



Carla Sofia Carneiro Gomes da Silva

Validação de formulações analíticas para o reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carla Sofia Carneiro Gomes da Silva

Validação de formulações analíticas para o
reforço ao corte de vigas de betão armado
com compósitos 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

DECLARAÇÃO

Nome: Carla Sofia Carneiro Gomes da Silva

Endereço electrónico: a50867@alunos.com

Número do Bilhete de Identidade: 13190387

Título dissertação:

Validação de formulações analíticas para o reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP

Orientador: Professor Doutor Salvador José Esteves Dias

Ano de conclusão: 2013

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia Civil – Perfil Estruturas e Geotecnia

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ___/___/___

Assinatura:

Agradecimentos

No decurso da realização deste trabalho, existem pessoas e entidades sem as quais não era possível a conclusão e a concretização das metas propostas. Assim, expresso a minha gratidão para todos os que cooperaram na elaboração do projecto.

Ao Professor Doutor Salvador Dias, orientador, gostaria de agradecer por toda a disponibilidade e a partilha de conhecimentos. A sua orientação e a sua serenidade permitiram que a elaboração da presente dissertação fosse concebível.

Ao Professor Doutor Joaquim Barros reconheço gratidão pelo seu contributo: as suas experiências e as suas noções, o seu tempo e a sua inspiração pela procura do conhecimento sempre presentes.

Um agradecimento a Vítor Costa e a Jorge Costa por todo o apoio informático e cooperação prestados na concepção da ferramenta informática DABASUM.

Pelo tempo e apoio fulcral durante toda a produção deste trabalho, agradeço a todos os meus amigos.

Graças a todo o suporte energético, o auxílio incansável e a ajuda incessante foi possível a conclusão deste trabalho: expresso e reconheço gratidão pelos meus pais, Glória e Nuno Silva, e a minha irmã, Joana Silva.

Por último, deixo expresso os meus agradecimentos a todos, com a seguinte citação: “O conhecimento une cada um consigo mesmo e todos com todos.” (José Saramago, 1922-2010).

Resumo

A técnica da colagem externa com compósitos de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono), designada na literatura internacional por Externally Bonded Reinforcement (técnica EBR), e a técnica da inserção do CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento, designada na literatura internacional por Near Surface Mounted (técnica NSM), são duas técnicas de reforço que podem ser usadas para aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal de vigas de betão armado.

Nesta dissertação procedeu-se à ampliação da base de dados já existente com resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de FRP, usando a técnica EBR ou a técnica NSM. Esta base de dados foi inserida na ferramenta informática DABASUM (<http://dabasum.civil.uminho.pt/>), desenvolvida de forma a disponibilizar on-line a informação da referida base de dados. Os resultados experimentais da base de dados referentes quer à técnica EBR com CFRP como à técnica NSM com CFRP foram utilizados para verificar o desempenho de formulações analíticas existentes para o cálculo da contribuição do CFRP no aumento da capacidade resistente ao esforço transversal de vigas de betão armado (V_f). Foram analisadas quatro formulações para a técnica EBR e duas formulações para a técnica NSM. Estas formulações encontram-se programadas na DABASUM, que fornece para cada uma das formulações a relação entre o valor experimental e o valor analítico da contribuição V_f .

Palavras-chave: CFRP; reforço ao corte; vigas de betão armado; técnica EBR; técnica NSM; resultados experimentais; formulações analíticas.

Abstract

Externally Bonded Reinforcement (EBR) with Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) and Near Surface Mounted (NSM) with CFRP are two techniques that can be used to increase the shear capacity of reinforced concrete (RC) beams. In the EBR technique the CFRP is bonded to the external faces of the RC beams and in the NSM technique the CFRP is installed into pre-cut slits opened on the concrete cover of the lateral faces of the RC beams.

In this thesis it was done an expansion of the existing database with experimental results of RC beams strengthened in shear with FRP composites. It was considered RC beams strengthened in shear with FRP using EBR technique or NSM technique. This database was inserted into the computer tool DABASUM (<http://dabasum.civil.uminho.pt/>), developed to provide online information from the referred database. The experimental results of the database referring to the EBR technique with CFRP and to the NSM technique with CFRP were used to verify the performance of existing analytical formulations for calculating the contribution of the CFRP to increase the shear capacity of the RC beams (V_f). Four formulations for the EBR technique and two formulations for the NSM technique were analyzed. These formulations are programmed into DABASUM, which provides for each one formulation the ratio between the experimental value and the analytical value of the contribution (V_f).

Keywords: CFRP; shear strengthening; reinforced concrete beams; EBR technique; NSM technique, experimental results, analytical formulations.

Índice geral

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xvii
CAPÍTULO 1 – Introdução	1.1
1.1 Considerações gerais	1.1
1.2 Objetivos	1.2
1.3 Planificação da dissertação	1.3
CAPÍTULO 2 – Revisão Bibliográfica	2.1
2.1 Considerações gerais	2.1
2.2 Materiais compósitos de CFRP	2.1
2.3 Técnicas de reforço	2.5
2.3.1 Técnica de reforço externo (EBR)	2.6
2.3.2 Técnica de inserção do reforço (NSM)	2.12
2.3.3 Comparação entre a técnica de colagem externa e técnica de inserção.	2.21
CAPÍTULO 3 – Formulações analíticas	3.1
3.1 Considerações gerais	3.1

3.2	Formulação para a técnica da colagem externa.....	3.2
3.2.1	Formulação <i>fib</i> (2001).....	3.2
3.2.2	Formulação CNR (2004).....	3.4
3.2.3	Formulação CIDAR (2006).....	3.8
3.2.4	Formulação ACI (2008).....	3.11
3.3	Formulação para a técnica de inserção.....	3.14
3.3.1	Formulação Nanni <i>et al.</i> (2004).....	3.14
3.3.2	Formulação Dias e Barros (2013).....	3.17
CAPÍTULO 4	– Base de dados	4.1
4.1	Considerações gerais.....	4.1
4.2	Vigas reforçadas através da técnica da colagem externa.....	4.1
4.2.1	Descrição da base de dados.....	4.1
4.2.2	Exemplo da introdução na DABASUM de uma viga de betão armado reforçada ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica EBR.....	4.12
4.3	Vigas reforçadas com técnica inserção.....	4.17
4.3.1	Descrição da base de dados.....	4.17
4.3.2	Exemplo da introdução na DABASUM de uma viga de betão armado reforçada ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica NSM.....	4.22
CAPÍTULO 5	– Aplicação analítica	5.1
5.1	Considerações gerais.....	5.1
5.2	Verificação das formulações relacionadas com o reforço ao corte aplicado com a técnica da colagem externa (EBR).....	5.4

5.2.1	Formulação <i>fib</i> (2001).....	5.4
5.2.2	Formulação CNR (2004).....	5.6
5.2.3	Formulação CIDAR (2006).....	5.7
5.2.4	Formulação ACI (2008).....	5.9
5.2.5	Análise comparativa do desempenho das formulações <i>fib</i> , CNR, CIDAR e ACI	5.10
5.3	Verificação das formulações relacionadas com o reforço ao corte aplicado com a técnica de inserção (NSM).....	5.12
5.3.1	Formulação Nanni <i>et al.</i> (2004).....	5.12
5.3.2	Formulação Dias e Barros.....	5.15
5.3.3	Análise comparativa do desempenho das formulações Nanni <i>et al.</i> (2004) e Dias e Barros (2013).....	5.17
CAPÍTULO 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros		6.1
6.1	Considerações gerais.....	6.1
6.3	Investigações Futuras.....	6.2
CAPÍTULO 7 – Referências bibliográficas		7.1
ANEXO – Exemplos de aplicação da técnica de inserção		A.1

Índice de figuras

CAPÍTULO 2 – Revisão bibliográfica

Figura 2.1 – Componentes dos materiais compósitos de FRP (Nanni <i>et al.</i> , 2004).....	2.1
Figura 2.2 – Diagrama tensão vs extensão de distintos tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço – adaptado de ACI 440R-96, 1996 (Dias, 2008).	2.3
Figura 2.3 – Diferentes tipos de materiais compósitos de CFRP (Dias, 2008).	2.4
Figura 2.4 – Técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP.	2.5
Figura 2.5 – Diferentes configurações do reforço ao corte de CFRP usando a técnica EBR: colagem a) nas faces laterais; b) em forma de U; c) envolvendo a secção (Khalifa, 1999).	2.6
Figura 2.6 – Reforço ao corte com o CFRP: a) reforço contínuo; b) reforço discreto (Khalifa, 1999).	2.6
Figura 2.7 – Diferentes orientações do reforço ao corte com CFRP: a) fibras orientadas a 90°; b) fibras orientadas a 45° (Khalifa, 1999).	2.7
Figura 2.8 – Sobreposição de camadas de CFRP com diferente orientação das fibras: a) fibras a 0°/90°; b) fibras a +/- 45° (Khalifa, 1999).	2.7
Figura 2.9 – a) Reforço em forma de U sem ancoragem do CFRP; b) Reforço em forma de U com ancoragem do CFRP (Khalifa, 1999).	2.7
Figura 2.10 – Aplicação da técnica da colagem externa e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias, 2006).	2.8
Figura 2.11 – Exemplo de aplicação do reforço ao corte de uma viga de betão armado com faixas discretas de duas camadas de manta de CFRP unidirecional coladas externamente (Dias, 2008).	2.9

Figura 2.12 – Secção transversal de vigas reforçadas ao corte através da técnica EBR, com diferentes mecanismos de fixação (Modifi <i>et al.</i> , 2012).....	2.11
Figura 2.13 – Modos de rotura do CFRP: a) Rotura do CFRP (Beber, 2003); b) Destacamento do CFRP (Gamino, 2010).....	2.12
Figura 2.14 – Exemplo de aplicação a uma viga de betão armado reforçada ao corte, através de laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados no betão de recobrimento (Dias, 2008).....	2.13
Figura 2.15 – Aplicação da técnica NSM e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias, 2008).....	2.14
Figura 2.16 – Comportamento de uma viga de betão armado reforçada ao corte por inserção de laminados de CFRP (comparação com o comportamento de uma viga não reforçada), (Dias, 2008).....	2.15
Figura 2.17 – Efeito do betão na eficácia de uma solução de reforço de CFRP em termos de V_f (Dias, 2008).....	2.16
Figura 2.18 – Efeito da percentagem de estribos de aço na eficácia de uma solução de reforço de CFRP (Dias, 2008).....	2.16
Figura 2.19 – Grau de eficácia do reforço de CFRP em função da orientação do CFRP (Dias, 2008).....	2.17
Figura 2.20 – Modos de rotura característicos de vigas reforçadas com CFRP, através da técnica NSM (Dias e Barros, 2013).....	2.18
Figura 2.21 – Viga BF-360 (El-Hacha <i>et al.</i> , 2009).....	2.18
Figura 2.22 – Vigas testadas: geometria, armaduras de aço aplicadas em todas as vigas (Cisneros <i>et al.</i> , 2012).....	2.19
Figura 2.23 - Comparação do grau de fixação conferido pelas técnicas EBR e NSM para o mesmo laminado de CFRP (adaptado de Carolin (2003)).....	2.21
Figura 2.24 – Vigas testadas: geometria, armaduras de aço aplicadas em todas as vigas (Dias e Barros, 2010).....	2.22

Figura 2.25 – Vigas reforçadas ao corte com CFRP testadas por Dias e Barros (2010). 2.23

CAPÍTULO 3 – Formulações analíticas

Figura 3.1 – Identificação de parâmetros intervenientes na formulação *fib* (Areias, 2010).
..... 3.2

Figura 3.2 – Identificação de parâmetros intervenientes na formulação CNR (Areias, 2010).
..... 3.5

Figura 3.3 – Identificação de parâmetros intervenientes na formulação do CIDAR. 3.8

Figura 3.4 – Representação esquemática dos parâmetros necessários para a formulação *ACI* (Areias, 2010). 3.12

Figura 3.5 – Representação esquemática das variáveis utilizadas na formulação de Nanni *et al.* (2004), por exemplo $\sum_i L_i = L_2 + L_3 + L_4$ (Barros e Dias, 2006). 3.15

Figura 3.6 – Representação esquemática de l_{max} (Barros e Dias, 2006). 3.16

CAPÍTULO 4 – Base de dados

Figura 4.1 – Distribuição das vigas reforçadas com a técnica EBR, de acordo com o tipo de FRP. 4.3

Figura 4.2 – Distribuição das vigas reforçadas com a técnica EBR pelo tipo de FRP, de acordo com o tipo de configuração do reforço e secção transversal. 4.4

Figura 4.3 – Distribuição das vigas reforçadas através da técnica EBR com compósitos FRP, de acordo com o tipo de distribuição do reforço e da orientação do FRP. 4.6

Figura 4.4 – Orientação dos FRP para o caso do reforço aplicado de forma discreta e para o caso do reforço aplicado de forma contínua. 4.6

Figura 4.5 – Configuração do FRP para o caso do reforço aplicado de forma discreta e para o caso do reforço aplicado de forma contínua. 4.7

Figura 4.6 – Informações gerais das vigas da base de dados reforçadas com a técnica EBR usando compósitos de FRP. 4.9

Figura 4.7 – Informações gerais das vigas da base de dados reforçadas com a técnica EBR usando compósitos de CFRP.....	4.11
Figura 4.8 – Características geométricas da viga 2S-7M(1) ensaiada por Dias e Barros (2012_a).....	4.13
Figura 4.9 – Parâmetros que identificam o programa experimental onde se insere a viga a introduzir na DABASUM (DABASUM, 2013).....	4.13
Figura 4.10 – Parâmetros que caracterizam a geometria da viga (DABASUM, 2013).....	4.14
Figura 4.11 – Parâmetros que caracterizam a secção transversal da viga (DABASUM, 2013).	4.14
Figura 4.12 – Parâmetros que caracterizam o betão da viga (DABASUM, 2013).	4.15
Figura 4.13 – Parâmetros que caracterizam as armaduras longitudinais da viga (DABASUM, 2013).....	4.15
Figura 4.14 – Parâmetros que caracterizam as armaduras transversais da viga (DABASUM, 2013).	4.15
Figura 4.15 – Parâmetros que caracterizam o reforço ao corte com FRP aplicado com a técnica EBR (DABASUM, 2013).....	4.16
Figura 4.16 – Parâmetros relativos aos resultados experimentais da viga 2S-7M(1) (DABASUM, 2013).....	4.17
Figura 4.17 – Distribuição das vigas reforçadas com compósitos CFRP aplicados com a técnica NSM, de acordo com o tipo de secção do CFRP e da orientação do reforço.....	4.19
Figura 4.18 – Informações gerais das vigas da base de dados reforçadas com a técnica NSM, na base de dados.....	4.21
Figura 4.19 – Características geométricas da viga 2S-7LV ensaiada por Dias e Barros (2010).	4.23
Figura 4.20 – Parâmetros que identificam o programa experimental onde se insere a viga a introduzir na DABASUM (DABASUM, 2013).....	4.23
Figura 4.21 – Parâmetros que caracterizam a geometria da viga (DABASUM, 2013).....	4.24

