 3.18 - Localização dos estribos e dos laminados de CFRP instrumentados: a) reforço com laminados verticais (vigas 3S-7LV-M e 3S-7LV-C); b) reforço com laminados inclinados a 52° (vigas 3S-9LI-M e 3S-9LI-C).

3.5 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta secção serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios efetuados em termos de capacidade de carga das vigas de betão armado e dos respetivos modos de rotura, do efeito da orientação e da percentagem dos laminados; do nível de extensões registadas no CFRP e nas armaduras transversais. A influência do carregamento cíclico no desempenho da técnica de reforço em estudo também será objeto de discussão. Na análise dos resultados das vigas ensaiadas será tido em consideração o resultado do ensaio de três das vigas testadas por Costeira (2010), cujo programa experimental foi apresentado no Capítulo 2 desta dissertação (vigas 3S-R, 3S-4LV-S e 3S-4LI-S). Tal como referido anteriormente, estas vigas em termos de betão armado são semelhantes às vigas do presente programa experimental (mesma betonagem). Refira-se que à data da realização do ensaio das vigas testadas por Costeira (2010), o betão tinha um valor de f_{cm} de 36,4 MPa, ou seja, um valor próximo do valor do f_{cm} das vigas ensaiadas no programa experimental da presente dissertação.

3.5.1 - Vigas sujeitas a carregamento monotónico

3.5.1.1 - Capacidade de carga das vigas até à rotura

Na Figura 3.19 apresentam-se as curvas de comportamento Força vs. Deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas 3S-R, 3S-7LV-M e 3S-9LI-M. A análise desta figura permite verificar que, tendo em consideração o comportamento da viga de referência 3S-R, as soluções de reforço ao corte com CFRP testadas proporcionaram aumentos de rigidez e de capacidade de carga máxima ($F_{máx}$).

Na Tabela 3.6 apresenta-se o valor da carga máxima ($F_{máx}$) das duas vigas ensaiadas no presente programa experimental sujeitas apenas a carregamento monotónico até à rotura (vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M), assim como, o da viga de referência 3S-R testada por Costeira (2010). Atribuindo ao valor da carga máxima da viga 3S-R a designação $F_{máx}^{3S-R}$, determinaram-se os fatores $\Delta F_{máx}/F_{máx}^{3S-R}$ e $F_{máx}/F_{máx}^{3S-R}$ indicados na Tabela 3.6 em que $\Delta F_{máx} = F_{máx} - F_{máx}^{3S-R}$. Nesta tabela também se apresenta o valor da flecha na secção de aplicação da carga no instante em que as vigas atingiram a sua capacidade máxima resistente ($F_{máx}$), designada por $u_{F_{máx}}$.

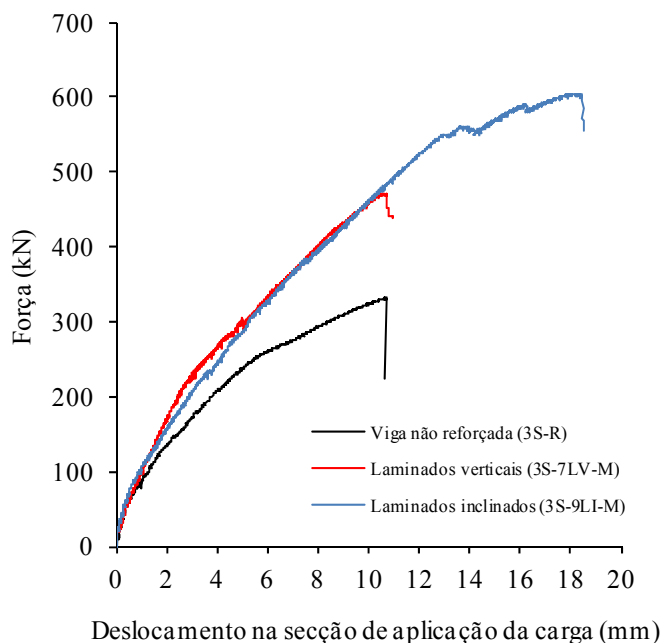


Figura 3.19 - Curvas de comportamento Força vs. Deslocamento na secção de aplicação da carga.

Tabela 3.6 - Principais resultados em termos de capacidade de carga das vigas (ensaios monotónicos).

Viga	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\Delta F_{m\acute{a}x}/F_{m\acute{a}x}^{3S-R}$ [%]	$F_{m\acute{a}x}/F_{m\acute{a}x}^{3S-R}$	$u_{F_{m\acute{a}x}}$ [mm]
3S-R	331,4	0,0	1,00	10,68
3S-7LV-M	472,1	42,5	1,42	10,58
3S-9LI-M	605,0	82,6	1,83	18,21

Os valores apresentados na Tabela 3.6 permitem constatar que o acréscimo de carga máxima alcançado pelas soluções de reforço adotadas variou entre os 43% e os 83%. Estes valores comprovam que a técnica de reforço ao corte em estudo é bastante eficaz quando aplicada no reforço de vigas de altura elevada. No que diz respeito aos valores da deformação na rotura ($u_{F_{m\acute{a}x}}$), verificou-se que na viga reforçada ao corte com laminados de CFRP inclinados (3S-9LI-M) ocorreu um acréscimo de cerca de 71% relativamente à viga de referência (3S-R), enquanto que o valor de $u_{F_{m\acute{a}x}}$ da viga 3S-7LV-M foi praticamente igual ao da viga 3S-R.

Em termos da orientação do CFRP constatou-se que a solução de reforço com laminados inclinados a 52° (viga 3S-9LI-M) foi mais eficaz do que a solução de reforço com laminados inseridos verticalmente (viga 3S-7LV-M). O acréscimo de carga máxima registado para a viga 3S-7LV-M foi cerca de 51% do alcançado pela viga 3S-9LI-M. Constatou-se também que a solução de reforço com laminados inclinados conduziu a um valor de $u_{F_{m\acute{a}x}}$ 72% superior ao verificado na viga com laminados na vertical. Apesar da percentagem de reforço na viga com

laminados inclinados ser superior à da viga com laminados na vertical, o melhor desempenho dos laminados inclinados está também associado com o facto da inclinação da fenda de rotura de corte ser aproximadamente ortogonal aos laminados inclinados. Além disso, a solução com laminados inclinados, quando comparada com a de laminados verticais, destaca-se por potenciar maiores comprimentos de amarração do CFRP, ou seja, melhores condições de aderência do CFRP ao betão.

A melhor eficácia das soluções de laminados inclinados quando aplicados no reforço ao corte de vigas de altura elevada tinha já sido já comprovada por Costeira (2010) quando testou vigas semelhantes às vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M mas reforçadas com menores percentagens de CFRP (na viga 3S-4LV-S foram utilizados 4 laminados na vertical em cada uma das faces do vão de corte a , a que corresponde uma percentagem de CFRP de 0,044%; na viga 3S-4LI-S foram utilizados 4 laminados inclinados a 52° em cada uma das faces do vão de corte a , a que corresponde uma percentagem de CFRP de 0,056%). O acréscimo de carga máxima proporcionado pelas soluções de reforço das vigas 3S-4LV-S e 3S-4LI-S foi, respetivamente, de 21% e 48% (ver Figura 2.26 e Tabela 2.6). Na Figura 3.20 apresenta-se o acréscimo de carga máxima obtido nas vigas reforçadas com laminados na vertical (viga 3S-4LV-S com $\rho_f = 0,044\%$ e viga 3S-7LV-M com $\rho_f = 0,089\%$) e com laminados inclinados a 52° (viga 3S-4LI-S com $\rho_f = 0,056\%$ e viga 3S-9LI-M com $\rho_f = 0,113\%$). A análise desta figura permite verificar o melhor desempenho das soluções com laminados inclinados e que aumentando a percentagem de CFRP verifica-se um aumento do valor do acréscimo de carga máxima proporcionado pela presença do reforço.

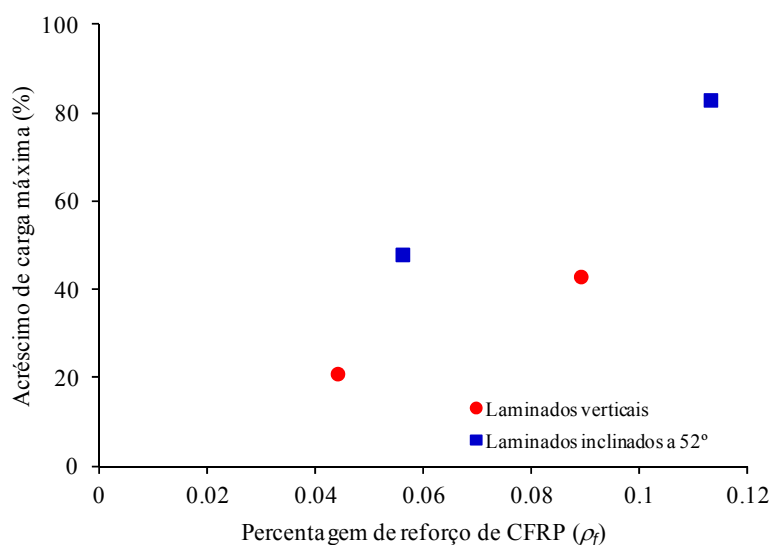


Figura 3.20 - Efeito da percentagem e da orientação dos laminados de CFRP na eficácia da técnica NSM no reforço ao corte de vigas de betão armado de altura elevada.



a) Viga 3S-7LV-M



b) Viga 3S-9LI-M

Figura 3.21 - Padrão de fendilhação instalado nas vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M (face da frente).



a) Viga 3S-7LV-M



b) Viga 3S-9LI-M

Figura 3.22 - Padrão de fendilhação instalado nas vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M (face de trás).

Nas Figuras 3.21 e 3.22 estão representados os padrões de fendilhação observados nas vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M após a realização do ensaio à rotura. Em ambos os vãos de corte, mas com particular destaque para o vão de corte a , é possível verificar que a viga reforçada com laminados de CFRP inclinados a 52° (viga 3S-9LI-M) apresenta um padrão de fendilhação mais difuso do que o observado na viga reforçada com laminados de CFRP verticais (viga 3S-7LV-M).

3.5.1.2 - Modos de rotura

De acordo com o ilustrado nas Figuras 3.21 e 3.22, o modo de rotura das vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M foi por corte e ocorreu no menor vão de corte a .

Na Figura 3.23 apresentam-se alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-7LV-M (viga reforçada em cada uma das faces do vão de corte a com sete laminados inseridos na vertical). Através da análise desta figura é possível verificar que durante o ensaio se desenvolveram várias fendas diagonais de corte no vão de corte a . Com o decorrer do ensaio acabou por se destacar a fenda diagonal de corte que atravessava o terceiro e quarto laminados de CFRP a contar da secção de aplicação da carga. A capacidade de carga máxima da viga 3S-7LV-M ($F_{m\acute{a}x} = 472,1$ kN) foi alcançada imediatamente antes de se dar o destacamento da parte inferior do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga. Posteriormente ocorreu o destacamento da parte superior do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga.