Figura 4.22 – Parâmetros que caracterizam a secção transversal da viga (DABASUM, 2013).	4.24
Figura 4.23 - Parâmetros que caracterizam o betão da viga (DABASUM, 2013).	4.25
Figura 4.24 – Parâmetros que caracterizam as armaduras longitudinais da viga (DABASUM, 2013).	4.25
Figura 4.25 – Parâmetros que caracterizam as armaduras transversais da viga (DABASUM, 2013).	4.25
Figura 4.26 – Parâmetros que caracterizam o reforço ao corte com FRP aplicado com a técnica NSM (DABASUM, 2013).	4.26
Figura 4.27 – Parâmetros relativos aos resultados experimentais da viga 2S-7LV (DABASUM, 2013).	4.27
CAPÍTULO 5 – Aplicação analítica	
Figura 5.1 – Tipo de gráficos fornecido pela DABASUM (DABASUM, 2013).	5.2
Figura 5.2 – Identificação das zonas A, B e C para avaliação do desempenho das Formulações analíticas.	5.4
Figura 5.3 – Aplicação da formulação <i>fib</i> (2001): valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f .	5.5
Figura 5.4 – Aplicação da formulação CNR (2004): valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f .	5.6
Figura 5.5 – Aplicação da formulação CIDAR (2006): valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f .	5.8
Figura 5.6 – Aplicação da formulação ACI (2008): valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f .	5.9
Figura 5.7 – Valor médio do parâmetro para as quatro formulações analíticas relativas à técnica EBR.	5.11

Figura 5.8 – Comparação do desempenho das quatro formulações analíticas (fib, CNR, CIDAR e ACI).....	5.12
Figura 5.9 – Aplicação da formulação Nanni <i>et al.</i> (2004) com $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4\%$: valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f	5.13
Figura 5.10 – Aplicação da formulação Nanni <i>et al.</i> (2004) com $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4\%$ para varões e com $\tau_b = 16.1$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 5.9\%$ para o caso de laminados: valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f	5.15
Figura 5.11 – Representação dos valores analíticos, através da formulação de Dias e Barros (2013), e respectivos valores experimentais (reforço com laminados de CFRP).....	5.16
Figura 5.12 – Comparação do desempenho das formulações de Nanni <i>et al.</i> (2004) e Dias e Barros (2013).....	5.18

Índice de tabelas

CAPÍTULO 2 – Revisão bibliográfica

Tabela 2.1 – Propriedades de resinas (Dias, 2008).....	2.2
Tabela 2.2 – Propriedades do betão, do aço e das fibras de carbono (Dias, 2008).....	2.3
Tabela 2.3 – Resumo dos resultados experimentais obtidos por Modifi <i>et al.</i> (2012).....	2.11
Tabela 2.4 – Configurações de reforço ao corte de CFRP das vigas ensaiadas (Cisneros <i>et al.</i> , 2012).....	2.18
Tabela 2.5 – Configurações de reforço ao corte de CFRP das vigas ensaiada (Cisneros <i>et al.</i> , 2012).....	2.20
Tabela 2.6 – Configurações de reforço ao corte de CFRP das vigas ensaiadas, na menor extensão de corte (Dias e Barros, 2010).....	2.24
Tabela 2.7 – Valores das propriedades dos materiais intervenientes (Dias e Barros, 2010).....	2.24

CAPÍTULO 3 – Formulações analíticas

Tabela 3.1 – Valores do factor de segurança parcial γ_f , segundo <i>fib</i> (2001).....	3.3
Tabela 3.2 – Valores do coeficiente parcial de segurança do reforço FRP.....	3.6
Tabela 3.3 – Valores para o factor ambiental condicionante do comportamento do reforço FRP.....	3.8
Tabela 3.4 – Valores do parâmetro ψ_f , de acordo com o tipo de configuração de reforço...	3.11
Tabela 3.5 – Valores do factor C_E , segundo ACI Committee 440 (2008).....	3.14

CAPÍTULO 4 – Base de dados

Tabela 4.1 – Informação geral dos trabalhos experimentais com vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de FRP aplicados com a técnica EBR.....	4.2
--	-----

Tabela 4.2 – Distribuição das vigas reforçadas com a técnica EBR, de acordo com o tipo de FRP e com o tipo de configuração do reforço.....	4.3
Tabela 4.3 – Número de vigas de acordo com o tipo de distribuição, em função da configuração ou da inclinação do reforço.....	4.6
Tabela 4.4 – Informações gerais sobre as vigas da base de dados com o reforço de FRP aplicado com a técnica EBR.....	4.8
Tabela 4.5 – Informação geral dos trabalhos experimentais com as vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica NSM.....	4.18
Tabela 4.6 – Distribuição das vigas reforçadas com a técnica NSM, de acordo com o tipo de CFRP e da orientação do CFRP.....	4.18
Tabela 4.7 – Informações gerais das vigas reforçadas pela técnica NSM, na base de dados.....	4.20
 CAPÍTULO 5 – Aplicação analítica	
Tabela 5.1 – Aplicação da formulação <i>fib</i> (2001): distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.....	5.4
Tabela 5.2 – Aplicação da formulação CNR (2004): distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.....	5.6
Tabela 5.3 – Aplicação da formulação CIDAR (2006): distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.....	5.8
Tabela 5.4 – Aplicação da formulação ACI (2008): distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.....	5.9
Tabela 5.5 – Avaliação do desempenho das formulações analíticas referentes à técnica EBR.....	5.10
Tabela 5.6 – Aplicação da formulação Nanni <i>et al.</i> (2004) com $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4\%$: distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.....	5.12

Tabela 5.7 – Aplicação da formulação Nanni <i>et al.</i> (2004) com $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4\%$ para varões e com $\tau_b = 16.1$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 5.9\%$ para o caso de laminados: distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.....	5.14
Tabela 5.8 – Aplicação da formulação Dias e Barros (2013): distribuição das vigas pelas zonas A, B e C (reforço com laminados de CFRP).....	5.15
Tabela 5.9 – Avaliação do desempenho das formulações analíticas referentes à técnica NSM.	5.17

Capítulo 1

Introdução

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Uma das possibilidades existentes para reforçar ao corte vigas de betão armado é utilizar materiais compósitos de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono). Estes materiais de elevado desempenho são leves, apresentam elevados valores de rigidez e resistência à tração, são imunes à corrosão e tem bom comportamento à fadiga. Além disto, as técnicas de reforço com materiais compósitos de CFRP são de fácil e rápida aplicação.

A técnica da colagem externa com compósitos de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono), designada na literatura internacional por Externally Bonded Reinforcement (técnica EBR), e a técnica da inserção do CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento, designada na literatura internacional por Near Surface Mounted (técnica NSM), são duas técnicas de reforço que podem ser usadas para aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal de vigas de betão armado usando materiais de elevado desempenho como são o caso dos compósitos de CFRP.

Os resultados obtidos pela intensa investigação experimental já desenvolvida permitem concluir que os reforços de CFRP conseguem garantir acréscimos consideráveis na resistência ao esforço transversal de vigas de betão armado, independentemente da técnica de reforço com CFRP adotada (EBR ou NSM). No entanto, estudos comparativos realizados para avaliar o desempenho das duas técnicas de reforço supracitadas permitem concluir que a técnica NSM é mais eficaz do que a técnica EBR, não só em termos do nível de acréscimo da capacidade resistente ao corte das vigas, mas também do nível do aproveitamento das elevadas propriedades mecânicas que os CFRP apresentam (Dias, 2008).

Com o desenrolar da investigação experimental, têm aparecido propostas analíticas para a quantificação da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal de vigas de betão armado (V_f). Para o caso do reforço ao corte aplicado de acordo com a técnica EBR, destacam-se as propostas do *American Concrete Institute (ACI)*, nomeadamente do ACI Committee 440 (2008); da *fédération internationale du béton (fib)*, nomeadamente do “Task

Group 9.3 FRP reinforcement for concrete structures” (*fib*, 2001); do CNR - *Italian National Research Council* (CNR-DT 200/2004, 2004); e da norma Australiana CIDAR (2006). Em relação ao reforço ao corte aplicado de acordo com a técnica NSM, destacam-se as propostas avançadas por Nanni *et al.* (2004) e Dias e Barros (2013).

No Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho tem vindo a ser desenvolvida uma base de dados com resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de CFRP. A base de dados está associada a uma ferramenta informática desenvolvida numa parceria entre o Departamento de Engenharia Civil e o Departamento de Sistema de Informação da Universidade do Minho, designada por DABASUM (<http://dabasum.civil.uminho.pt/>). A DABASUM, além de ter a base de dados anteriormente referida, tem programadas as formulações analíticas do ACI, da *fib*, do CNR e da norma australiana CIDAR para o cálculo da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal de vigas de betão armado (V_f) quando o reforço de CFRP é aplicado de acordo com a técnica EBR. A DABASUM disponibiliza *on-line* a seguinte informação: a base de dados anteriormente mencionada; gráficos referentes a uma análise comparativa entre valores experimentais e valores analíticos (obtidos usando quatro formulações atualmente disponíveis: ACI, *fib*, CNR e CIDAR) ao nível do contributo do CFRP no aumento da capacidade resistente das vigas ao esforço transversal (V_f); possibilidade de qualquer investigador, nacional ou internacional, introduzir novos resultados experimentais com a consequente análise comparativa entre valores experimentais *vs* valores analíticos.

Neste contexto, a presente dissertação pretende ser um contributo ao trabalho já desenvolvido em termos da base de dados anteriormente referida e em termos da DABASUM.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos definidos para a realização da investigação a realizar no âmbito da presente dissertação foram os seguintes:

- Ampliar a base de dados, atualmente existente, com resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de CFRP, aplicados com a técnica da colagem externa (EBR) ou com a técnica da inserção no betão de recobrimento (NSM);
- Introduzir na DABASUM formulações analíticas existentes para o cálculo da contribuição do reforço de CFRP (V_f), aplicado de acordo com a técnica NSM, na resistência ao esforço transversal de vigas de betão armado;

- Aplicar formulações analíticas existentes, para a quantificação da contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal de vigas de betão armado (técnica EBR e técnica NSM), às vigas da base de dados da DABASUM;
- Avaliar o desempenho de formulações analíticas existentes para a quantificação da contribuição do reforço de CFRP na resistência ao esforço transversal de vigas de betão armado (técnica EBR e técnica NSM): comparação entre valores experimentais e valores analíticos.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por sete capítulos acrescida de um anexo.

O Capítulo 1, a introdução, abrange a apresentação do tema da dissertação, a descrição dos objetivos a alcançar e a forma como a dissertação está estruturada.

No Capítulo 2 é apresentado o trabalho de revisão bibliográfica realizado sobre a aplicação de materiais compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado. Numa primeira fase é feita a apresentação dos materiais compósitos de CFRP e a sua utilização no reforço de estruturas de betão armado, assim como são apresentadas as técnicas de reforço por colagem externa do CFRP (EBR) e por inserção do CFRP no betão de recobrimento (NSM). Posteriormente, é comparado o desempenho e a eficiência das técnicas EBR e NSM quando aplicadas no reforço ao corte de vigas de betão armado reforçadas com materiais compósitos de CFRP.

No Capítulo 3 é feita a descrição de formulações analíticas existentes para a determinação do contributo do CFRP no aumento da capacidade resistente das vigas ao esforço transversal (V_f). Numa primeira são apresentadas quatro formulações analíticas para o reforço ao corte com CFRP aplicado com a técnica EBR e que são propostas por: *fib* (2001), CNR (2004), CIDAR (2006) e ACI (2008). O capítulo termina com a apresentação de duas formulações para o reforço ao corte com CFRP aplicado com a técnica NSM: a primeira, uma proposta de Nanni *et al.* (2004), e a segunda, uma proposta de Dias e Barros (2013).

No Capítulo 4 procedeu-se à atualização da base de dados com novos resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de CFRP (técnica EBR e técnica NSM). Neste capítulo também é feita uma caracterização geral da versão atualizada da base de dados. Além disso, para cada uma das técnicas de reforço ao

corte (técnica EBR e técnica NSM), é descrito e ilustrado o procedimento a seguir quando se pretende introduzir uma nova viga na DABASUM.

O Capítulo 5 é dedicado à validação das formulações analíticas apresentadas no Capítulo 3. Os resultados experimentais da base de dados referentes à técnica EBR com CFRP foram utilizados para verificar o desempenho de quatro formulações analíticas existentes para o cálculo da contribuição do CFRP no aumento da capacidade resistente ao esforço transversal de vigas de betão armado (V_f) e que foram apresentadas no Capítulo 3. Os resultados experimentais da base de dados referentes à técnica NSM com CFRP foram utilizados para verificar o desempenho de duas formulações analíticas existentes para o cálculo do valor de V_f e que foram apresentadas no Capítulo 3. Estas formulações estão programadas na DABASUM que fornece para cada uma das formulações a relação entre o valor experimental e o valor analítico da contribuição V_f .

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais da investigação realizada no âmbito da presente dissertação. Além disso, são apontadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

No Capítulo 7 apresentam-se as referências bibliográficas que serviram de apoio para a realização desta dissertação.

O anexo é dedicado à apresentação de exemplos de aplicação das formulações apresentadas no Capítulo 3 referentes à técnica NSM.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No presente capítulo apresenta-se o resultado do trabalho de pesquisa bibliográfica efetuado sobre a temática da presente dissertação, onde são referidos conceitos importantes e trabalhos de investigação já realizados. Após a apresentação dos materiais compósitos de CFRP e a sua utilização no reforço de estruturas de betão armado, serão apresentadas as técnicas de reforço por colagem externa do CFRP (EBR) e por inserção do CFRP no betão de recobrimento (NSM) no âmbito do reforço ao corte de vigas de betão armado. Tendo em conta alguns trabalhos experimentais já realizados, serão descritos os principais benefícios, ao nível do comportamento estrutural, da presença do reforço de CFRP quando aplicado com o objetivo de aumentar capacidade resistente ao corte de vigas de betão armado. O capítulo termina com a realização de uma comparação do grau de eficácia das duas técnicas de reforço ao corte anteriormente referidas (EBR e NSM).

2.2. MATERIAIS COMPÓSITOS DE CFRP

Os materiais compósitos de FRP (Fiber Reinforced Polymer – Polímeros Reforçados com Fibras), tal como exemplificado na Figura 2.1, são formados por fibras envolvidas numa matriz polimérica (a resina).

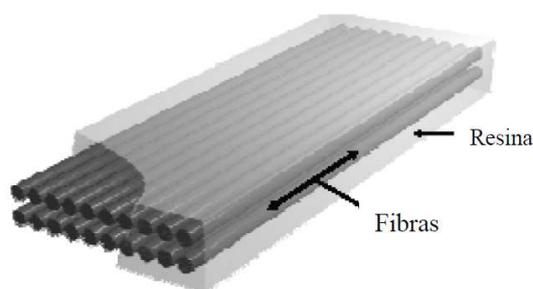


Figura 2.1 – Componentes dos materiais compósitos de FRP (Nanni, 2004).

A matriz tem como propósito assegurar o bom comportamento das fibras. Com efeito, além de constituírem uma proteção das fibras face a condições adversas (agressões ambientais, danos mecânicos e fenómenos de instabilidade), a matriz deve garantir uma boa ligação entre as fibras, ou seja, deve garantir que as fibras funcionem em conjunto. Em termos de tipos matriz disponíveis refira-se a existência das resinas termoplásticas e das termoendurecíveis. No caso das resinas termoendurecíveis existem as resinas epóxi, viniésteres e poliésteres.

Para a matriz dos reforços de FRP, a escolha tem recaído em resinas termoendurecíveis, do tipo epóxi, devido às excelentes propriedades em termos de aderência à maior parte dos materiais, de resistência mecânica e à agressividade do meio ambiente, e, ainda, pelo facto de não absorverem água. Na Tabela 2.1 apresentam-se valores de algumas propriedades das resinas epóxi e das resinas polyester.

Tabela 2.1 – Propriedades de resinas epóxi e polyester (Dias, 2008).

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

As fibras são o elemento resistente dos compósitos de FRP sendo assim a garantia de rigidez e de resistência mecânica dos FRP. As fibras apresentam-se sob a forma de filamentos de pequeno diâmetro, têm módulo de elasticidade e resistência à tração elevados, baixa densidade e apresentam comportamento frágil (comportamento elástico sem patamar de cedência). As fibras podem ser colocadas apenas numa direção ou em várias direções (compósitos de FRP multidirecionais).

Existem diferentes tipos de fibras: carbono (C), vidro (G) e aramida (A). Os FRP de fibras de carbono, vidro e aramida designam-se, respetivamente, por CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono), GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro) e AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida).

Na Figura 2.2 apresenta-se a relação tensão vs extensão para os três tipos de fibras anteriormente referidas (carbono, vidro e aramida), para o aço de armaduras de pré-esforço e

para o convencional aço A500. No que diz respeito às fibras de carbono é apresentado o comportamento de fibras com elevado módulo de elasticidade (Carbono HM) e de fibras com elevada resistência (Carbono HS). Na Figura 2.2 verifica-se que o comportamento linear elástico até à rotura (rotura frágil) das fibras contrasta com o comportamento dúctil do aço. Além disso, nesta figura é evidente o melhor comportamento das fibras de carbono em relação às fibras de vidro e de aramida.

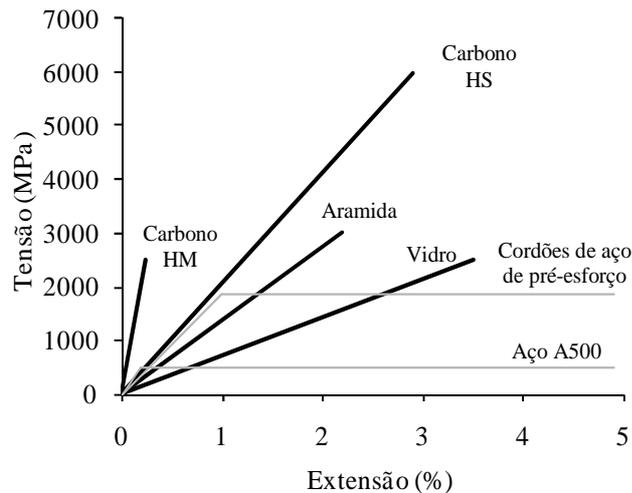


Figura 2.2 – Diagrama tensão vs extensão de distintos tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço – adaptado de ACI 440R-96, 1996 (Dias, 2008).

Na Tabela 2.2 apresenta-se uma análise comparativa entre três materiais (betão, aço e fibras de carbono) em termos de valores do módulo de elasticidade, da resistência à tração e da densidade. Além de serem materiais mais leves, as fibras de carbono apresentam melhor desempenho mecânico que o betão e o aço (valores mais elevados de rigidez e de resistência à tração).

Tabela 2.2 – Propriedades do betão, do aço e das fibras de carbono (Dias, 2008).

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Densidade (Kg/m ³)
Betão	27 - 44	1.6 – 5.0	2400
Aço	200-210	400-690	7800
Fibras de carbono (não do compósito)	200-800	2500-6000	1750-1950

Os compósitos de CFRP têm inúmeras vantagens relativamente aos materiais tradicionais, nomeadamente, o aço, a madeira e o betão (Bakis *et al.*, 2002). Comparativamente aos referidos materiais tradicionais, os CFRP destacam-se pelos elevados valores das relações resistência à tração/peso e rigidez/peso e pela elevada resistência à corrosão (em comparação direta com o aço). O elevado desempenho destes materiais permite soluções de reforço leves com os consequentes benefícios em termos de execução e de impacto arquitetónicos. Além de serem de fácil transporte e manuseamento, os CFRP apresentam uma grande versatilidade dimensional e de adaptabilidade a qualquer tipo de superfície.

Na Figura 2.3 apresentam-se os vários tipos de compósitos de CFRP que podem ser utilizados no reforço de estruturas de betão armado e que podem ser divididos em dois grandes grupos: sistemas pré-fabricados unidireccionais (laminados e varões) e os sistemas curados “in situ”. Estes últimos ainda podem ser classificados em sistemas unidireccionais (mantas) e multidireccionais (tecidos) devido à disposição das fibras no compósito.

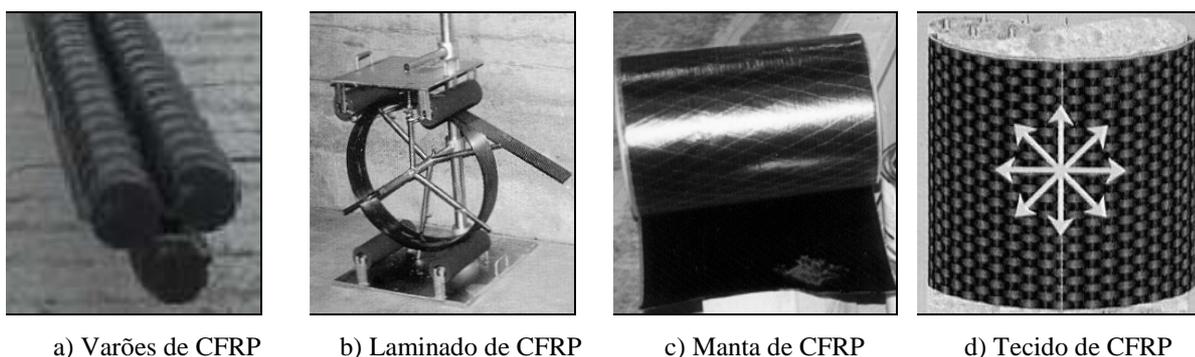


Figura 2.3 – Diferentes tipos de materiais compósitos de CFRP (Dias, 2008).

O elevado desempenho dos compósitos de CFRP, quer em termos mecânicos como em termos de durabilidade, fizeram com que começassem a ser utilizados no reforço de estruturas de betão armado (reforços à flexão, ao corte, confinamento de pilares, ...). Neste contexto, tem sido desenvolvida muita investigação nesta área e existe atualmente um número bastante significativo de aplicações em casos de obra de reforços com CFRP. Tendo em conta o tema da presente dissertação, nas secções seguintes será dado particular destaque ao reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP.

2.3 TÉCNICAS DE REFORÇO AO CORTE COM COMPÓSITOS DE CFRP

O princípio básico do reforço ao corte de uma viga de betão armado com compósitos de CFRP baseia-se na colocação deste com as fibras orientadas transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal às potenciais fendas de corte (Khalifa, 1999). Existem várias técnicas de reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP: i) a técnica da colagem externa (designada na literatura internacional por EBR - *Externally Bonded Reinforcement*), a técnica da inserção no betão de recobrimento (designada na literatura internacional por NSM - *Near Surface Mounted*) e a técnica que consiste na introdução de varões de CFRP em furos executados no betão (designada na literatura internacional por ETS - *Embedded Through-Section*). Na Figura 2.4 apresentam-se exemplos de aplicação de materiais compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado usando a técnica EBR, NSM e ETS. No âmbito da presente revisão bibliográfica será dado particular ênfase às técnicas de reforço que serão objeto de estudo nesta dissertação, ou seja a técnica EBR e a técnica NSM. Mais pormenores sobre a técnica ETS com compósitos de CFRP podem ser consultados em Modifi e Chaallal (2011).



a) técnica EBR (Dias, 2008)



b) técnica NSM (Dias, 2008)



c) técnica ETS (Mofidi e Chaallal, 2011)

Figura 2.4 – Técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado com compósitos de CFRP.

2.3.1 Técnica da colagem externa (EBR)

A técnica da colagem externa com compósitos de CFRP consiste na colagem do CFRP nas faces exteriores do elemento estrutural a reforçar. As configurações possíveis para o reforço ao corte usando a técnica EBR, em termos de superfície colada, são: colagem do reforço apenas nas faces laterais, colagem do reforço em forma de “U” e colagem do reforço envolvendo secção transversal do elemento estrutural (Figura 2.5). A distribuição do reforço de CFRP pode ser contínua ou discreta (Figura 2.6). O reforço de CFRP pode ser colocado com as fibras orientadas a 90° (Figura 2.7 a)) ou segundo uma orientação aproximadamente ortogonal às fendas de corte (por exemplo inclinadas a 45° , tal como ilustrado na Figura 2.7 b)). Além disso é possível haver sobreposição de várias camadas com a mesma ou com diferentes orientações das fibras (Figura 2.8). Na Figura 2.9 apresentam-se dois cenários possíveis de reforço ao corte com CFRP colado externamente e que se distinguem pela adoção ou não de mecanismos exteriores de fixação do CFRP.

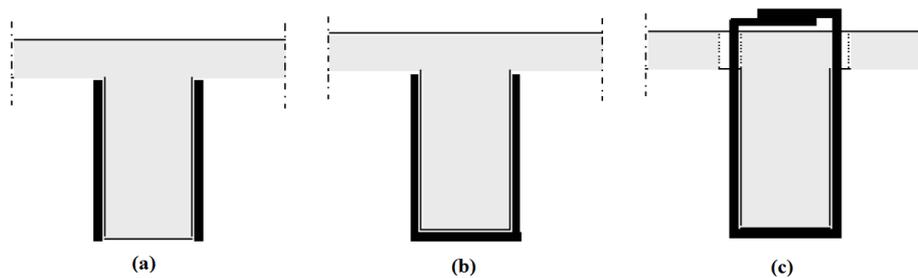


Figura 2.5 – Diferentes configurações do reforço ao corte de CFRP usando a técnica EBR: colagem a) nas faces laterais; b) em forma de U; c) envolvendo a secção (Khalifa, 1999).

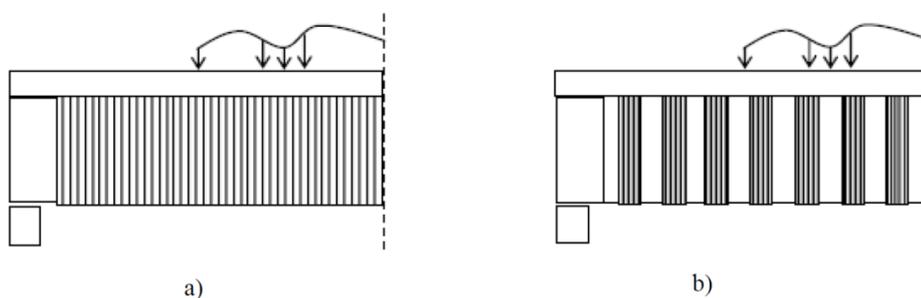


Figura 2.6 – Reforço ao corte com o CFRP: a) reforço contínuo; b) reforço discreto (Khalifa, 1999).

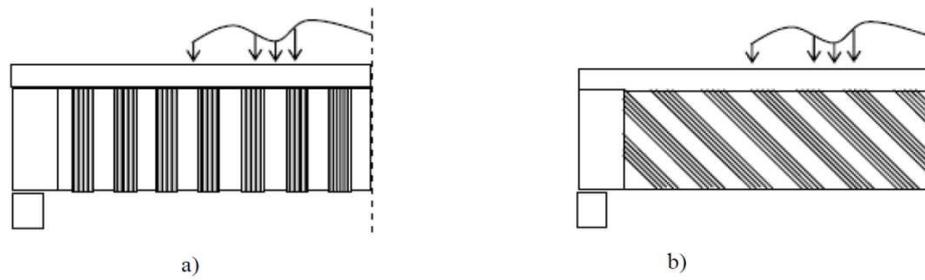


Figura 2.7 – Diferentes orientações do reforço ao corte com CFRP: a) fibras orientadas a 90°; b) fibras orientadas a 45° (Khalifa, 1999).

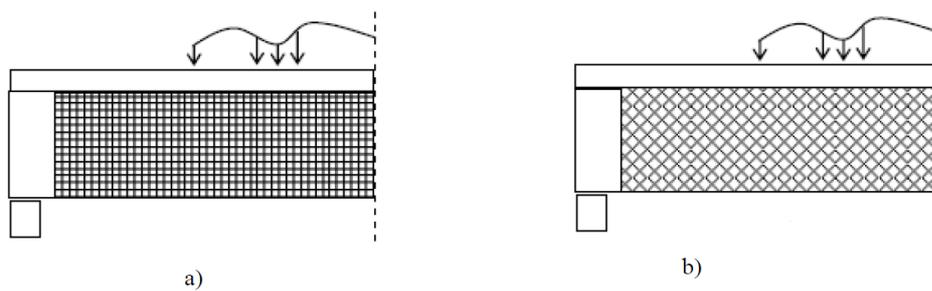


Figura 2.8 – Sobreposição de camadas de CFRP com diferente orientação das fibras: a) fibras a 0°/90°; b) fibras a +/- 45° (Khalifa, 1999).

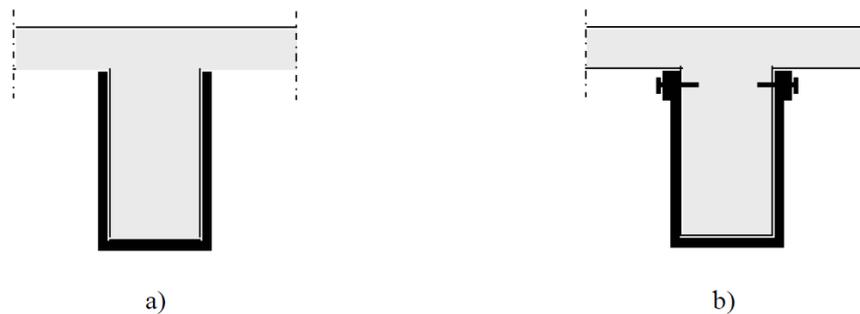


Figura 2.9 – a) Reforço em forma de U sem ancoragem do CFRP; b) Reforço em forma de U com ancoragem do CFRP (Khalifa, 1999).

A metodologia utilizada na aplicação da técnica da colagem externa com compósitos de CFRP envolve três etapas (Juvandes *et al.*, 2003):

Etapa 1: Tratamento da superfície de betão onde será aplicado o reforço por forma a assegurar as melhores condições em termos de aderência. Quanto ao CFRP adotado é o curado *in situ* (mantas, tecidos), a superfície deve ser esmerilada; se o sistema de CFRP usado for o pré-fabricado (laminados), a superfície deve ser bojudada com jato de areia ou ser “picota” com martelo de agulhas. Posteriormente, deve-se proceder à limpeza da superfície aplicando ar comprimido. Adicionalmente, em alguns sistemas

de reforço recomenda-se a aplicação de uma camada de primário de forma a melhorar a aderência dos CFRP à superfície do elemento a reforçar.

Etapa 2: Colagem do reforço de CFRP.

Etapa 3: Controlo de qualidade da técnica de reforço antes, durante e após a aplicação.