A Figura 3.24 mostra alguns pormenores relativos ao modo de rotura que ocorreu na viga 3S-7LV-M.

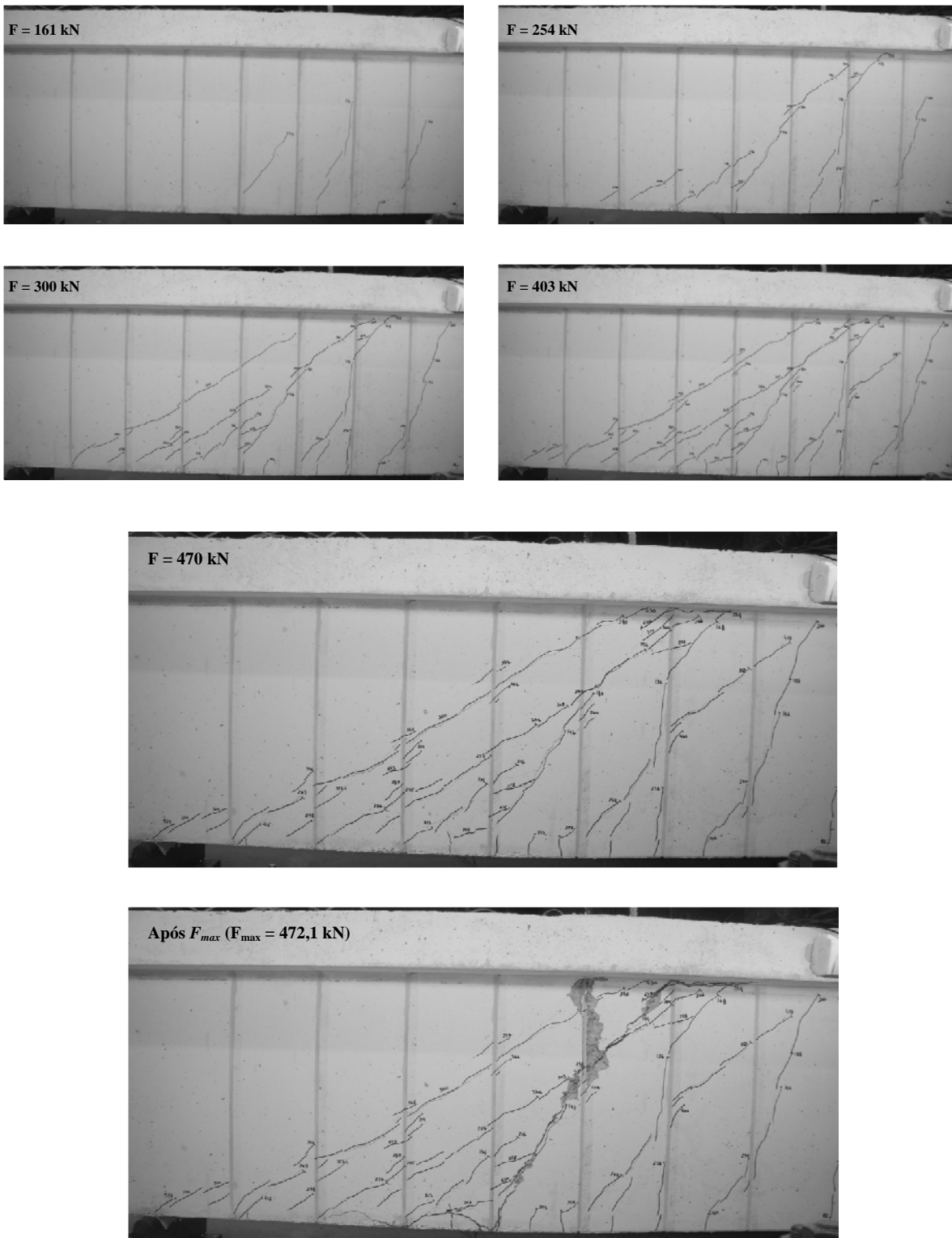
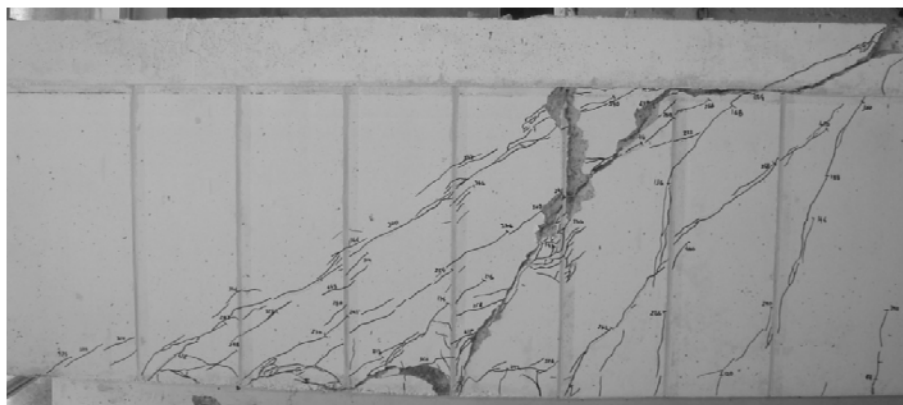
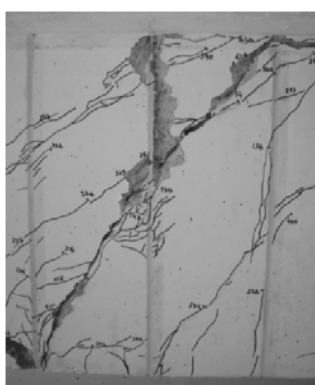


Figura 3.23 - Alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-7LV-M.



a) Modo de rotura da viga reforçada ao corte com laminados de CFRP verticais



b) Cedência do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga



c) Cedência do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga

Figura 3.24 - Pormenores do modo de rotura da viga 3S-7LV-M.

Na Figura 3.25 apresentam-se alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-9LI-M (viga reforçada em cada uma das faces do vão de corte a com nove laminados inseridos com uma inclinação de 52°). Nesta viga desenvolveram-se várias fendas de corte no vão de corte a , tendo o padrão de fendilhação sido mais difuso do que o registado na viga 3S-7LV-M. Cerca dos 562 kN registou-se uma quebra da rigidez da viga (Figura 3.19) devido à cedência da parte superior do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga. Devido à presença dos elementos resistentes ao corte adjacentes, a capacidade de carga da viga foi recuperada sendo possível suportar cargas superiores a 562 kN. Com efeito, a capacidade de carga máxima da viga (605 kN) foi alcançada imediatamente antes de ocorrer a cedência da parte superior do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga.

A Figura 3.26 mostra alguns pormenores relativos ao modo de rotura que ocorre na viga 3S-9LI-M (as retas verticais representam o posicionamento dos estribos de aço).

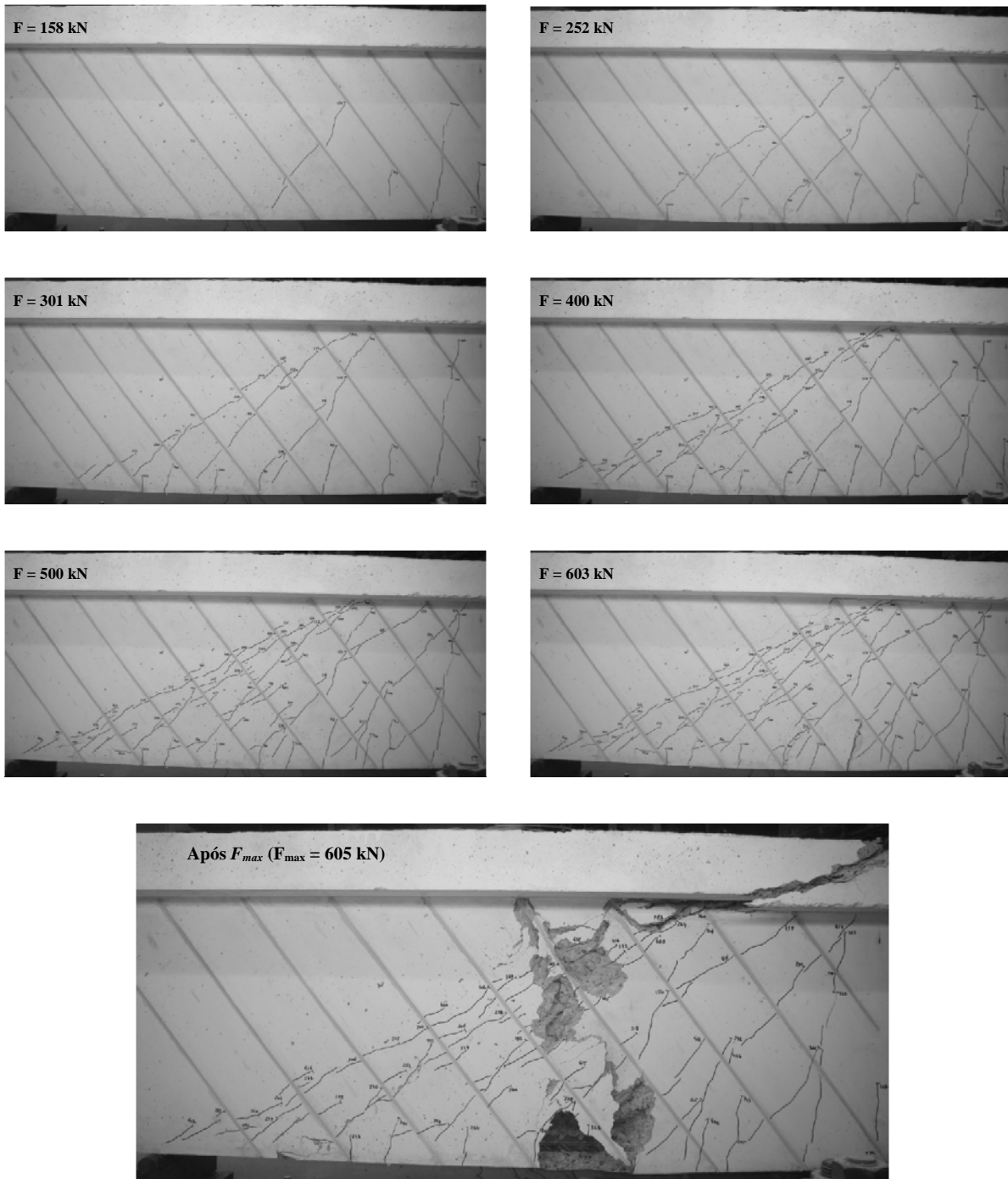


Figura 3.25 - Alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-9LI-M.