Neste contexto, na Figura 2.10 apresenta-se um organigrama que contém, resumidamente, os passos fundamentais numa intervenção de reforço com CFRP aplicado com a técnica da colagem externa, incluindo os aspetos essenciais para um rigoroso controlo de qualidade da execução do reforço.

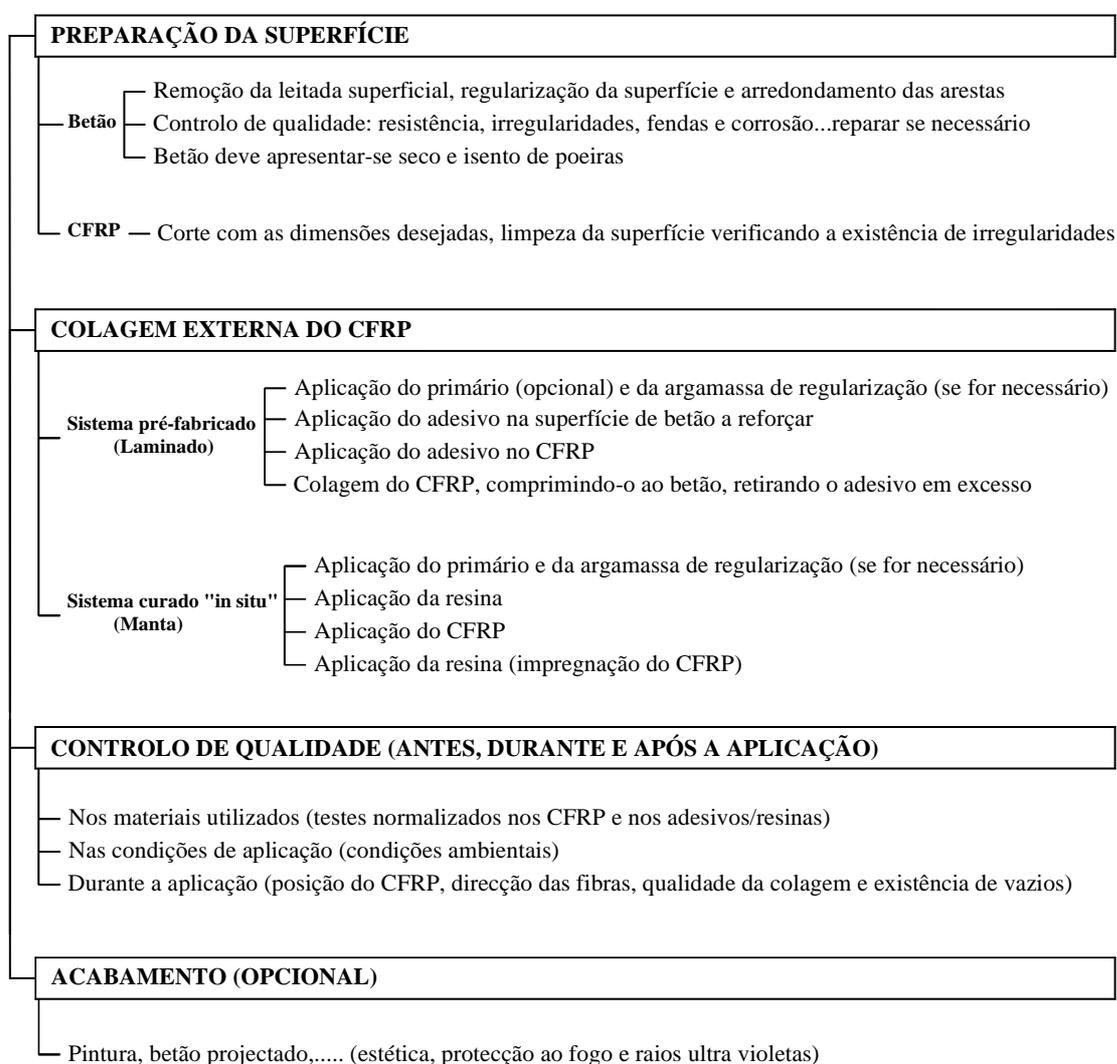


Figura 2.10 – Aplicação da técnica da colagem externa e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias *et al.*, 2006).

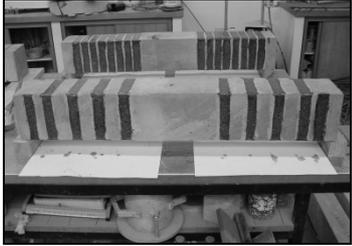
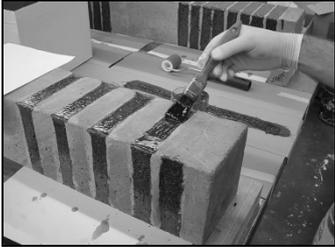
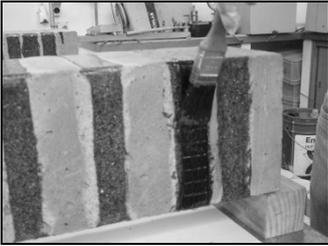
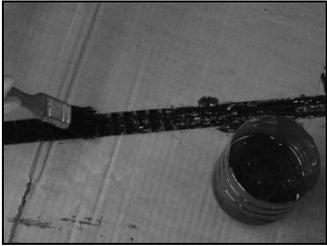
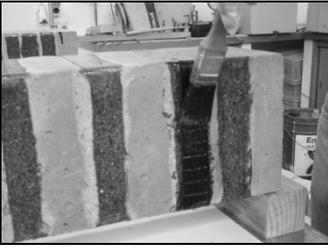
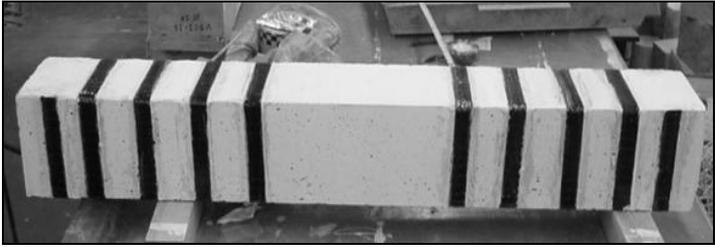
		
a) Preparação da superfície: esmerilagem	b) Após a aplicação do primário	c) Obtenção das faixas de manta com 25 mm de largura - corte na direção das fibras
		
d) Aplicação da 1ª camada de resina no betão	e) Aplicação de resina na 1ª camada de manta	f) Colagem da 1ª camada de manta - Alinhamento das fibras
		
g) Aplicação de resina sobre a 1ª camada de manta	h) Aplicação de resina na 2ª camada de manta	i) Colagem da 2ª camada de manta
		
j) Aplicação de resina sobre a 2ª camada de manta	k) Aspeto final da viga após a execução do reforço (face tracionada virada para cima)	

Figura 2.11 – Exemplo de aplicação do reforço ao corte de uma viga de betão armado com faixas discretas de duas camadas de manta de CFRP unidireccional coladas externamente (Dias, 2008).

Na Figura 2.11, a título de exemplo apresentam-se as etapas de um reforço ao corte de uma viga de betão armado com faixas discretas de manta de CFRP unidireccional aplicadas com a técnica da colagem externa. Tendo em conta que foram utilizadas mantas de CFRP, o tratamento da superfície de betão consistiu na passagem de um esmeril nas zonas de colagem do CFRP (Figura 2.11a). Por forma a evitar concentração de tensões que pudessem originar

uma rotura prematura do reforço de CFRP procedeu-se ao arredondamento das arestas nas zonas onde estava prevista a colagem dos reforços. De seguida a superfície de betão foi limpa com jatos de ar. Posteriormente foi aplicada uma camada de primário (Figura 2.11b) em toda a extensão da zona de reforço por forma a garantir a melhor aderência possível da manta ao betão (a superfície de betão não deve estar degradada, caso contrário é necessário aplicar o “putty”).

Antes de se proceder à colagem do CFRP foi necessário cortar as faixas de manta com as dimensões estabelecidas (Figura 2.11c). A colagem do CFRP foi feita recorrendo a uma resina epoxídica (Figura 2.11d a 2.11j). Durante a aplicação do reforço houve a preocupação em alinhar as fibras na direção desejada, de evitar a formação de bolhas de ar e de garantir a não existência de resina em excesso. Na Figura 2.11k apresenta-se o aspeto final da viga após a aplicação do reforço de CFRP (face tracionada virada para cima).

Os resultados obtidos pela intensa investigação experimental já desenvolvida permitem concluir que os reforços de CFRP colados externamente possibilitam que sejam obtidos consideráveis aumentos na resistência ao esforço transversal de vigas de betão armado. A título de exemplo apresenta-se um recente programa experimental no âmbito do reforço ao corte de vigas de betão armado com mantas de CFRP coladas externamente (Modifi *et al.*, 2012).

Modifi *et al.* (2012) ensaiaram à flexão em três pontos de carga sete vigas de betão armado, com secção transversal do tipo “T”. A alma da secção transversal tinha uma largura e uma altura de, respetivamente, 152 mm e 406 mm. Em termos do banzo, a largura e altura valiam, respetivamente, 508 mm e 102 mm. O vão total das vigas era de 4.52 m e a carga foi aplicada à distância de $a = 3d$, relativamente ao apoio mais próximo (vão de corte igual a 1.050 m).

A armadura longitudinal na face tracionada das vigas consistia em quatro varões com diâmetro de 25.2 mm que foram colocados em duas camadas. Os estribos de aço aplicados tinham diâmetro de 8 mm e um espaçamento igual a $d/2$ (175 mm).

O reforço ao corte de CFRP adotado foi executado com a técnica EBR (manta de CFRP unidirecional aplicada em U de forma contínua).

Das vigas ensaiadas, duas eram de referência sem CFRP (com estribos, S3-CON, e sem estribos, S0-CON) e cinco foram reforçadas ao corte com CFRP de acordo com o indicado anteriormente. Destas cinco vigas, uma viga não continha qualquer tipo de mecanismo de

fixação do CFRP (viga S3-EB-NA), enquanto que nas outras foi adotado um determinado mecanismo de ancoragem do CFRP de acordo com o representado na Figura 2.12.

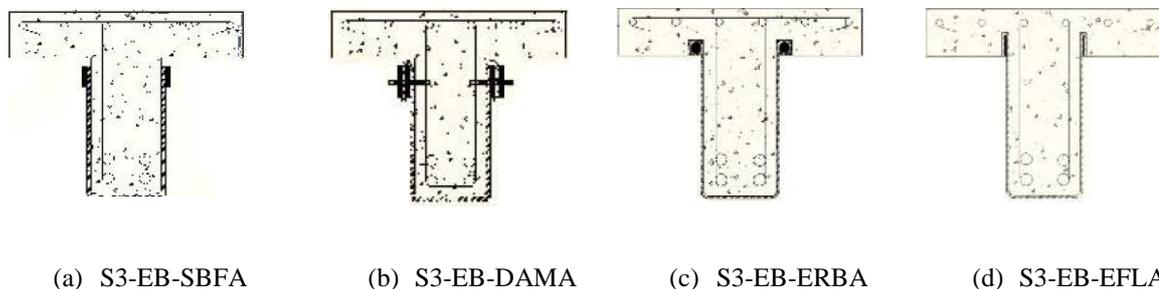


Figura 2. 12 – Secção transversal de vigas reforçadas ao corte através da técnica EBR, com diferentes mecanismos de fixação (Modifi *et al.*, 2012).

Tabela 2.3 – Resumo dos resultados experimentais obtidos por Modifi *et al.* (2012).

Viga	Carga de rotura (kN)	Resistência total ao corte (kN)	Resistência devido ao betão (kN)	Resistência devido ao aço (kN)	Resistência devido ao CFRP (kN)	Ganho devido ao CFRP (%)	Modo de rotura
S0-CON	122.7	81.3	81.3	0.0	0.0	0.0	Corte
S3-CON	294.0	194.7	94.4	100.3	0.0	0.0	Corte
S3-EB-NA	367.3	243.2	94.4	100.3	48.5	25	Corte
S3-EB-SBFA	381.6	252.7	94.4	100.3	58.0	30	Corte
S3-EB-DAMA	421.6	279.2	94.4	100.3	84.5	43	Flexão
S3-EB-ERBA	417.0	276.2	94.4	100.3	81.5	42	Corte
S3-EB-EFLA	431.4	285.7	94.4	100.3	91.0	48	Flexão

Tendo como base os resultados das vigas de referência (S0-CON e S3-CON), os autores deste estudo verificaram que as soluções de reforço testadas proporcionaram um aumento na capacidade resistente ao corte das vigas que variou entre 25% e 48%. Na viga reforçada com CFRP, sem qualquer dispositivo de ancoragem do reforço, verificou-se um aumento na capacidade resistente ao corte de 25%, enquanto que os dispositivos de ancoragem do CFRP testados proporcionaram um aumento médio na capacidade resistente ao corte das vigas de 41%. Desta forma, Modifi *et al.* (2012) comprovaram os benefícios do recurso a mecanismos de fixação do reforço de CFRP aplicado com a técnica EBR.

Na Figura 2.13 apresentam-se dois modos de rotura que podem ocorrer numa viga reforçada ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica EBR: a rotura do CFRP (Figura 2.13a)) e o destacamento do CFRP (Figura 2.13b)). O destacamento do CFRP é tipicamente o modo de rotura que ocorre nos reforços ao corte com CFRP aplicados com a técnica EBR, nomeadamente quando o reforço é aplicado apenas nas faces laterais ou em forma de U. O esgotamento da capacidade resistente à tração do CFRP (rotura do CFRP) é um modo de rotura possível e que está essencialmente associado a reforços ao corte que envolvam totalidade da secção transversal.

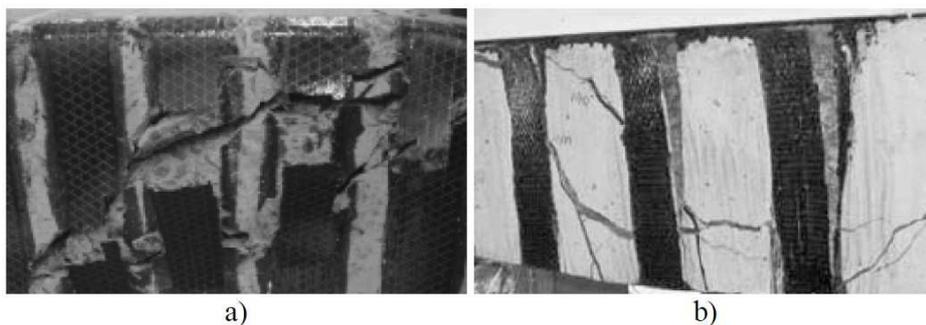


Figura 2.13 – Modos de rotura do CFRP: a) Rotura do CFRP (Beber, 2003); b) Destacamento do CFRP (Gamino, 2010).

2.3.2 Técnica de inserção do reforço (NSM)

Em alternativa à técnica da colagem externa com CFRP surgiu, mais recentemente, a técnica de reforço que consiste na inserção de varões ou laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento (técnica NSM). Na Figura 2.14 apresenta-se a título de exemplo uma intervenção de reforço ao corte de uma viga de betão armado com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados no betão de recobrimento das faces laterais da viga. Os procedimentos seguidos na referida intervenção foram:

- Marcação da posição dos entalhes (Figura 2.14-a) e execução dos entalhes usando uma máquina de corte com disco diamantado que continha um dispositivo que garantia o alinhamento e a profundidade previamente estabelecida para os entalhes (Figura 2.14-b);
- O entalhe foi limpo com a aplicação de ar comprimido por forma a proporcionar as melhores condições de aderência entre o betão e o adesivo (Figura 2.14-c);
- O CFRP fornecido já com a secção transversal definitiva foi cortado com o comprimento desejado (Figura 2.14-d) e, posteriormente, limpo com acetona (Figura 2.14-e) por forma a garantir as melhores condições de aderência entre o laminado e o adesivo;

- O adesivo epoxi foi produzido de acordo com as recomendações do fabricante (Figura 2.14-g);
- O entalhe foi preenchido com o adesivo (Figura 2.14-h);
- O adesivo foi aplicado nas faces do CFRP (Figura 2.14-i);
- O CFRP foi introduzido no entalhe retirando-se posteriormente o adesivo em excesso (Figura 2.14-j).

Numa intervenção de reforço usando a técnica de reforço NSM deve ser garantido um controlo de qualidade, quer nos procedimentos de reforço como dos materiais aplicados. Na Figura 2.15 apresenta-se um organigrama que regista, de uma forma resumida, os passos fundamentais numa intervenção de reforço, com laminados de CFRP, utilizando a técnica NSM.

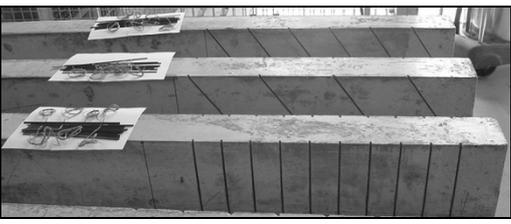
			
a) Marcação da posição dos entalhes	b) Abertura dos entalhes	c) Limpeza dos entalhes	d) Corte dos laminados
			
e) Limpeza dos laminados	f) Laminados a aplicar em cada viga		g) Produção do adesivo
			
h) Adesivo no entalhe	i) Adesivo no laminado	j) Inserção do laminado	k) Remoção do adesivo em excesso

Figura 2. 14 – Exemplo de aplicação a uma viga de betão armado reforçada ao corte, através de laminados de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento (Dias, 2008).

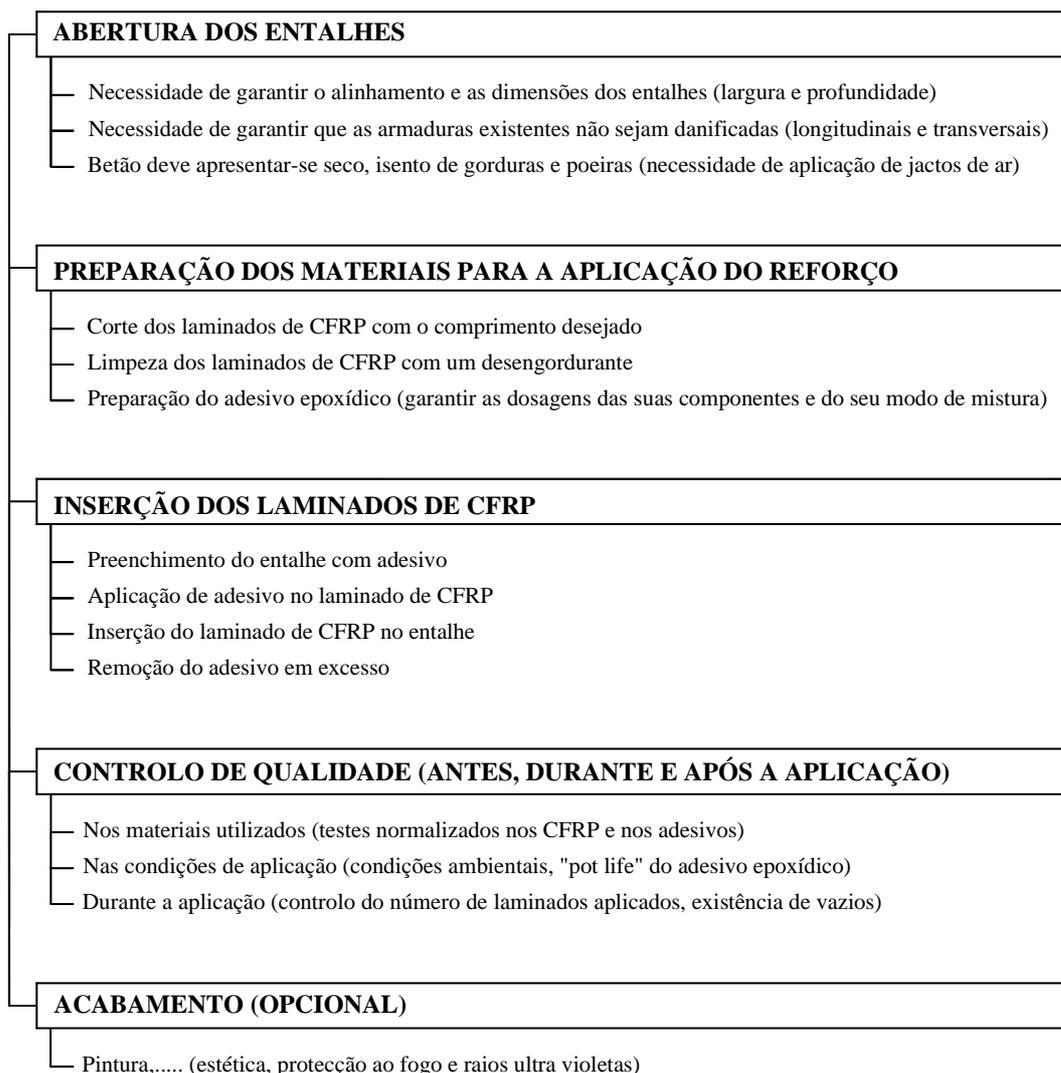


Figura 2. 15 – Aplicação da técnica NSM e procedimentos de controlo de qualidade da aplicação (Dias, 2008).

Na Figura 2.16 apresenta-se a curva de comportamento típica de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos, na qual se destacam duas fases. Na primeira (Fase I), o diagrama de comportamento da viga com CFRP acompanha o da viga não reforçada até ao momento em que se formam as fendas de corte na viga sem CFRP. Posteriormente, a presença do CFRP conjugada com a dos estribos de aço formam um mecanismo de contenção ao desenvolvimento das fendas de corte que proporciona um aumento de rigidez relativamente ao que acontece na viga não reforçada sem CFRP.

A segunda fase do comportamento (Fase II) de uma viga reforçada ao corte com o CFRP tem como limite o momento em que atinge a sua capacidade máxima de carga (F_{max}^{CFRP}). Na Fase II do comportamento, para cada nível de deslocamento, as vigas com CFRP apresentam capacidade de carga superior à da correspondente viga não reforçada de referência. Além

disso, de um modo geral, o deslocamento correspondente à carga máxima das vigas reforçadas ($u_{F_{max}}^{CFRP}$) é superior ao da viga sem CFRP ($u_{F_{max}}^{ref}$).

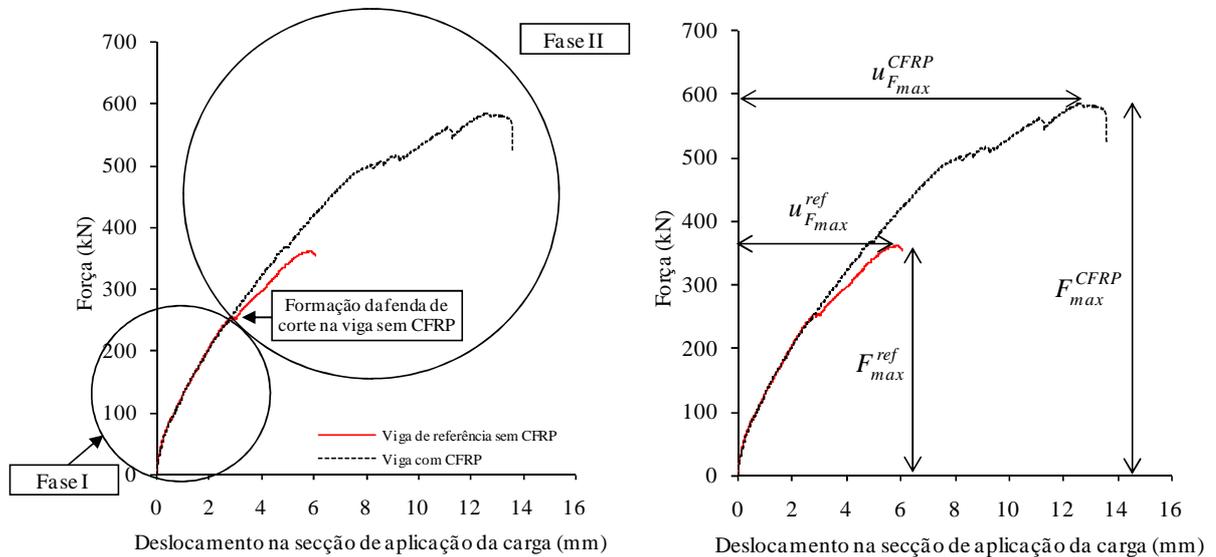


Figura 2.16 – Comportamento de uma viga de betão armado reforçada ao corte por inserção de laminados de CFRP (comparação com o comportamento de uma viga não reforçada), (Dias, 2008).

Dias (2008) realizou uma extensa investigação experimental sobre o reforço ao corte de vigas de betão armado com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento tendo avaliado a influência de vários parâmetros, designadamente, o tipo de betão, a percentagem de armadura transversal, a percentagem e orientação do reforço de CFRP. Como conclusões deste estudo destacam-se as seguintes:

- A eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado é influenciada pela qualidade de betão. As mesmas soluções de reforço aplicadas a vigas com betão com f_{cm} (resistência à compressão do betão à data do ensaio das vigas quantificada em ensaios em provetes cilíndricos) de 18.6 MPa, 39.7 MPa e 59.4 MPa conduziram a valores médios da contribuição para a resistência ao esforço transversal da vigas (V_f) de 35.4 kN, 54.2 kN e 97.0 kN, respetivamente (Figura 2.17).

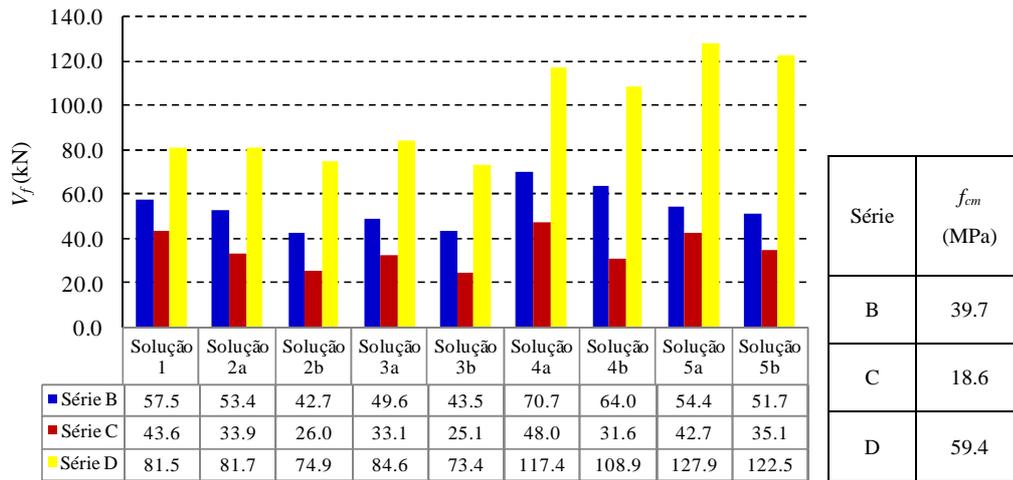


Figura 2.17 - Efeito do betão na eficácia de uma solução de reforço de CFRP em termos de V_f (Dias, 2008)

- A eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado diminui com o aumento da percentagem de armadura transversal, tal como pode ser observado na Figura 2.18. Com efeito quando as mesmas soluções de reforço foram aplicadas a vigas com uma percentagem de armadura transversal de 0.10% e de 0.16%-0.17%, o reforço de CFRP foi mais eficaz para as vigas com a menor percentagem de estribos.

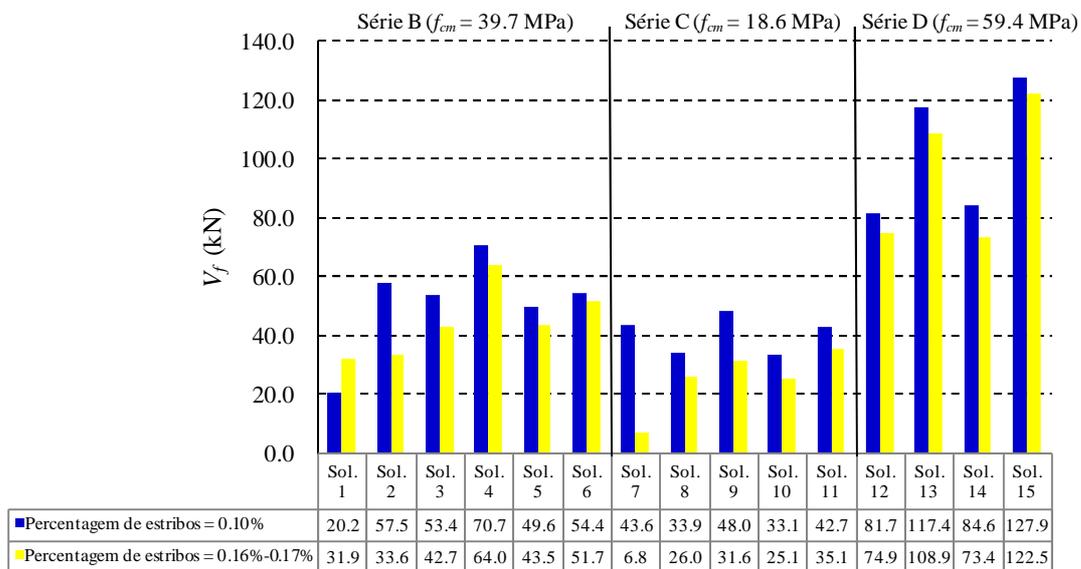


Figura 2.18 - Efeito da percentagem de estribos de aço na eficácia de uma solução de reforço de CFRP (Dias, 2008).

- As soluções de reforço com laminados inclinados foram mais eficazes que as soluções com laminados verticais (foram testadas soluções de reforço com laminados a 45° e a 60°). De acordo com o autor, a razão do melhor desempenho dos laminados inclinados está relacionado com a orientação das fendas de corte (aproximadamente ortogonal à orientação dos laminados inclinados) e com o facto de se conseguirem maiores cumprimentos de ancoragem do CFRP quando atravessados pela fenda de rotura de corte. Na Figura 2.19 apresenta-se o grau de eficácia do reforço de CFRP quando aplicado com laminados na vertical, a 45° e a 60° (nesta figura “mantas” refere-se a soluções de reforço ao corte testadas usando a técnica da colagem externa com mantas de CFRP).