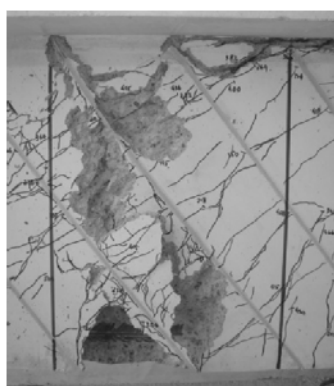
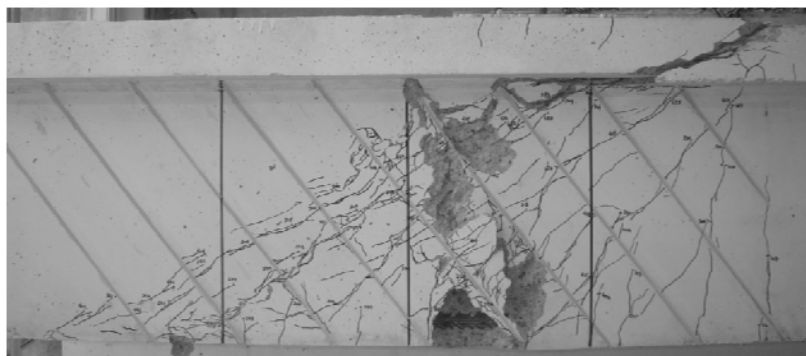


Figura 3.26 - Pormenores do modo de rotura da viga 3S-9LI-M.

3.5.1.3 - Extensões nas armaduras transversais e nos laminados de CFRP

Na Figura 3.27 apresenta-se, para as vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M, a relação entre as extensões registadas nos extensómetros colados no estribo de aço instrumentado (Figura 3.17) e a força aplicada nas vigas, até ao momento em que estas atingiram a sua capacidade de carga máxima. A análise da Figura 3.27 permite concluir que em ambas as vigas, a sua capacidade de carga máxima foi atingida com a armadura do estribo de aço instrumentado em cedência.

Na Figura 3.28 apresenta-se, para as vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M, a relação entre as extensões registadas nos extensómetros colados nos laminados de CFRP instrumentados (dois por viga de acordo com a Figura 3.18) e a força aplicada nas vigas, até ao momento em que estas atingiram a sua capacidade de carga máxima. Na Figura 3.28, o CFRP A era o laminado que se encontrava mais próximo da secção de aplicação da carga, enquanto o CFRP B era o que se situava mais próximo do apoio. O posicionamento dos quatro extensómetros (Ext.1, Ext. 2, Ext. 3 e Ext. 4) em cada CFRP instrumentado está representado na Figura 3.15.

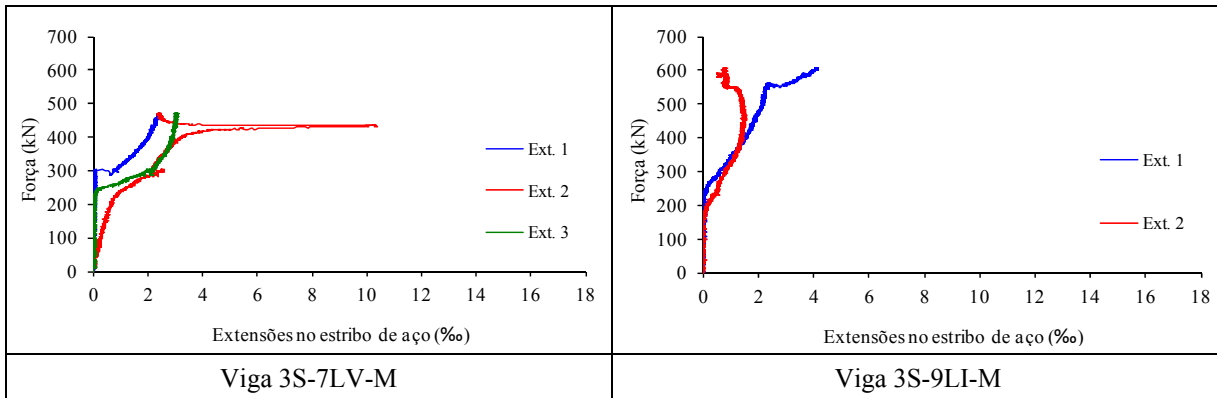


Figura 3.27 - Variação das extensões no estribo de aço instrumentado da viga 3S-7LV-M e da viga 3S-9LI-M.

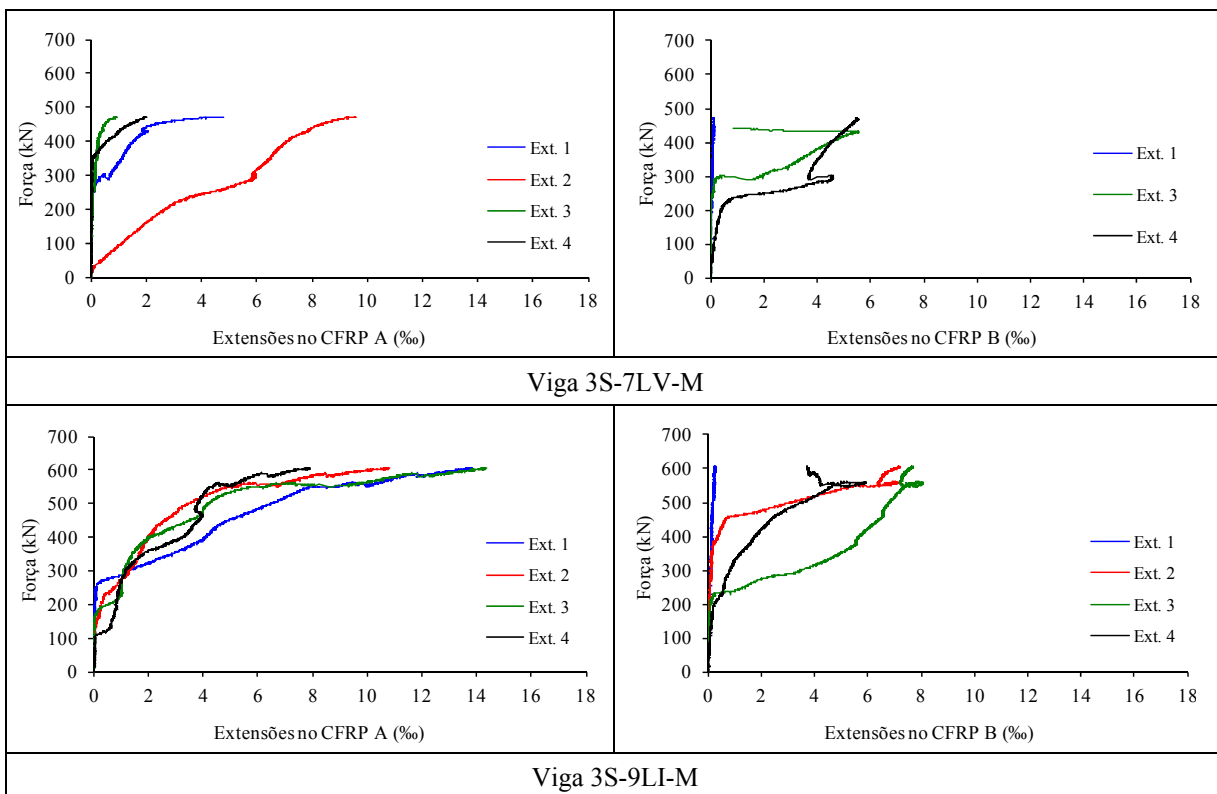


Figura 3.28 - Variação das extensões nos laminados instrumentados da viga 3S-7LV-M e da viga 3S-9LI-M.

Na Tabela 3.7 apresenta-se, para cada uma das vigas ensaiadas, os valores das extensões registadas nos quatro extensómetros (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4) aplicados em cada um dos CFRP instrumentados (CFRP A e CFRP B) na altura em que as vigas alcançaram a carga máxima ($F_{máx}$). Para os casos em que a extensão máxima no CFRP se verificou para uma carga inferior à carga máxima ($F_{máx}$), os valores registados nos extensómetros nesse instante são apresentados entre parêntesis curvos. Na Tabela 3.7 também se apresenta o valor da

extensão máxima no CFRP ($\varepsilon_{CFRP}^{máx}$) registado nos extensómetros até as vigas atingirem a sua capacidade de carga máxima.

Tabela 3.7 - Extensões registadas nos extensómetros colados nos laminados das vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M.

Viga	CFRP	$\varepsilon_{Ext.1}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.2}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.3}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.4}$ [‰]	$\varepsilon_{CFRP}^{máx}$ [‰]
3S-7LV-M	A	4,79	9,57	0,95	2,00	9,57
	B	0,14 (0,15)	^(a)	1,09 (5,56)	5,48 (5,52)	
3S-9LI-M	A	13,84	10,82	14,39	7,90	14,39
	B	0,26 (0,29)	7,22	7,68 (8,08)	3,70 (5,92)	

(a) Este extensómetro não funcionou.

O maior e menor valor das extensões registadas nos laminados instrumentados da viga 3S-7LV-M, ocorreram no Ext.2 do CFRP A e no Ext.1 do CFRP B, respetivamente. Isto aconteceu devido ao facto do Ext.2 do CFRP A ser o que se encontrava mais próximo da fenda de rotura de corte e do Ext.1 do CFRP B estar numa zona onde na sua proximidade não ocorreram fendas de corte (extensões quase nulas conforme é possível ser verificado na Figura 3.28). No caso da viga 3S-9LI-M o maior valor das extensões registou-se num extensómetro do CFRP A (Ext.3), enquanto que o menor valor das extensões foi registado no Ext.1 do CFRP B.

Da análise dos dados presentes na Tabela 3.7 é possível verificar que o valor da extensão máxima registada nos CFRP ($\varepsilon_{CFRP}^{máx}$) variou entre os 9,6‰ e os 14,4‰. A média dos valores da extensão $\varepsilon_{CFRP}^{máx}$ foi de 12‰, valor este que corresponde a 67,4% do valor da extensão máxima (extensão última) registada nos ensaios de tração realizados para a caracterização dos laminados de CFRP (17,8‰ - Tabela 3.3).

Em termos de orientação do CFRP, os dados da Tabela 3.7 permitem verificar que a solução mais eficaz em termos da mobilização das elevadas potencialidades do reforço de CFRP, foi a solução com laminados inclinados a 52°. Com efeito, as soluções de reforço com laminados verticais e com laminados inclinados a 52° conduziram a uma mobilização do reforço de CFRP em cerca de 54% (extensão de 9,6‰) e 81% (extensão de 14,4‰), respetivamente.

3.5.2 - Vigas sujeitas a carregamento cíclico

3.5.2.1 - Carregamento cíclico das vigas

Como foi referido anteriormente, as vigas 3S-7LV-C (viga semelhante à viga 3S-7LV-M) e 3S-9LI-C (viga semelhante à viga 3S-9LI-M) foram sujeitas a carregamento cíclico de um milhão de ciclos com uma frequência de 2Hz.