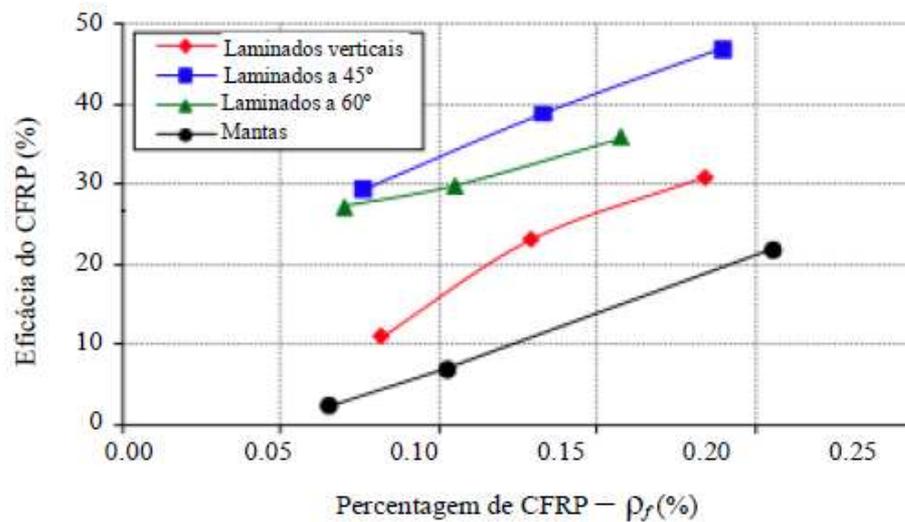


Figura 2.19 - Grau de eficácia do reforço de CFRP em função da orientação do CFRP (Dias, 2008).

- Para as soluções de reforço testadas constatou-se que o aumento da porcentagem de CFRP proporcionou maiores aumentos na capacidade resistente ao corte das vigas reforçadas (Figura 2.19). Neste contexto foi também verificado que a proximidade entre elementos de CFRP pode promover o modo de rotura associado ao destacamento de uma parcela de betão e CFRP devido ao efeito de grupo dos laminados, isto é, a existência da cedência não individual dos laminados, quando atravessados pelas fendas de rotura, devido ao corte. Com o objetivo de aproveitar o máximo rendimento de CFRP é necessário limitar o espaçamento mínimo entre laminados.
- Os modos de rotura observados foram essencialmente três e foram influenciados pelo tipo de betão das vigas: destacamento de uma parcela do volume de betão adjacente ao laminado de CFRP (ocorreu essencialmente em vigas com betão com f_{cm} entre os 18.6 MPa e os 39.7 MPa); escorregamento do CFRP e rotura do CFRP. Estes dois últimos modos de rotura

ocorreram em vigas com betão com $f_{cm} = 59.4$ MPa. Na Figura 2.20 apresentam-se os modos de rotura anteriormente referidos. Na imagem da direita da Figura 2.20 c) é possível ver a ocorrência de um efeito de grupo devido à proximidade dos laminados com o destacamento de um volume de betão contendo CFRP. Esta evidência leva a concluir que existe um limite mínimo a partir do qual não vale a pena colocar mais laminados (diminuir ao espaçamento dos laminados). Em relação ao espaçamento máximo deve-se ter em conta a colocação de um número de laminados de tal forma que haja intercepção do CFRP com a fenda de corte. Nesse sentido são de evitar soluções de reforço tal como a representada na Figura 2.21.

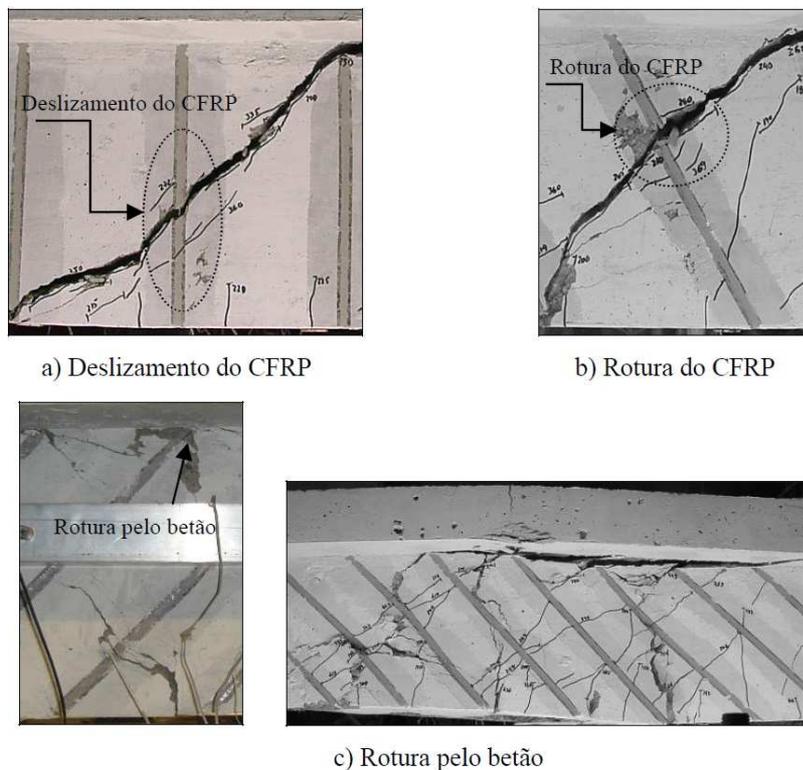


Figura 2.20 – Modos de rotura característicos de vigas reforçadas com CFRP, através da técnica NSM (Dias e Barros, 2013).



Figura 2.21 – Viga BF-360 (El-Hacha *et al.*, 2009).

Além da utilização de laminados de CFRP, o reforço ao corte de vigas de betão armado pode ser feito usando varões de CFRP. Cisneros *et al.* (2012) realizaram um programa experimental

em 17 vigas com secção retangular (Figura 2.22) de betão armado onde foram comparados diferentes tipos de reforço da técnica NSM. Testaram dois tipos de reforço de CFRP ao corte e cada um destes foi ensaiado com duas orientações (45° e 90°). Realizaram dois testes consecutivos na mesma viga: no vão pequeno, com o vão de corte (P_S) igual a 930 mm, relativamente à extremidade esquerda da viga; e no vão longo, com o vão de corte (P_L) igual a 930 mm, relativamente à extremidade direita da viga (Figura 2.22). Na Tabela 2.4 apresenta-se as variáveis do ensaio: o tipo de CFRP, a sua orientação, o seu espaçamento e o número de vigas.

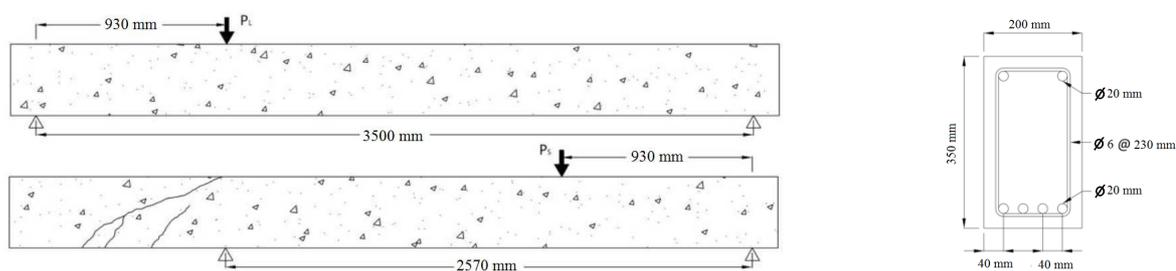


Figura 2. 22 – Vigas testadas: geometria, armaduras de aço aplicadas em todas as vigas (Cisneros *et al.*, 2012).

Tabela 2.4 – Configurações de reforço ao corte de CFRP das vigas ensaiadas (Cisneros *et al.*, 2012).

Designação	Tipo de reforço de CFRP	Orientação ($^\circ$)	Espaçamento (mm)	Número de vigas
Viga controlo	-	-	-	1
B90-6	Varões (diâmetro 8 mm)	90	115	2
B90-3		90	230	2
B45-6		45	115	2
B45-3		45	230	2
S90-6	Laminados ($2.5 \times 15 \text{ mm}^2$)	90	115	2
S90-3		90	230	2
S45-6		45	115	2
S45-3		45	230	2

Na Tabela 2.5 apresentam-se os principais resultados obtidos por Cisneros *et al.* (2012). Considerando a viga controlo (sem reforço CFRP), estes autores concluíram que as vigas com

orientação a 45° apresentaram um aumento médio de 69.4% na capacidade resistente ao corte, enquanto as vigas com orientação a 90° obtiveram um acréscimo médio de 30.3%. Assim, a orientação a 45° foi mais eficiente que a de 90°. As vigas com 6 varões ou com 6 laminados registaram um aumento médio de 64.0% na capacidade resistente ao corte, enquanto que as vigas com 3 varões ou 3 laminados tiveram um aumento médio de 35.7% na sua capacidade de corte. Desta forma, Cisneros *et al.* (2012) concluíram que o aumento da capacidade resistente ao corte depende da orientação e quantidade do CFRP.

Além disso, Cisneros *et al.* (2012) mostraram que o aumento da capacidade resistente ao corte atingiu 53.2% no caso do reforço com laminados e 46.5% no caso do reforço de varões. Os laminados apresentam um melhor desempenho porque, relativamente aos varões, apesar da sua secção ser 34% mais pequena apresentam um perímetro é 40% maior, o que proporciona uma ligação mais eficaz ao betão (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Configurações de reforço ao corte de CFRP das vigas ensaiada (Cisneros *et al.*, 2012).

Viga	f_{cm} (MPa)	Força última de corte (kN)			Acréscimo de resistência (%)
		Vão L	Vão S	Média	
Viga controlo	27.97	104.76	123.17	113.97	-
B90-3a	22.84	103.81	131.22	117.52	7.6
B90-3b	26.02	114.6	120.56	117.58	
B90-6a	26.69	160.06	180.98	170.52	49.72
B90-6b	24.09	164.9	161.97	163.44	
B45-3a	29.11	177.68	133.64	155.66	53.17
B45-3b	23.91	183.48	194.9	189.19	
B45-6a	22.98	173.2	188.77	180.99	75.66
B45-6b	28.48	232.67	193.05	212.86	
S90-3a	22.84	111.08	123.05	117.07	13.58
S90-3b	26.02	124.59	138.75	131.67	
S90-6a	26.69	177.24	198.79	188.02	50.34
S90-6b	24.09	137.07	157.63	147.35	
S45-3a	29.11	172.83	174.29	173.56	68.49
S45-3b	23.91	209.03	203.39	206.21	
S45-6a	22.98	180.91	186.73	183.82	80.47
S45-6b	28.48	225.99	216.02	221.01	
Média	25.66	161.99	166.29	167.27	-

2.3.3 Comparação entre a técnica de colagem externa e técnica de inserção

Os estudos já efetuados sobre a utilização de materiais compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado, aplicados usando a técnica EBR ou aplicados usando a técnica NSM, comprovam que se consegue obter significativos aumentos na capacidade resistente ao esforço transversal das vigas. Na secção anterior, em termos da técnica NSM foi mencionado o melhor desempenho dos laminados de CFRP em relação aos varões de CFRP. Nesta secção será feita uma análise comparativa entre a eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP com a técnica da colagem externa.

Na Figura 2.23 é ilustrado o grau de fixação do reforço de CFRP quando aplicado com a técnica EBR e quando aplicado com a técnica NSM. Esta ao garantir uma maior área de colagem (duplicação da área de colagem) permite uma maior fixação do CFRP ao betão, o que pode significar um atraso ou até mesmo evitar a rotura prematura do CFRP que tipicamente ocorre na técnica EBR. Além desta vantagem, pelo facto do reforço estar inserido e não colado externamente a técnica NSM garante uma maior proteção do reforço face às condições ambientais adversas, às altas temperaturas e a atos de vandalismo.

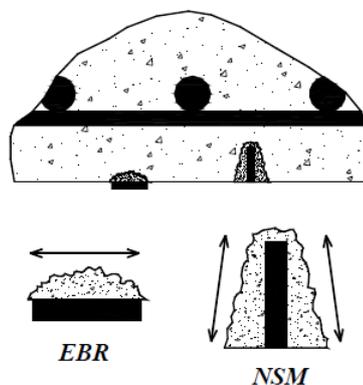


Figura 2.23 - Comparação do grau de fixação conferido pelas técnicas EBR e NSM para o mesmo laminado de CFRP (adaptado de Carolin (2003)).

Dias e Barros (2006) testaram vigas de betão armado de secção transversal retangular reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM) e com faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente (técnica EBR). Os reforços foram aplicados em vigas que não continham armadura transversal (estribos de aço). Estes autores concluíram que a técnica NSM foi mais eficaz do que a técnica EBR.

Mais recentemente, Dias e Barros (2010) realizaram um programa experimental em vigas T (Figura 2.24) de betão armado onde a técnica NSM voltou a ser comparada com a técnica EBR e neste estudo as vigas reforçadas continham uma determinada percentagem de estribos de aço (0.10%).

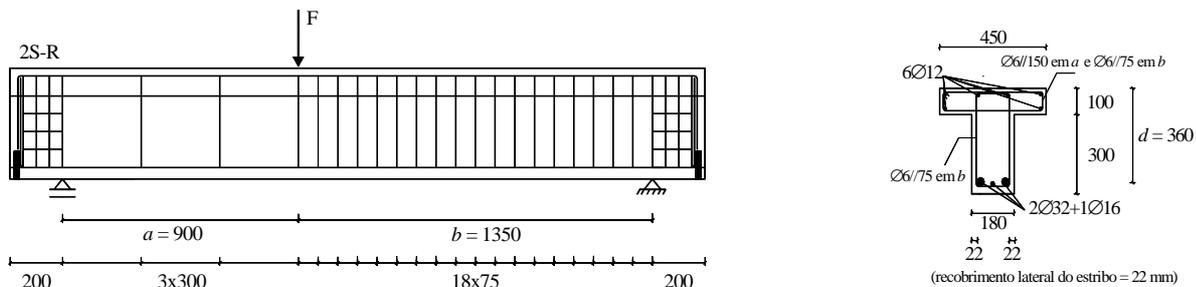


Figura 2. 24 – Vigas testadas: geometria, armaduras de aço aplicadas em todas as vigas (Dias e Barros, 2010).

Foram testadas três percentagens de reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos e para cada percentagem foram testadas três orientações para os laminados (45°, 60° e 90°). Para cada percentagem de reforço de laminados de CFRP inseridos (técnica NSM) foi testada uma viga em que o reforço foi aplicado com faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente (técnica EBR).

Na Figura 2.25 e na Tabela 2.6 e apresentam-se as soluções de reforço utilizadas nas vigas testadas por Dias e Barros (2010). Os reforços de CFRP foram aplicados no vão de corte a (Figura 2.25) onde todas as vigas tinham dois estribos de aço de 6 mm de diâmetro afastados de 300 mm, a que corresponde uma percentagem de armadura transversal de 0.10%. Na Tabela 2.7 apresentam-se as propriedades dos materiais utilizados neste programa experimental.