Tal como foi referido na secção 3.4 deste capítulo, a viga 3S-7LV-C foi inicialmente carregada até uma carga de 285 kN e de seguida descarregada. Posteriormente, foi solicitada com um carregamento cíclico (um milhão de ciclos) em que os valores da carga mínima e máxima deste carregamento eram de 185 kN e 285 kN, respetivamente. Concretamente, a viga 3S-7LV-C foi carregada até aos 235 kN e depois sujeita a ciclos de ± 50 kN (amplitude de 100 kN).

Na Figuras 3.29 e 3.30 está representado, respetivamente, o padrão de fendilhação registado na viga 3S-7LV-C após o carregamento monotónico inicial até aos 285 kN (antes do carregamento cíclico) e o padrão de fendilhação registado na viga 3S-7LV-C após o carregamento cíclico. É possível verificar que não existe uma alteração significativa no padrão de fendilhação registado antes e após o carregamento cíclico. Comparando as Figuras 3.29 e 3.30 é possível verificar que com o carregamento cíclico verificou-se a progressão de algumas fendas já existentes, provocadas pelo carregamento monotónico até aos 285 kN, e o aparecimento de novas fendas, ainda que pouco significativas. Refira-se que as alterações identificadas no padrão de fendilhação da viga 3S-7LV-C, provocadas pelo carregamento cíclico, ocorreram essencialmente na parte inicial do carregamento cíclico.



Figura 3.29 - Padrão de fendilhação da viga 3S-7LV-C antes do carregamento cíclico.



Figura 3.30 - Padrão de fendilhação da viga 3S-7LV-C após o carregamento cíclico.

Em relação à viga 3S-9LI-C, ela foi inicialmente carregada até uma carga de 360 kN e de seguida descarregada. Posteriormente, foi solicitada com um carregamento cíclico (um milhão de ciclos) em que os valores da carga mínima e máxima deste carregamento eram de 240 kN e 360 kN, respetivamente. Concretamente, a viga 3S-9LI-C foi carregada até aos 300 kN e depois sujeita a ciclos de ± 60 kN (amplitude de 120 kN).

Na Figuras 3.31 e 3.32 está representado, respetivamente, o padrão de fendilhação registado na viga 3S-9LI-C após o carregamento monotónico inicial até aos 360 kN (antes do carregamento cíclico) e o padrão de fendilhação registado na viga 3S-9LI-C após o carregamento cíclico. Comparando as Figuras 3.31 e 3.32 é possível verificar que com o carregamento cíclico verificou-se a progressão de algumas fendas já existentes, provocadas pelo carregamento monotónico até aos 360 kN, e o aparecimento de novas fendas. Neste contexto, refira-se que o carregamento cíclico desta viga provocou maiores alterações ao padrão de fendilhação do que o carregamento cíclico da viga 3S-7LV-C. Esta ocorrência pode estar associada à maior agressividade do carregamento cíclico que foi imposto à viga 3S-9LI-C.

A análise das Figuras 3.30 e 3.32 permite constatar que, quer a viga 3S-7LV-C como a viga 3S-9LI-C, não atingiram a rotura durante o carregamento cíclico, ou seja, estas vigas conseguiram suportar um milhão de ciclos para os níveis de carregamento cíclico anteriormente referidos.

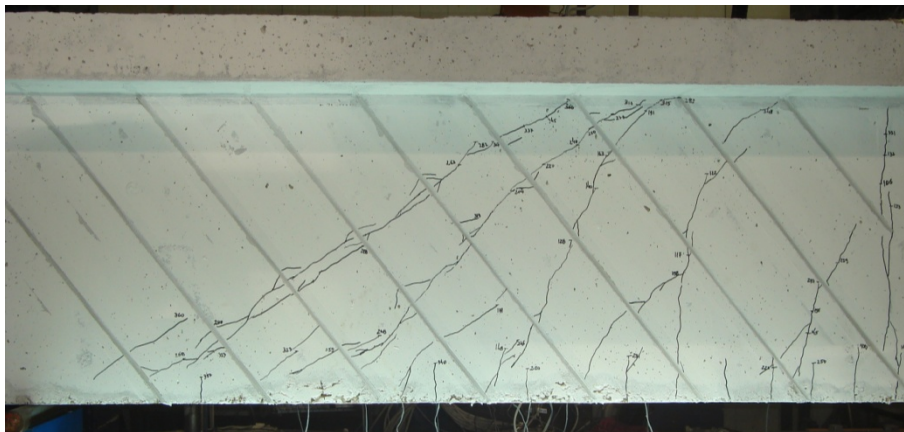


Figura 3.31 - Padrão de fendilhação da viga 3S-9LI-C antes do carregamento cíclico.



Figura 3.32 - Padrão de fendilhação da viga 3S-9LI-C após o carregamento cíclico.

3.5.2.2 - Capacidade de carga das vigas até à rotura

Uma vez que as vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C não atingiram a rotura no decorrer do carregamento cíclico, estas foram posteriormente submetidas a um ensaio monotónico até à rotura, à semelhança do que ocorreu com as vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M. Na Tabela 3.8 apresenta-se o valor da carga máxima ($F_{máx}$) das duas vigas ensaiadas à rotura após o carregamento cíclico (vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C), assim como, o da viga 3S-R testada por Costeira (2010). Além disso, também se apresentam os valores dos fatores $\Delta F_{máx}/F_{máx}^{3S-R}$, $F_{máx}/F_{máx}^{3S-R}$ e $u_{F_{máx}}$, cujo significado já foi anteriormente apresentado no âmbito da Tabela 3.6.

Na Figura 3.33 apresentam-se as curvas de comportamento Força vs. Deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas 3S-R, 3S-7LV-C e 3S-9LI-C. A análise desta figura permite verificar que as vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C apresentam uma menor rigidez inicial em relação

à viga 3S-R. Esta diferença deve-se ao carregamento cíclico a que as vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C foram sujeitas. Posteriormente a esta fase, em que as vigas reforçadas apresentam menor rigidez que a viga não reforçada, verifica-se que as soluções de reforço ao corte com CFRP testadas proporcionaram aumentos quer de rigidez quer de capacidade de carga máxima ($F_{máx}$).

Tabela 3.8 - Principais resultados em termos de capacidade de carga das vigas ensaiadas (ensaio à rotura após o carregamento cíclico).

Viga	$F_{máx}$ [kN]	$\Delta F_{máx}/F_{máx}^{3S-R}$ [%]	$F_{máx}/F_{máx}^{3S-R}$	$u_{F_{máx}}$ [mm]
3S-R	331,4	0,0	1,00	10,68
3S-7LV-C	516,3	55,8	1,56	12,11
3S-9LI-C	593,5	79,1	1,79	14,91

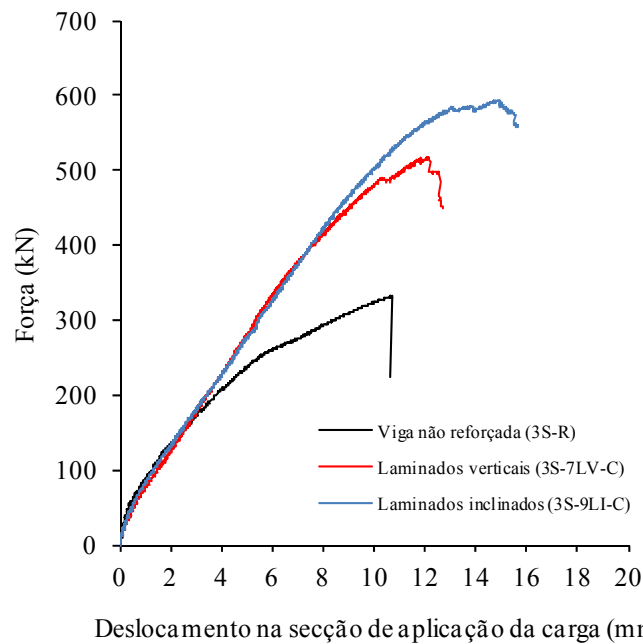


Figura 3.33 - Curvas de comportamento Força vs. Deslocamento na secção de aplicação da carga.

Os valores apresentados na Tabela 3.8 permitem constatar que o acréscimo de carga máxima alcançado pelas soluções de reforço adotadas variou entre os 56% e os 79%. No que diz respeito aos valores da deformação na rotura ($u_{F_{máx}}$) verificou-se que na viga reforçada ao corte com laminados de CFRP inclinados (3S-9LI-C) ocorreu um acréscimo de cerca de 40% relativamente à viga de referência (3S-R), enquanto que no caso da viga 3S-7LV-C esse acréscimo foi de 13%.

Em termos da orientação dos laminados de CFRP constatou-se que a solução de reforço com laminados inclinados a 52° (viga 3S-9LI-C) foi mais eficaz do que a solução de reforço com laminados inseridos verticalmente (viga 3S-7LV-C). O acréscimo de carga máxima registado para a viga 3S-7LV-C foi cerca de 71% do alcançado pela viga 3S-9LI-C. Além disso, também se constatou que a solução de reforço com laminados inclinados (viga 3S-9LI-C) conduziu a uma valor de $u_{F_{max}}$ 23% superior ao verificado na viga com laminados na vertical (viga 3S-7LV-C). As razões do melhor desempenho da solução de reforço com laminados inclinados já foram referidas anteriormente no âmbito da comparação da eficácia das soluções de reforço das vigas 3S-7LV-M e 3S-9LI-M.

Nas Figuras 3.34 e 3.35 estão representados os padrões de fendilhação observados nas vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C após a realização do ensaio à rotura. Em ambos os vãos de corte, mas com particular destaque para o vão de corte a , é possível verificar que a viga reforçada com laminados de CFRP inclinados a 52° (viga 3S-9LI-C) apresenta um padrão de fendilhação mais difuso do que o observado na viga reforçada com laminados de CFRP verticais (viga 3S-7LV-C).