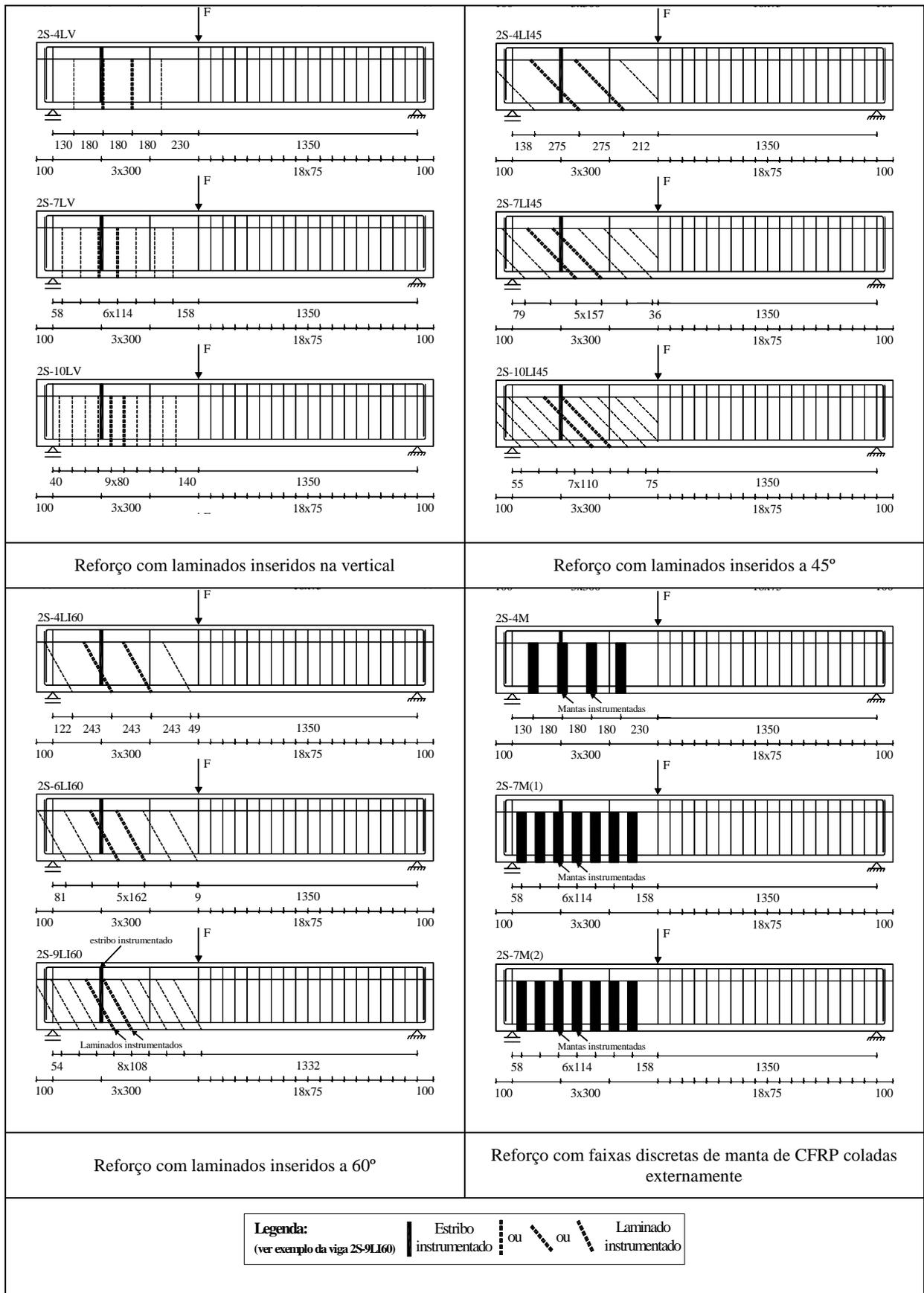


Figura 2. 25 – Vigas reforçadas ao corte com CFRP testadas por Dias e Barros (2010).

Tabela 2.6 – Configurações de reforço ao corte de CFRP das vigas ensaiadas, na menor extensão de corte (Dias e Barros, 2010).

Designação	Técnica de reforço	Quantidade	Porcentagem (%)	Espaçamento (mm)	Ângulo ^d (°)
2S-4LV	NSM: Laminados de CFRP	2 × 4 laminados (1.4 × 9.5 mm ²)	0.08	180	90
2S-7LV		2 × 7 laminados (1.4 × 9.5 mm ²)	0.13	114	90
2S-10LV		2 × 10 laminados (1.4 × 9.5 mm ²)	0.18	80	90
2S-4LI45		2 × 4 laminados (1.4 × 9.5 mm ²)	0.08	275	45
2S-7LI45		2 × 7 laminados (1.4 × 9.5 mm ²)	0.13	157	45
2S-10LI45		2 × 10 laminados (1.4 × 9.5 mm ²)	0.19	110	45
2S-4LI60		2 × 4 laminados (1.4 × 9.5 mm ²)	0.07	243	60
2S-6LI60		2 × 6 laminados (1.4 × 9.5 mm ²)	0.11	162	60
2S-9LI60		2 × 9 laminados (1.4 × 9.5 mm ²)	0.16	108	60
2S-4M ^a		EBR: manta de CFRP	4 tiras de CFRP Configuração em “U” – 1 camada (0.176 × 60 mm ²)	0.07	180
2S-7M(1) ^b	7 tiras de CFRP Configuração em “U” – 1 camada (0.176 × 60 mm ²)		0.10	114	90
2S-7M(2) ^c	7 tiras de CFRP Configuração em “U” – 2 camada (0.176 × 60 mm ²)		0.21	114	90

^a A capacidade de carga máxima prevista era semelhante à das vigas 2S-4LV, 2S-4LI45 e 2S-4LI60.
^b A capacidade de carga máxima prevista era semelhante à das vigas 2S-7LV, 2S-7LI45 e 2S-6LI60.
^c A capacidade carga máxima prevista era semelhante à das vigas 2S-10LV, 2S-10LI45 e 2S-9LI60.
^d Ângulo compreendido entre a direção das fibras de CFRP e o eixo da viga.

Tabela 2.7 – Valores das propriedades dos materiais intervenientes (Dias e Barros, 2010).

Betão	Resistência à compressão				
	$f_{cm} = 31.7$ MPa (aos 28 dias)	$f_{cm} = 39.7$ MPa (aos 106 dias – idade das viga)			
Aço	Resistência à tração	φ6	φ 12	φ 16	φ 32
	f_{sym} (tensão de cedência)	542 MPa	453 MPa	447 MPa	759 MPa
	f_{sum} (tensão máxima)	594 MPa	591 MPa	566 MPa	902 MPa
Laminado de CFRP	Resistência máxima à tração	Módulo de <i>Young</i>		Extensão máxima	
	$f_{fum} = 2741.7$ MPa	$E_{fm} = 170.9$ GPa		$\epsilon_{fu} = 1.60\%$	
Manta de CFRP	Resistência máxima à tração	Módulo de <i>Young</i>		Extensão máxima	
	$f_{fum} = 2862.9$ MPa	$E_{fm} = 218.4$ GPa		$\epsilon_{fu} = 1.33\%$	

Tendo como base os resultados obtidos na viga de referência sem reforço de CFRP, Dias e Barros (2010) concluíram que as soluções com laminados inseridos (técnica NSM) conduziram a um aumento médio da capacidade máxima de carga de 30.3%. Para as soluções com mantas (técnica EBR), o referido aumento foi de 10.4%, ou seja, 34% do aumento proporcionado pelas soluções de laminados inseridos. Na Figura 2.19 está representado o grau de eficácia do reforço de CFRP (medido pelo acréscimo de carga máxima proporcionado pelo reforço de CFRP) em função da percentagem de CFRP e em função da solução de reforço ao corte adotada (laminados verticais, laminados a 45°, laminados a 60° e mantas de CFRP). Além disso verificou-se que o valor médio da extensão máxima registada nos CFRP instrumentados foi de 8.4‰ para o caso das vigas reforçadas com a técnica NSM e 6.5‰ para o caso das vigas reforçadas com a técnica EBR. Estes valores comprovam que a técnica NSM foi a que conduziu a uma maior mobilização do CFRP, ou seja, a um melhor aproveitamento do material de reforço.

Capítulo 3

Formulações analíticas

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No presente capítulo são apresentadas seis formulações analíticas que permitem a quantificação da contribuição na resistência ao esforço transversal de vigas de betão armado do reforço ao corte com compósitos de FRP: quatro referem-se a reforços de FRP aplicados com a técnica da colagem externa (EBR) e duas referem-se a reforços de FRP aplicados com a técnica da inserção (NSM).

Assim, na primeira parte deste capítulo são apresentadas as formulações para o caso da técnica EBR, designadamente as formulações propostas pela *fédération internationale du béton (fib)*, nomeadamente do “Task Group 9.3 FRP reinforcement for concrete structures” (*fib*, 2001), pelo CNR - *Italian National Research Council* (CNR-DT 200/2004, 2004), pela norma Australiana CIDAR (2006) e pelo *American Concrete Institute (ACI)*, nomeadamente do *ACI Committee 440* (2008). A segunda parte deste capítulo é destinada à apresentação das formulações para o caso da técnica NSM, designadamente as formulações propostas por Nanni *et al.* (2004) e Dias e Barros (2013).

No Anexo desta dissertação é exemplificada a aplicação das duas formulações analíticas referentes à técnica NSM (Nanni *et al.* (2004) e Dias e Barros (2013)) a duas soluções distintas de reforço ao corte com CFRP. No trabalho de Areias (2010) é possível consultar a exemplificação da aplicação das formulações apresentadas referentes à técnica EBR a duas soluções distintas de reforço de CFRP.

3.2. FORMULAÇÕES ANALÍTICAS PARA REFORÇOS AO CORTE COM FRP COLADOS EXTERNAMENTE (TÉCNICA EBR)

3.2.1 Formulação *fib* (2001)

De acordo com a proposta da *fib* (2001), o valor de cálculo da contribuição do FRP no ganho de resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado (V_{fd}) é determinado por intermédio da expressão (3.1):

$$V_{fd} = 0.9 \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_f \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \sin \beta \quad (3.1)$$

Na Figura 3.1 ilustram-se alguns dos parâmetros intervenientes na expressão (3.1). Com efeito, o parâmetro θ e β dizem respeito, respetivamente, ao ângulo da fenda diagonal de corte em relação ao eixo longitudinal da viga (o valor assumido é de 45°) e ao ângulo da orientação das fibras do compósito de CFRP em relação ao eixo longitudinal da viga. O parâmetro E_f , b_w e d referem-se, respetivamente, ao módulo de elasticidade do FRP, à largura mínima da secção transversal e à altura efetiva de secção transversal.

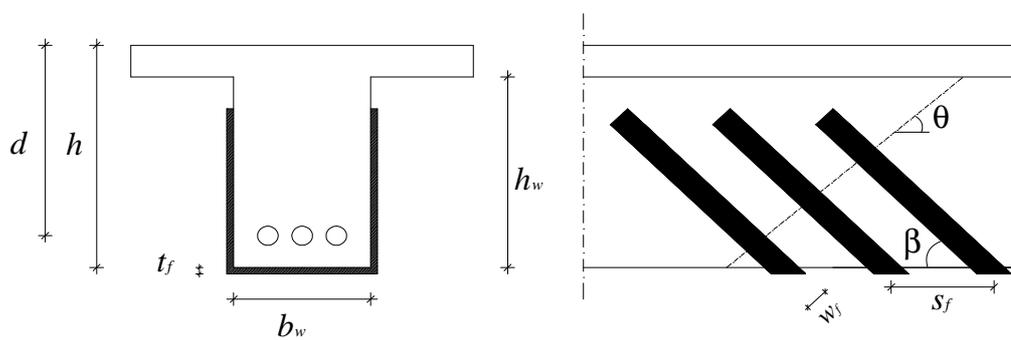


Figura 3.1 – Identificação de parâmetros intervenientes na formulação *fib* (Areias, 2010).

O parâmetro ρ_f presente na equação (3.1) refere-se à taxa geométrica do reforço de FRP que depende da forma como o reforço está distribuído no elemento estrutural:

$$\rho_f = \begin{cases} \frac{2 \cdot t_f \cdot \sin \beta}{b_w} & \text{para configuração contínua} \\ \left(\frac{2 \cdot t_f}{b_w} \right) \cdot \left(\frac{w_f}{s_f} \right) & \text{para configuração discreta} \end{cases} \quad (3.2)$$

Na expressão (3.2) t_f , w_f e s_f referem-se, respetivamente à espessura, à largura e ao espaçamento do FRP (ver Figura 3.1).

O parâmetro $\varepsilon_{fd,e}$ presente na expressão (3.1) refere-se ao valor de cálculo da extensão efetiva no FRP que é determinado por intermédio da seguinte expressão:

$$\varepsilon_{fd,e} = \frac{\varepsilon_{fk,e}}{\gamma_f} \quad (3.3)$$

em que $\varepsilon_{fk,e}$ é o valor característico da extensão efetiva do FRP e γ_f é um coeficiente parcial de segurança. Para os casos em que o modo de rotura do elemento reforçado é por rotura do

FRP γ_f é obtido de acordo com o representado na Tabela 3.1, enquanto que para os casos em que o modo de rotura do elemento reforçado é o destacamento do FRP o coeficiente γ_f deve ser considerado igual a 1.3.

Tabela 3.1 – Valores para o coeficiente parcial de segurança parcial γ_f (*fib*, 2001).

Tipos de FRP	Tipos de aplicação	Valor do parâmetro γ_f
CFRP	A	1.20
	B	1.35
AFRP	A	1.25
	B	1.45
GFRP	A	1.30
	B	1.50

A: sistemas de FRP pré-fabricados (laminados) colados externamente, com condições normais de controlo de qualidade. Aplicação de sistemas de FRP curados “*in situ*” com elevado controlo de qualidade das condições de aplicação e do processo de aplicação.

B: Sistemas de FRP curados “*in situ*” sob condições normais de controlo de qualidade. Aplicação de qualquer sistema de FRP com condições difíceis de trabalho.

A extensão efetiva do FRP (expressão (3.4)) depende do valor médio da extensão efetiva do FRP ($\varepsilon_{f,e}$) e do factor que converte o valor médio para o característico (k), sendo que, de acordo com a proposta de *fib* (2001), k deve ser igual a 0.8.

$$\varepsilon_{fk,e} = k \cdot \varepsilon_{f,e} \quad (3.4)$$

O valor médio da extensão efetiva do CFRP ($\varepsilon_{f,e}$) é determinada de acordo com (3.5) e é função da configuração do reforço de CFRP utilizado (reforço colado apenas nas faces laterais (reforço em forma de “S”), reforço aplicado em forma de “U” ou reforço envolvendo toda a secção (reforço em forma de “O”)).

$$\varepsilon_{f,e} = \begin{cases} 0.17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \rho_f} \right)^{0.3} \cdot \varepsilon_{fu} & \text{para reforços em "U" ou em "S"} \\ \min \left\{ 0.65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \rho_f} \right)^{0.56} \cdot 10^{-3}; 0.17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \rho_f} \right)^{0.3} \cdot \varepsilon_{fu} \right\} & \text{para reforços em "O"} \end{cases} \quad (3.5)$$

em que f_{cm} é o valor médio da resistência à compressão do betão (valor deve ser introduzido em MPa) e ε_{fu} é a extensão última do CFRP. Na expressão (3.5) o valor do módulo de elasticidade deve entrar em GPa.