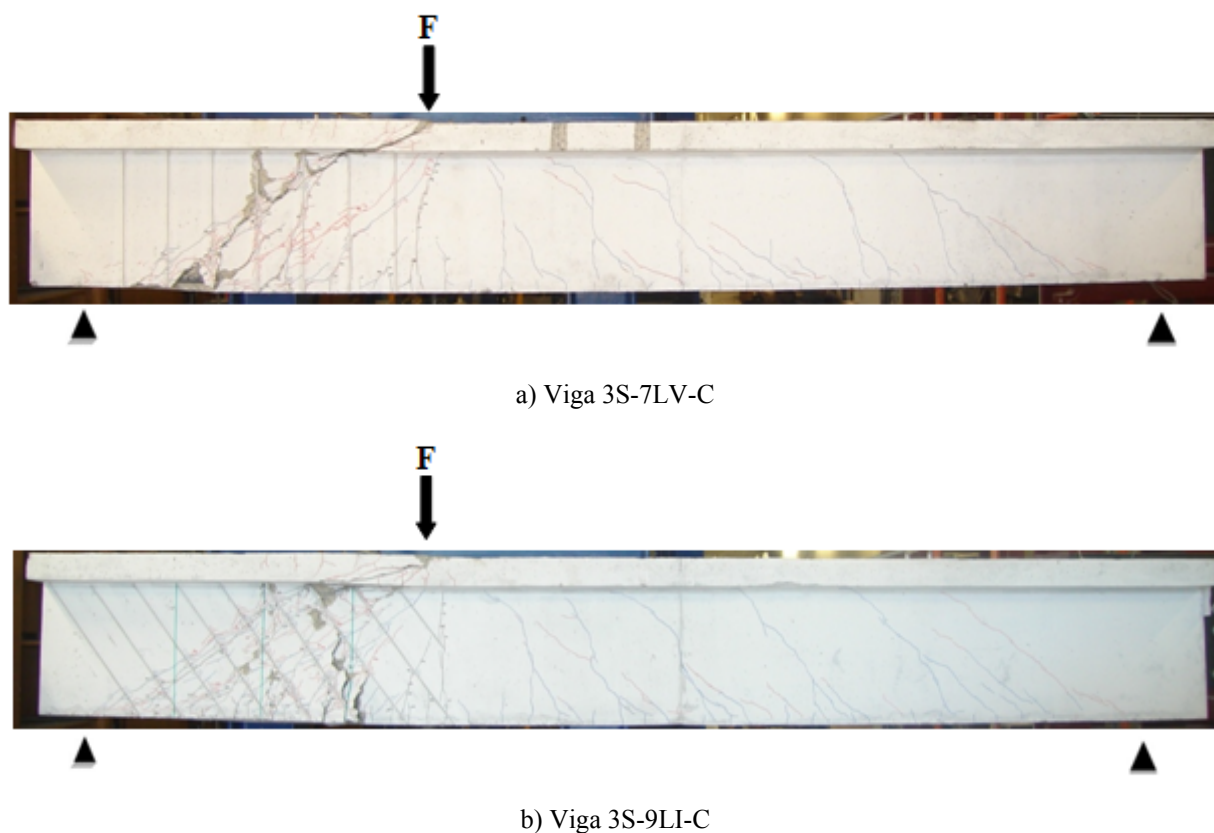


Figura 3.34 - Padrão de fendilhação instalado nas vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C (face da frente).

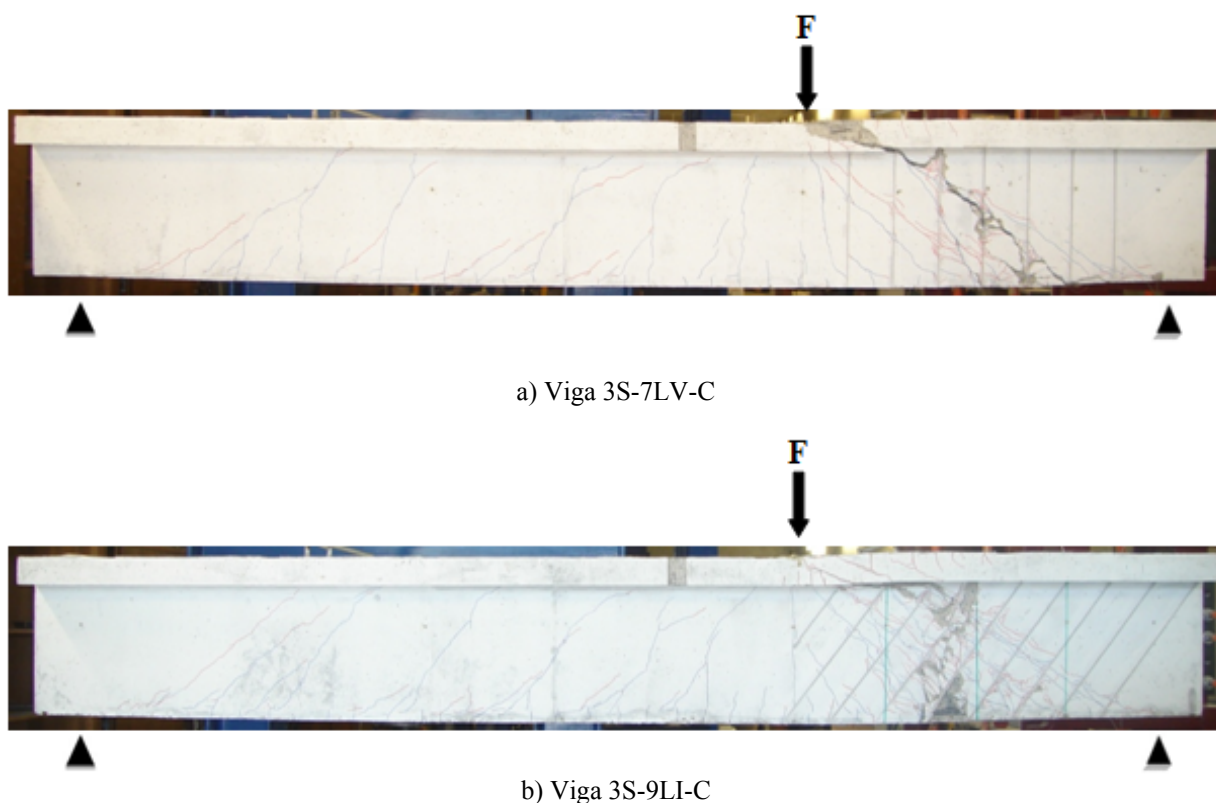


Figura 3.35 - Padrão de fendilhação instalado nas vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C (face de trás).

3.5.2.3 - Modos de rotura

De acordo com o ilustrado nas Figuras 3.34 e 3.35, o modo de rotura das vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C foi por corte e ocorreu no menor vão de corte a .

Na Figura 3.36 apresentam-se alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-7LV-C (viga reforçada em cada uma das faces do vão de corte a com sete laminados inseridos na vertical). Através da análise desta figura é possível verificar que durante o ensaio ocorreu a formação de uma nova fenda de corte no vão de corte a (as fendas que ocorreram durante o ensaio à rotura estão marcadas a vermelho). A referida fenda ocorreu cerca dos 489 kN, o que motivou uma diminuição momentânea da capacidade de carga da viga (Figura 3.33). Com o decorrer do ensaio, a capacidade de carga voltou a aumentar até alcançar a sua capacidade máxima ($F_{máx} = 516,3$ kN) que ocorreu imediatamente antes de se dar o destacamento da parte superior do terceiro laminado a contar da secção de aplicação da carga.

A Figura 3.37 mostra um pormenor do modo de rotura que ocorreu na viga 3S-7LV-C.

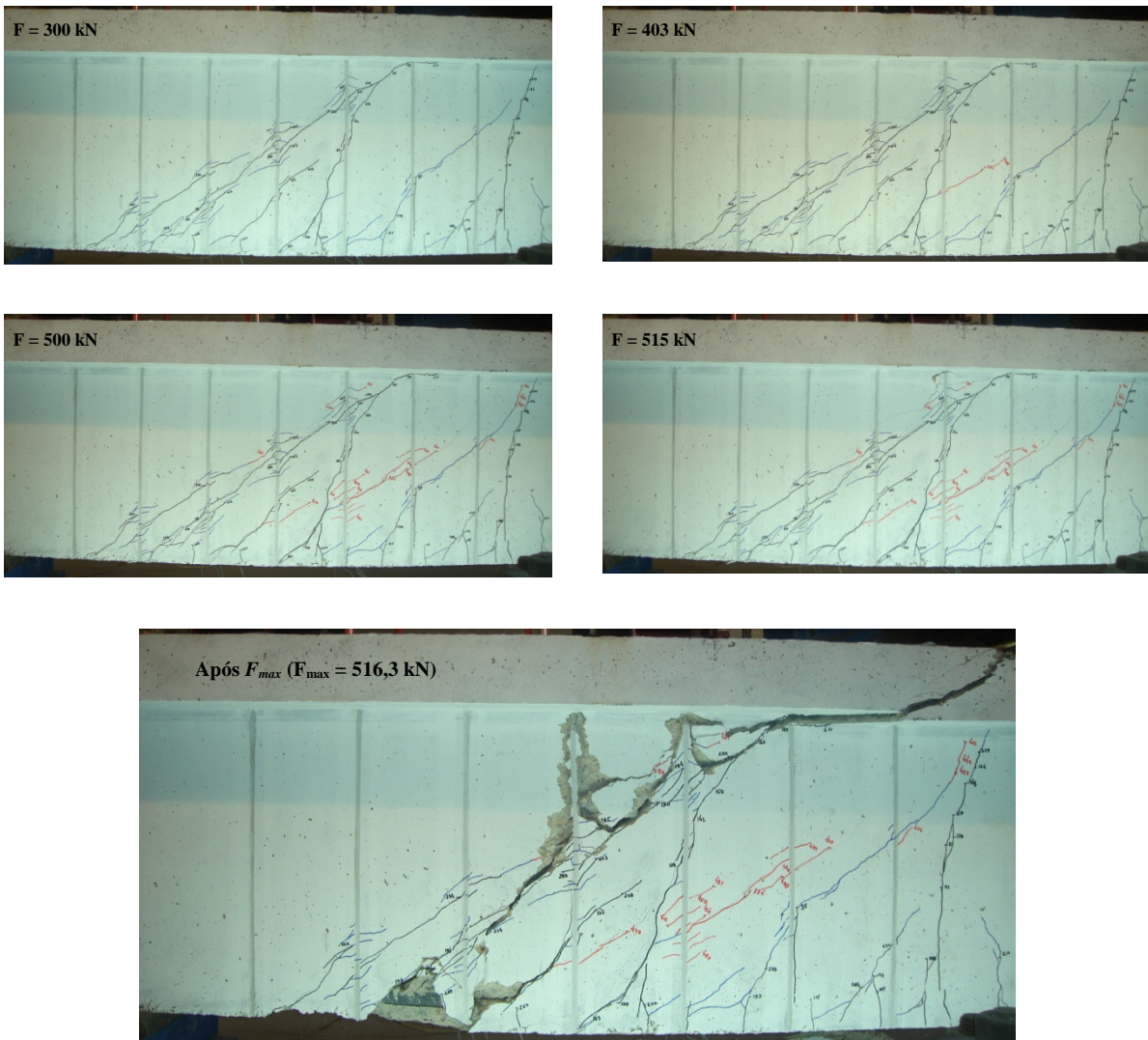


Figura 3.36 - Alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-7LV-C.

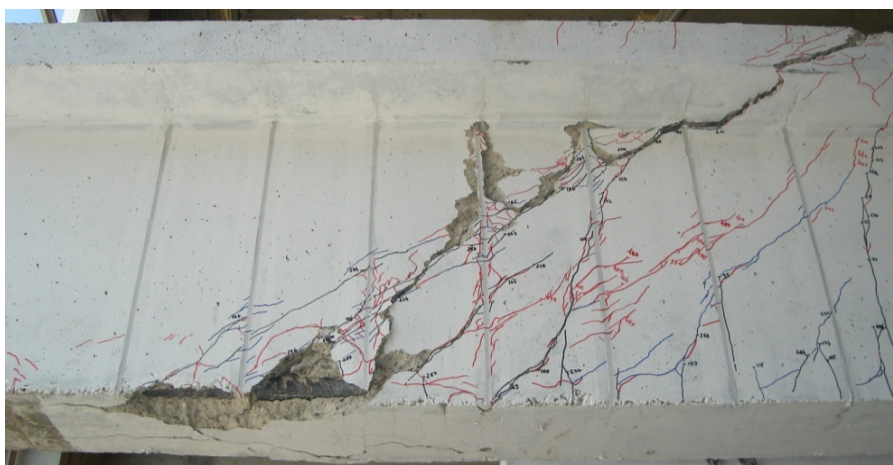


Figura 3.37 - Pormenor do modo de rotura da viga 3S-7LV-C.

Na Figura 3.38 apresentam-se alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-9LI-C (viga reforçada em cada uma das faces do vão de corte a com nove laminados inseridos com uma inclinação de 52°). Nesta viga desenvolveram-se algumas fendas no vão de corte a (as fendas que ocorreram durante o ensaio à rotura estão marcadas a vermelho), tendo o padrão de fendilhação sido mais difuso do que o registado na viga 3S-7LV-C. Cerca dos 580 kN registou-se uma quebra da rigidez da viga (Figura 3.33) devido à cedência da parte inferior do sexto laminado a contar da secção de aplicação da carga. Devido à presença dos elementos resistentes ao corte adjacentes, a capacidade de carga da viga foi recuperada sendo possível suportar cargas superiores a 580 kN. Com efeito, a capacidade de carga máxima da viga (593,5 kN) foi alcançada imediatamente antes de ocorrer a cedência da parte superior do quarto laminado a contar da secção de aplicação da carga.

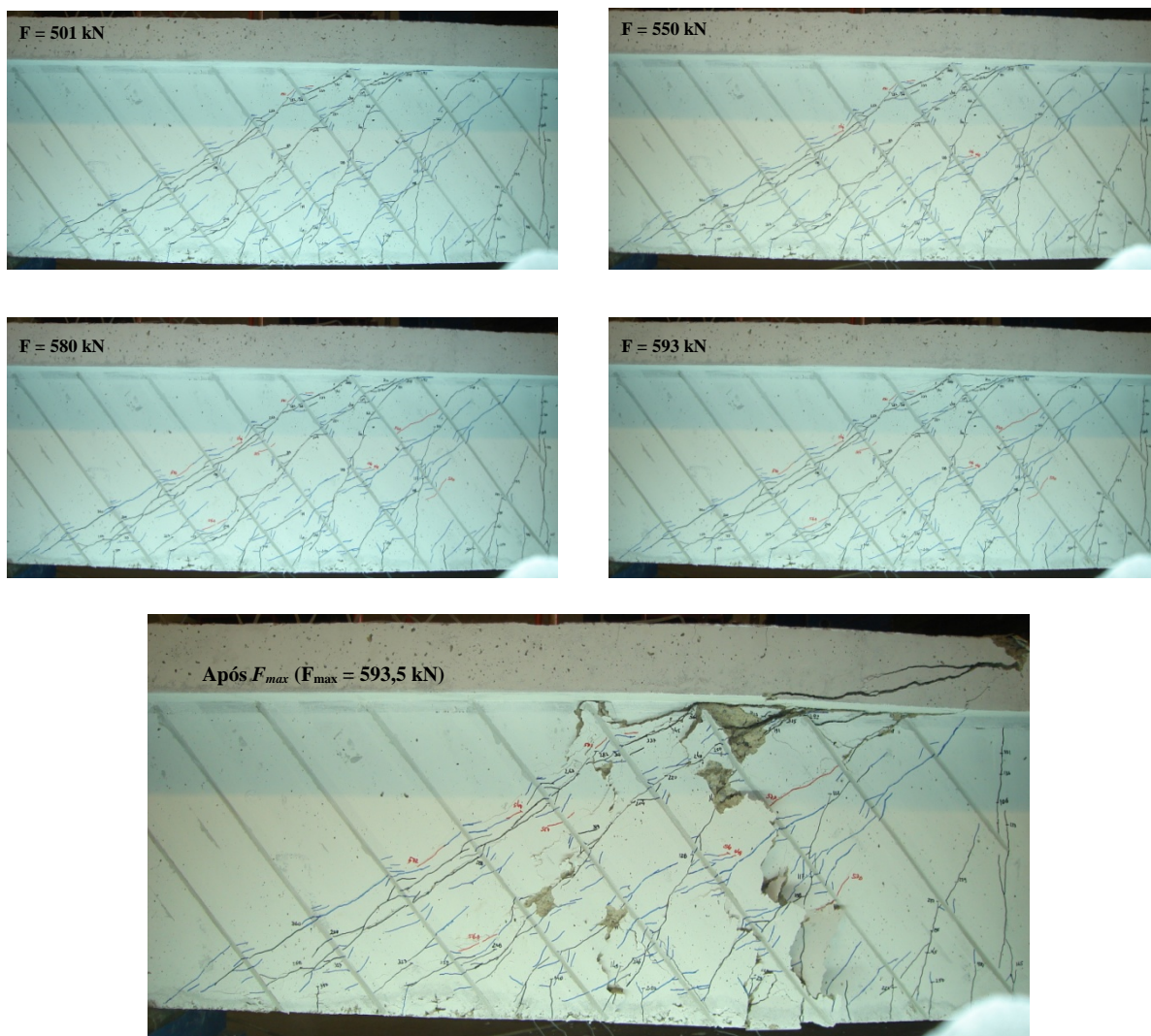


Figura 3.38 - Alguns instantes da sequência do ensaio à rotura da viga 3S-9LI-C.

A Figura 3.39 mostra alguns pormenores do modo de rotura da viga 3S-9LI-C (as retas verticais representam o posicionamento dos estribos).



Figura 3.39 - Pormenores do modo de rotura da viga 3S-9LI-C.

3.5.2.4 - Extensões nas armaduras transversais e nos laminados de CFRP (ensaio monotónico)

Na Figura 3.40 apresenta-se, para as vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C, a relação entre as extensões registadas nos extensómetros colados no estribo de aço instrumentado (ver Figura 3.17) e a força aplicada nas vigas, até ao momento em que estas atingiram a sua capacidade de carga máxima. A análise da Figura 3.40 permite concluir que em ambas as vigas, a sua capacidade de carga máxima foi atingida com a armadura do estribo de aço instrumentado em cedência.

Na Figura 3.41 apresenta-se, para as vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C, a relação entre as extensões registadas nos extensómetros colados nos laminados de CFRP instrumentados (dois por viga de acordo com a Figura 3.18) e a força aplicada nas vigas, até ao momento em que estas atingiram a sua capacidade de carga máxima. Na Figura 3.41, o CFRP A era o laminado que se encontrava mais próximo da secção de aplicação da carga, enquanto o CFRP B era o laminado que se situava mais próximo do apoio. O posicionamento dos quatro extensómetros (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4) em cada CFRP instrumentado está representado na Figura 3.15.

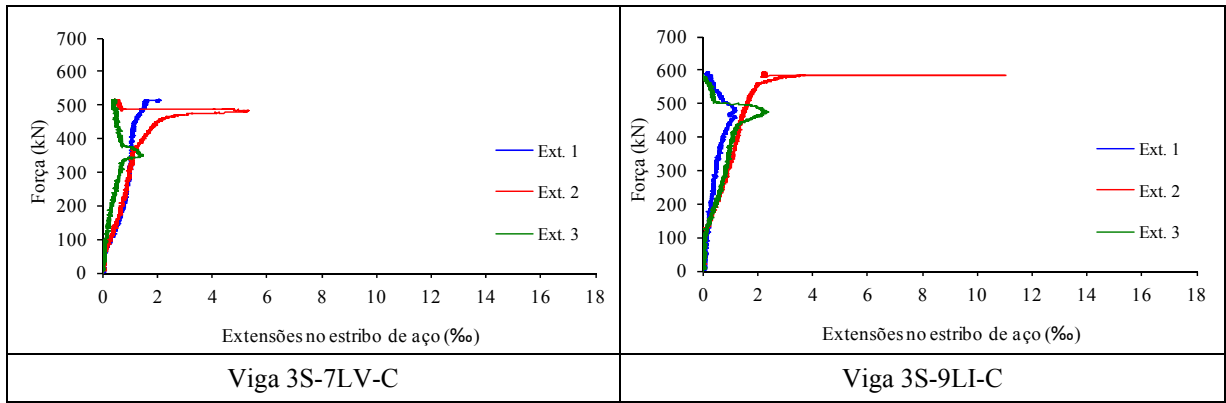


Figura 3.40 - Variação das extensões no estribo de aço instrumentado da viga 3S-7LV-C e da viga 3S-9LI-C.

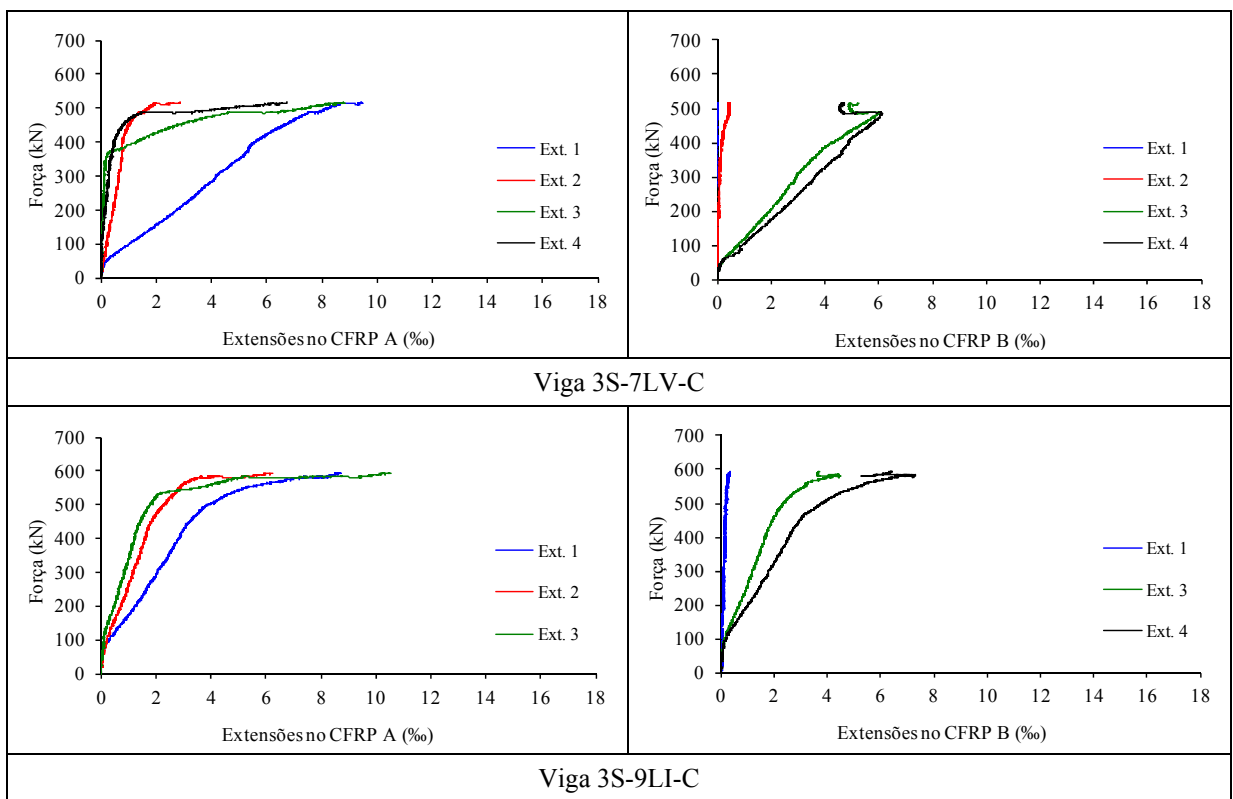


Figura 3.41 - Variação das extensões nos laminados instrumentados da viga 3S-7LV-C e da viga 3S-9LI-C.

Na Tabela 3.9 apresenta-se, para cada uma das vigas ensaiadas, os valores das extensões registadas nos quatro extensómetros (Ext.1, Ext.2, Ext.3 e Ext.4) aplicados em cada um dos CFRP instrumentados (CFRP A e CFRP B) na altura em que as vigas alcançaram a carga máxima ($F_{máx}$). Para os casos em que a extensão máxima no CFRP se verificou para uma carga inferior à carga máxima ($F_{máx}$), os valores registados nos extensómetros nesse instante são apresentados entre parêntesis curvos. Na Tabela 3.9 também se apresenta o valor da

extensão máxima no CFRP ($\varepsilon_{CFRP}^{máx}$) registado nos extensómetros até as vigas atingirem a sua capacidade de carga máxima.

Tabela 3.9 - Extensões registadas nos extensómetros colados nos laminados das vigas 3S-7LV-C e 3S-9LI-C (ensaio monotónico).

Viga	CFRP	$\varepsilon_{Ext.1}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.2}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.3}$ [‰]	$\varepsilon_{Ext.4}$ [‰]	$\varepsilon_{CFRP}^{máx}$ [‰]
3S-7LV-C	A	9,49	2,86	8,81	6,74	9,49
	B	(a)	0,44 (0,46)	5,27 (6,01)	4,72 (6,13)	
3S-9LI-C	A	8,73	6,27	10,53	(a)	10,53
	B	0,36	(a)	3,69 (4,47)	6,41 (7,31)	

(a) Estes extensómetros não funcionaram.

Da análise dos dados presentes na Tabela 3.9 é possível verificar que o valor da extensão máxima registada nos laminados de CFRP ($\varepsilon_{CFRP}^{máx}$) variou entre os 9,5‰ e os 10,5‰. A média dos valores da extensão $\varepsilon_{CFRP}^{máx}$ foi de 10‰, valor este que corresponde a 56,2% do valor da extensão última dos laminados de CFRP, registada nos ensaios de tração realizados (17,8‰ - Tabela 3.3).

Em termos de orientação do CFRP, os dados da Tabela 3.9 permitem verificar que a solução mais eficaz em termos da mobilização das elevadas potencialidades do reforço de CFRP foi a solução com laminados inclinados a 52°. Com efeito, as soluções de reforço com laminados verticais e com laminados inclinados a 52° conduziram a uma mobilização do reforço de CFRP em cerca de 53% (extensão de 9,5‰) e 59% (extensão de 10,5‰), respetivamente.

3.5.3 - Efeito do carregamento cíclico

Na presente secção será feita uma avaliação do efeito do carregamento cíclico na eficácia do reforço ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM). Para tal, será comparado o comportamento à rotura sob carregamento monotónico da viga 3S-7LV-M (sem carregamento cíclico) com o da viga 3S-7LV-C (com carregamento cíclico) e o comportamento à rotura sob carregamento monotónico da viga 3S-9LI-M (sem carregamento cíclico) com o da viga 3S-9LI-C (com carregamento cíclico).

Na Tabela 3.10 apresenta-se, para cada uma das vigas anteriormente referidas, o valor da carga máxima ($F_{m\acute{a}x}$) e o valor da extensão máxima registada nos laminados de CFRP instrumentados com extensómetros elétricos ($\varepsilon_{CFRP}^{m\acute{a}x}$).

Tabela 3.10 - Resultados experimentais das vigas 3S-7LV-M, 3S-7LV-C, 3S-9LI-M e 3S-9LI-C.

Viga	Carregamento Cíclico			Ensaio Monotónico à rotura	
	$F_{m\acute{i}n} - F_{m\acute{a}x}^{(a)}$ [kN]	Frequência [Hz]	Nº de ciclos	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\varepsilon_{CFRP}^{m\acute{a}x}$ [‰]
3S-7LV-M	-	-	-	472,1	9,57
3S-7LV-C	185 - 285 (40% - 60%)	2	1000000	516,3	9,49
3S-9LI-M	-	-	-	605,0	14,39
3S-9LI-C	240 - 360 (40% - 60%)	2	1000000	593,5	10,53

(a) O valor entre parêntesis refere-se à percentagem da carga máxima ocorrida na viga semelhante (viga 3S-7LV-M para o caso da viga 3S-7LV-C e viga 3S-9LI-M para o caso da viga 3S-9LI-M) solicitada apenas com carregamento monotónico até à rotura.

Em termos dos valores da carga máxima ($F_{m\acute{a}x}$) verifica-se que as vigas reforçadas ao corte com laminados inclinados (3S-9LI-M e 3S-9LI-C) tiveram valores semelhantes (diferença inferior a 2%). Em relação à solução de reforço com laminados verticais, a viga 3S-7LV-C teve uma carga máxima cerca de 9% superior à da viga 3S-7LV-M. Para este cenário deve ter contribuído o facto de a viga 3S-7LV-C ter tido mais elementos resistentes à fenda de rotura de corte que a viga 3S-7LV-M (ver Figura 3.42). Tendo em conta a análise dos valores de $F_{m\acute{a}x}$ verifica-se que, quer para a solução de laminados na vertical como para a solução de laminados inclinados, o carregamento cíclico não afetou o desempenho do reforço de CFRP em termos do acréscimo da capacidade resistente ao corte das vigas de betão armado.

Em termos dos valores da extensão máxima registada nos laminados instrumentados ($\varepsilon_{CFRP}^{m\acute{a}x}$) verificaram-se elevados níveis de mobilização do reforço de CFRP, independentemente da orientação do CFRP e da imposição ou não do carregamento cíclico de um milhão de ciclos. O nível de mobilização do CFRP foi bastante semelhante nas duas vigas que foram reforçadas com laminados verticais. Em relação às vigas reforçadas com laminados inclinados, a extensão máxima registada nos laminados de CFRP instrumentados da viga 3S-9LI-M foi superior à que foi registada nos laminados de CFRP instrumentados da viga 3S-9LI-C. Apesar

desta diferença, e tal como se referiu anteriormente, a capacidade de carga máxima destas duas vigas foi praticamente igual.

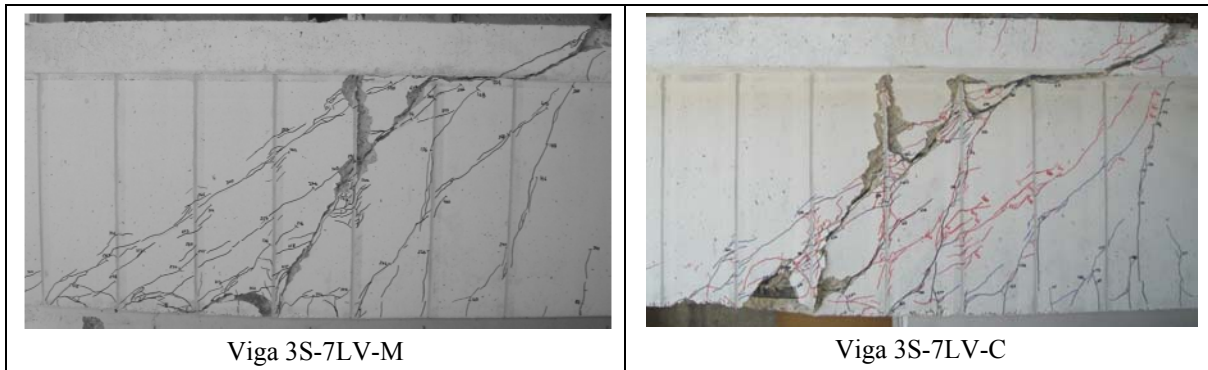


Figura 3.42 - Comparação da fenda de rotura de corte das vigas 3S-7LV-M e 3S-7LV-C.

Tendo em conta o tipo de carregamento cíclico a que as vigas testadas foram sujeitas (número de ciclos, frequência, nível de carga mínima e máxima e correspondente intervalo de carga) é possível concluir que o referido carregamento cíclico não penalizou a eficácia da técnica de reforço ao corte em estudo. Esta constatação demonstra a viabilidade da utilização da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado quando sujeitas a cargas de fadiga.

Capítulo 4

Considerações finais

4.1 - CONCLUSÕES GERAIS

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do reforço ao corte de vigas de betão armado utilizando a técnica da inserção de laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas (técnica NSM). Concretamente, foi realizada uma investigação experimental para avaliar o efeito de um carregamento cíclico no comportamento de vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos. Foram testadas duas soluções de reforço ao corte, uma com laminados na vertical e outra com laminados inclinados a 52°, e foram analisados dois níveis de carregamento cíclico. As vigas de betão armado testadas tinham secção transversal em T de altura elevada (600 mm) e as duas soluções de reforço ao corte anteriormente referidas foram aplicadas a vigas com e sem carregamento cíclico.

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

- De um modo geral, verificou-se que a utilização da técnica de reforço ao corte por inserção de laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM) permitiu aumentos consideráveis na capacidade de carga das vigas, independentemente da orientação dos laminados de CFRP e de se ter imposto ou não um carregamento cíclico. Tendo por base os resultados obtidos na viga de referência não reforçada (3S-R), ensaiada por Costeira (2010), constatou-se que as soluções de reforço testadas no âmbito desta dissertação, associadas a percentagens de CFRP que variaram entre os 0,089% e os 0,113%, permitiram aumentos da capacidade de carga máxima que variaram entre os 43% e os 83%. Estes valores comprovam que a técnica de reforço ao corte em estudo é bastante eficaz quando aplicada em vigas de betão armado de altura elevada.
- As extensões máximas registadas nos extensómetros colados nos laminados de CFRP variaram entre os 9,5% e os 14,4%. Estes valores demonstram que a técnica NSM com laminados de CFRP quando aplicada no reforço ao corte de vigas altas de betão armado permite consideráveis níveis de mobilização do CFRP. Tendo em conta que o valor médio da extensão máxima dos laminados de CFRP obtido em ensaios de tração uniaxial foi de

17,8%, verificou-se que o grau de mobilização do CFRP, para as soluções de reforço testadas, variou entre os 53% e os 81%.

- Relativamente à orientação do CFRP, constatou-se que a solução de reforço com laminados inclinados a 52° foi mais eficaz do que a solução de reforço com laminados inseridos verticalmente, independentemente da imposição ou não de um carregamento cíclico. Com efeito, o valor médio do acréscimo de carga máxima obtido nas vigas reforçadas com laminados inclinados (viga 3S-9LI-M e viga 3S-9LI-C) foi 64% superior ao valor médio do acréscimo de carga máxima obtido nas vigas reforçadas com laminados verticais (viga 3S-7LV-M e viga 3S-7LV-C). Além de proporcionar maior acréscimo de carga máxima, o reforço com laminados inclinados permitiu maiores níveis de mobilização do reforço de CFRP (70% no caso dos laminados inclinados e 54% no caso dos laminados verticais).
- Tendo por base os resultados obtidos por Costeira (2010) em vigas semelhantes às que foram testadas no presente programa experimental, mas reforçadas com menores percentagens de reforço de CFRP, conclui-se que o aumento da percentagem de reforço de CFRP proporcionou um maior aumento no acréscimo de carga máxima proporcionado pelo reforço de CFRP.
- O modo de rotura das vigas testadas, independentemente da ter sido imposto ou não um carregamento cíclico, foi a cedência de laminados de CFRP atravessados pela fenda de rotura de corte. Os laminados que cederam (sem rotura do CFRP) continham betão adjacente ao comprimento destacado do CFRP.
- As vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos, que foram submetidas a um carregamento de um milhão de ciclos com uma frequência de 2 Hz e em que o valor mínimo e máximo da carga cíclica era, respetivamente, de 40% e 60% da carga máxima registada em vigas semelhantes sem carregamento cíclico, não atingiram a rotura durante o carregamento cíclico, independentemente das soluções de reforço testadas e do nível de carregamento cíclico imposto. Verificou-se que na viga 3S-7LV-C não existiu uma alteração significativa do padrão de fendilhação registado antes e após o carregamento cíclico. No caso da viga 3S-9LI-C, sujeita a um carregamento cíclico mais severo, as alterações do padrão de fendilhação registado antes e após o carregamento cíclico foram maiores do que as verificadas na viga 3S-7LV-C.
- Os valores da capacidade de carga máxima das vigas com CFRP, que foram submetidas a carregamento cíclico, foram praticamente iguais aos obtidos por vigas semelhantes mas

que não foram sujeitas a carregamento cíclico. Com efeito, no caso do reforço com laminados inclinados a 52°, o valor da carga máxima da viga submetida a um carregamento cíclico foi cerca de 2% inferior ao da viga semelhante sem carregamento cíclico. No caso do reforço com laminados verticais, o valor da carga máxima da viga submetida a um carregamento cíclico foi cerca de 9% superior ao da viga semelhante sem carregamento cíclico.

- Tendo por base os resultados obtidos no programa experimental realizado, foi possível constatar que o tipo de carregamento cíclico imposto às vigas testadas na presente dissertação (números de ciclos, frequência, nível de carga e amplitude) não penalizou a eficácia da técnica de reforço ao corte em estudo. Esta constatação demonstra a viabilidade da utilização da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado quando sujeitas a cargas de fadiga.

4.2 - DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A presente dissertação constitui mais uma contribuição ao nível do conhecimento na área do reforço ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas (técnica NSM). Em termos de desenvolvimentos futuros nesta área, alguns aspetos devem ser objeto de análise:

- Desenvolvimento de mais investigação experimental no âmbito do comportamento à fadiga de vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos, designadamente em termos das características do carregamento cíclico.
- Avaliação do comportamento monotónico e cíclico de vigas de betão armado reforçadas simultaneamente ao corte e à flexão com laminados de CFRP inseridos.
- Avaliação da durabilidade dos reforços de CFRP aplicados de acordo com a técnica NSM.

Capítulo 5

Referências bibliográficas

Arquez, A.P., 2010, “*Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado*”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Brasil, Maio, 242 pp.

Azevedo, D.M.M., 2008, “*Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP. Recomendações para Dimensionamento*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Novembro, 238 pp.

Badawi, M. e Soudki, K., 2009, “*Fatigue behavior of the RC beams strengthened in shear with NSM CFRP rods*”, Journal of Composites for Construction, vol.13, nº5, September-October, pp. 415-421.

Bae, S.W., Murphy, M., Mirmiran, A. e Belarbi, A., 2013, “*Behavior of RC T-beams strengthened in shear with CFRP under cyclic loading*”, Journal of Bridge Engineering, vol.18, nº2, February, pp. 99-109.

Barnes, R.A. e Mays, G.C., 1999, “*Fatigue performance of concrete beams strengthened with CFRP plates*”, Journal of Composites for Construction, vol.3, nº2, May, pp. 63-72.

Barros, J.A.O., 2004, “*Materiais compósitos no reforço de estruturas*”, Jornadas de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, 14 pp.

Barros, J.A.O., 2007, “*Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão – Parte I: propriedades e técnicas*”, Revista Construção Magazine, 22, pp. 26-35.

Bousselham, A. e Chaallal, O., 2004, “*Shear strengthening reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer: assessment of influencing parameters and required research*”, ACI Structural Journal, vol. 101, nº 2, March-April, pp. 219-227.

Carolin, A., 2003, “*Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*”, PhD Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Sweden, June, 190 pp.

Chaallal, O., Boussaha, F. e Bousselham, A., 2009, “*Fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened in shear with advanced composite*”, 9th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9), Sydney, Australia, July, 4 pp.

Chaallal, O., Mofidi, A., Benmokrane, B. e Neale, K., 2011, “*Embedded through - section FRP rod method for shear strengthening of RC beams: Performance and comparison with existing techniques*”, Journal of Composites for Construction, vol.15, n°3, May-June, pp. 374-383.

Cisneros, D., Arteaga, A., De Diego, A., Alzate, A. e Perera, R., 2012, “*Experimental study on NSM FRP shear retrofitting of RC beams*”, 6th International Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2012), Rome, Italy, 13-15 June, 8 pp.

Costeira, F.V., 2010, “*Reforço ao corte de vigas de betão armado de altura elevada com laminados de CFRP inseridos*”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Outubro, 89 pp.

Czaderski C., 2000, “*Shear strengthening of reinforced concrete with CFRP*”, 45th International SAMPE Symposium, vol. 45, May 21-25, pp. 880-894.

Czaderski C., 2002, “*Shear strengthening with prefabricated CFRP L-shaped plates. Test beams S1 to S6, EMPA*”, Report n° 116/7, August, Switzerland.

Czaderski, C. e Motavalli, M., 2004, “*Fatigue behavior of CFRP L-shaped plates for shear strengthening of RC T-beams*”, Composites Part B: Engineering, vol. 35, n°4, pp. 279-290.

De Lorenzis, L. e Nanni, A., 2001, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods*”, ACI Structural Journal, vol.98, n°1, January-February, pp. 60-68.

Dias, S. J. E., Juvandes, L. e Figueiras, J., 2006, “*Estruturas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas de CFRP*”, Revista IBRACON de Estruturas, vol. 2, n°2, Junho, pp. 252-275.

- Dias, S.J.E., 2008, “*Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com a técnica de inserção de laminados de CFRP*”, Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Julho, 391 pp.
- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2010, “*Performance of reinforced concrete T beams strengthened in shear with NSM CFRP laminates*”, Engineering Structures Journal, vol. 32, nº 2, February, pp. 373-384.
- Ekenel, M., Rizzo, A., Myers, J.J. e Nanni, A., 2006, “*Flexural fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP fabric and procured laminate systems*”, Journal of Composites for Construction, vol.10, nº5, October, pp. 433-442.
- EN 206-1, 2000, “*Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*”, European standard, CEN, 69 pp.
- EN 10002-1, 1990, “*Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)*”, European standard, CEN, 35 pp.
- Firmo, J.P.L.C., 2010, “*Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP)*”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Dezembro, 288 pp.
- Godat, A., Chaallal, O. e Neale, K.W., 2013, “*Nonlinear finite element models for the embedded through-section FRP shear-strengthening method*”, Journal Computers & Structures, vol.119, April, pp. 12-22.
- Goebel, J.H., Johnson, B.A. e Higgins, C., 2012, “*Strength and durability of near-surface mounted CFRP bars for shear strengthening reinforced concrete bridge girders*”, Final Report SPR 712, March, 123 pp.
- Heffernan, P.J. e Erki, M.A., 2004, “*Fatigue behaviour of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced plastic laminates*”, Journal of Composites for Construction, vol.8, nº2, April, pp. 132-140.
- Hsu, T.T.C., 1981, “*Fatigue of plain concrete*”, ACI Journal, Michigan, pp. 292-304.
- ISO 527-5, 1997, “*Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*”, International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp.

Juvandes, L.F.P., 1999, “*Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Setembro, 385 pp.

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

Kim, Y.J. e Heffernan, P.J., 2008, “*Fatigue behavior of externally strengthened concrete beams with fiber-reinforced polymers: State of the art*”, Journal of Composites for Construction, vol.12, nº3, June, pp.246-256.

Masoud, S., Soudki, K., e Topper, T., 2005, “*Post-repair fatigue performance of FRP-repaired corroded RC beams: Experimental and analytical investigation.*”, Journal of Composites for Construction, vol.9, nº5, pp.441-449.

NP EN 1992-1-1, 2010, “*Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.*”, Comité Europeu de Normalização, Março, 259pp.

S&P, 2008, “*Reinforcement International AG*”, S&P Clever Reinforcement Company, CH-6440, Brunnen, Switzerland, <http://www.sp-reinforcement.eu>.

Sika®CarboShear L®, 2003, “*Système de renforcement à l’effort tranchant à haute résistance en PRFC*”, Notice technique, Sika Schweiz AG, Suíça.

Yost, J.R., Gross, S.P. e Deitch, M.J., 2007, “*Fatigue behavior of concrete beams strengthened in flexure with near surface mounted CFRP.*”, 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), University of Patras, Patras, Greece, 16-18 July, pp. 1-8.