Se o material de reforço for AFRP e se for aplicado envolvendo completamente a secção de betão armado, o valor da extensão efetiva do AFRP é obtido usando a expressão (3.6).

$$\varepsilon_{f,e} = 0.048 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_f \cdot \rho_f} \right)^{0.3} \cdot \varepsilon_{fu} \quad (3.6)$$

Nas expressões (3.5) e (3.6) f_{cm} é o valor médio da resistência à compressão do betão (valor deve ser introduzido em MPa) e ε_{fu} é a extensão última do CFRP. Nestas duas expressões o valor do módulo de elasticidade deve entrar em GPa.

Em função do que se acaba de expor verifica-se que a formulação da *fib* é aplicável para reforços ao corte com compósitos de CFRP, independentemente da configuração de reforço (CFRP envolvendo totalmente a secção, aplicado em forma de “U”, colado nas faces laterais) e para reforços ao corte com compósitos de AFRP no caso de envolverem totalmente a secção de betão armado.

3.2.2 Formulação CNR (2004)

De acordo com a proposta do *CNR-DT200/2004*, no caso do reforço de FRP ser aplicado em forma de “S”, o valor de cálculo da contribuição do FRP no ganho de resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado é determinado por intermédio da expressão (3.7).

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \min\{0.9 \cdot d, h_w\} \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \theta} \cdot \frac{w_f}{s_f} \quad (3.7)$$

Em que (ver Figura 3.2):

γ_{Rd} – coeficiente parcial de segurança e que deve ser considerado igual a 1.2;

f_{fed} – valor de cálculo da tensão efetiva do FRP;

d – altura útil da secção transversal da viga;

h_w – altura da alma;

t_f – espessura do compósito de FRP;

β – ângulo da orientação das fibras do compósito de FRP em relação ao eixo longitudinal da viga;

θ – ângulo da fenda diagonal de corte em relação ao eixo longitudinal da viga assumindo-se o valor de 45° , a não ser que haja informação mais exata sobre o valor do ângulo;

w_f – largura do compósito de FRP;

\bar{s}_f – espaçamento entre os compósitos de FRP, medido na direção perpendicular à orientação das fibras ($\bar{s}_f = s_f \sin \beta$, em que s_f é o espaçamento do FRP medido na direção do eixo da viga – ver Figura 3.2).

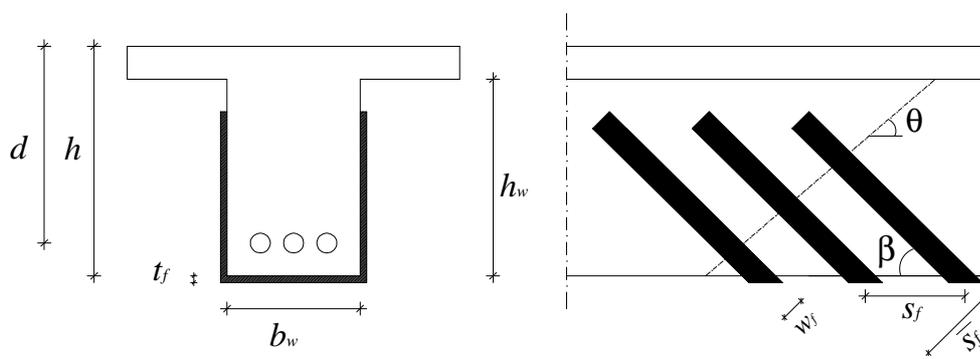


Figura 3.2 – Identificação de parâmetros intervenientes na formulação CNR (Areias, 2010).

No caso do reforço de FRP ser aplicado em forma de “U” ou em forma de “O”, a contribuição do reforço FRP, $V_{Rd,f}$, deve ser calculada usando a expressão (3.8).

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{w_f}{\bar{s}_f} \quad (3.8)$$

Nas expressões (3.7) e (3.8), o parâmetro f_{fed} refere-se ao valor de cálculo da tensão efetiva do FRP e é definida como sendo a tensão de tração do FRP associada ao início do destacamento/descolamento do reforço de FRP.

Para o caso em que o reforço de FRP é colado apenas nas faces laterais (em forma de “S”), o valor da tensão efetiva de cálculo (f_{fed}) é obtido por intermédio da expressão (3.9):

$$f_{fed} = f_{fdd} \frac{\min\{0.9 \cdot d, h_w\} - l_e \cdot \sin \beta + l_{eq}}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \left(1 - 0.6 \cdot \sqrt{\frac{l_{eq}}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\} - l_e \cdot \sin \beta + l_{eq}}} \right)^2 \quad (3.9)$$

Em que l_{eq} é o comprimento efetivo de ancoragem, é obtido pela expressão (3.10).

$$l_{eq} = \frac{s_{f,e}}{f_{fdd}/E_f} \sin \beta \quad (3.10)$$

Na expressão (3.10) $s_{f,e}$ toma o valor 0.2 mm, E_f é o módulo de elasticidade do FRP e os parâmetros f_{fdd} corresponde ao valor de cálculo da tensão última à tração do compósito FRP no caso de uma rotura por descolamento/destacamento do reforço. O valor de f_{fdd} é obtido usando a expressão (3.11), na qual $\gamma_{f,d}$ é um coeficiente parcial de segurança do material de FRP que é obtido na Tabela 3.2.

$$f_{fdd} = \frac{0.8}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{fk}}{t_f}} \quad (3.11)$$

Tabela 3.2 – Valores do coeficiente parcial de segurança do reforço FRP (CNR-DT 200/2004, 2004).

Modo de rotura	Nomenclatura	Aplicação tipo A ⁽¹⁾	Aplicação tipo B ⁽²⁾
Rotura do FRP	γ_f	1.10	1.25
Destacamento do FRP	$\gamma_{f,d}$	1.20	1.50

⁽¹⁾ Certificação do sistema de reforço quer nos seus elementos individuais como no produto final a ser aplicado.
⁽²⁾ Certificação do sistema de reforço apenas nos elementos individuais.

Na expressão (3.10), o parâmetro Γ_{fk} é o valor característico da energia de fratura da ligação e deve ser calculado por intermédio da expressão (3.12):

$$\Gamma_{fk} = 0.03 \cdot k_b \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad (3.12)$$

Em que:

f_{ck} – valor característico da resistência à compressão do betão;

f_{ctm} – valor médio da resistência à tração do betão;

k_b – parâmetro geométrico dependente da largura do FRP e determinado usando a expressão (3.13).

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/400}} \geq 1 \quad (3.13)$$

No caso do reforço aplicado de forma discreta, na expressão (3.13) deve-se considerar que $b_f = w_f$ e $b = \bar{s}_f$. No caso do reforço ser aplicado de forma contínua, deve considerar-se

$b_f = b = \min \{0.9d; h_w\} \frac{\sin(\theta+\beta)}{\sin \theta}$. Caso se verifique a condição $b_f/b \leq 0.33$, o parâmetro k_b toma o valor 0.33 .

O comprimento efetivo de aderência, l_e , presente na expressão (3.9) é obtido por intermédio da expressão (3.14).

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} \quad (3.14)$$

Para o caso em que o reforço de FRP é colado em forma “U”, o valor da tensão efetiva de cálculo (f_{fed}) é obtido por intermédio da expressão (3.15).

$$f_{fed} = f_{fda} \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] \quad (3.15)$$

Para o caso em que o reforço de FRP envolve totalmente a secção de betão armado (em forma de “O”), o valor de f_{fed} é calculado usando a expressão (3.16).

$$f_{fed} = f_{fda} \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] + \frac{1}{2} (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fda}) \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] \quad (3.16)$$

Em que o parâmetro ϕ_R é obtido usando a expressão (3.17), onde r_c é o raio de curvatura da secção a reforçar (arredondamento das arestas) e b_w é a largura do elemento estrutural.

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b_w}, \quad 0 \leq \frac{r_c}{b_w} \leq 0.5 \quad (3.17)$$

Na expressão (3.16) f_{fd} é o valor de cálculo da tensão de tração do FRP, obtido de acordo com a expressão (3.18) que devolve o valor de cálculo de uma variável (neste caso trata-se do valor de cálculo da tensão de tração do FRP). Nesta expressão η é um parâmetro que tem em conta um conjunto de fatores que alteram o comportamento e durabilidade dos FRP ao longo do tempo (Tabela 3.3) e o parâmetro γ_m é um fator parcial de segurança que tem em conta o tipo de aplicação (Tabela 3.2).

Na expressão (3.16), a contribuição da segunda parcela só deve ser considerada se for positiva

$$\left(\frac{1}{2} (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fda}) \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] > 0 \right).$$

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (3.18)$$

Tabela 3.3 – Valores para o fator ambiental condicionante do comportamento do reforço FRP (CNRDT 200/2004, 2004).

Condições de exposição	Tipo de fibra ou resina	η
Interna	Vidro / Epoxi	0.75
	Aramida / Epoxi	0.85
	Carbono / Epoxi	0.95
Externa	Vidro / Epoxi	0.65
	Aramida / Epoxi	0.75
	Carbono / Epoxi	0.85
Ambientes agressivos	Vidro / Epoxi	0.50
	Aramida / Epoxi	0.70
	Carbono / Epoxi	0.85

3.2.3 Formulação CIDAR (2006)

De acordo com a proposta do CIDAR (2006), o valor de cálculo da contribuição do FRP no ganho de resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado (V_{fd}) é determinado pela expressão (3.19):

$$V_{fd} = 2 \cdot f_{f,e} \cdot t_f \cdot w_f \cdot \frac{h_{f,e} \cdot (\sin \beta + \cos \beta)}{s_f} \quad (3.19)$$

Na Figura 3.3 ilustram-se alguns dos parâmetros intervenientes na expressão (3.18). Assim, os parâmetros t_f e w_f referem-se, respetivamente, à espessura e à largura do reforço de FRP (medido na perpendicular à orientação do consecutivas de FRP). Na eventualidade do reforço ser aplicado de forma contínua o parâmetro s_f deve ser calculado por intermédio da expressão (3.20).

$$s_f = \frac{w_f}{\sin \beta} \quad (3.20)$$

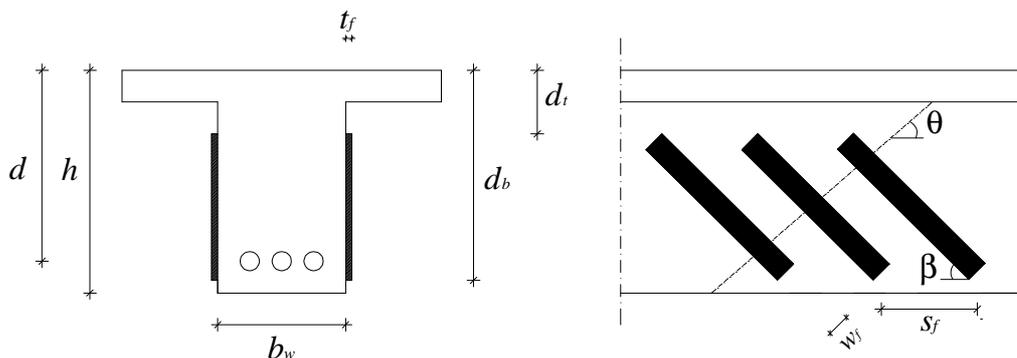


Figura 3.3 - Identificação de parâmetros intervenientes na formulação do CIDAR.

Na expressão (3.19) o parâmetro $h_{f,e}$ é a altura efetiva do elemento estrutural e é obtido pela equação (3.21) em que z_b e z_t são determinados pelas expressões (3.22) e (3.23), respetivamente. Nestas expressões, d_b é distância desde a fibra mais comprimida até à extremidade inferior do reforço (Figura 3.3) e d_t é distância desde a fibra mais comprimida até à extremidade superior do reforço (Figura 3.3).

$$h_{f,e} = z_b - z_t \quad (3.21)$$

$$z_b = d_b - h + 0.9 \cdot d \quad (3.22)$$

$$z_t = d_t \quad (3.23)$$

Na expressão (3.19) $f_{f,e}$ é o valor médio da tensão aplicada no reforço e é obtida por intermédio da expressão (3.24)

$$f_{f,e} = D \cdot \sigma_{f,max} \quad (3.24)$$

Em que D é um fator de distribuição de tensões e $\sigma_{f,max}$ é a tensão máxima que o compósito pode atingir. Os parâmetros anteriormente mencionados são calculados em função do seu modo de rotura.

Se a rotura por corte ocorrer pela **rotura do CFRP**, as expressões a considerar no cálculo de D e $\sigma_{f,max}$ são as seguintes:

$$D = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{z_t}{z_b} \right) \quad (3.25)$$

e

$$\sigma_{f,max} = \begin{cases} 0.8 \cdot f_{fu} & \text{se } \varepsilon_{fu} \leq \varepsilon_{max} \\ 0.8 \cdot \varepsilon_{max} \cdot E_f & \text{se } \varepsilon_{fu} > \varepsilon_{max} \end{cases} \quad (3.26)$$

Na expressão (3.26) o valor recomendado para a extensão máxima, ε_{max} , é de 1.5% e os valores de cálculo da tensão máxima resistente à tração (f_{fu}) e da extensão última (ε_{fu}) do FRP são obtidos de acordo com as expressões (3.43) e (3.44), respetivamente.

Se a rotura por corte ocorrer pelo **destacamento do CFRP**, a expressão a considerar no cálculo do parâmetro D é a seguinte:

$$D = \begin{cases} \frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \lambda\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \lambda\right)} & \text{se } \lambda \leq 1 \\ 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \cdot \lambda} & \text{se } \lambda > 1 \end{cases} \quad (3.27)$$

Em que o parâmetro λ é calculado por intermédio da expressão (3.28), onde o parâmetro L_{max} depende do tipo de configuração de reforço e é determinado pela expressão (3.28).

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_b} \quad (3.28)$$

$$L_{max} = \begin{cases} \frac{h_{f,e}}{\sin \beta} & \text{se configuração "U"} \\ \frac{h_{f,e}}{2 \cdot \sin \beta} & \text{se configuração "S"} \end{cases} \quad (3.29)$$

Na expressão (3.28) L_b refere-se ao comprimento mínimo de aderência e é obtido pela expressão (3.30) em que E_f é o módulo de elasticidade no reforço de FRP e f_{ck} é o valor característico da resistência á compressão do betão em cilindros.

$$L_b = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{\sqrt{f_{ck}}}} \quad (3.30)$$

Se a rotura por corte ocorrer pelo **destacamento do CFRP**, a expressão a considerar no cálculo do parâmetro $\sigma_{f,max}$ é a seguinte:

$$\sigma_{f,max} = \min\{0.8 \cdot f_{fu}; \sigma_{IC}\} \quad (3.31)$$

Na expressão (3.31) o parâmetro σ_{IC} é o valor característico da tensão de destacamento e é obtido por:

$$\sigma_{IC} = \alpha_{EB} \cdot \beta_f \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot \sqrt{f_{ck}}}{t_f}} \quad (3.32)$$

Em que α_{EB} é igualado a 0.315; β_f é o coeficiente de largura e depende do tipo de configuração (expressão 3.33).

$$\beta_f = \begin{cases} 0.707 & \text{se configuração contínua} \\ \sqrt{\frac{2 - w_f/s_f \cdot \sin \beta}{1 + w_f/s_f \cdot \sin \beta}} & \text{se configuração discreta} \end{cases} \quad (3.33)$$

3.2.4 Formulação ACI (2008)

A equação para o cálculo da contribuição do FRP na resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado proposta é a seguinte:

$$V_f = \phi \cdot \psi_f \cdot \frac{A_{fv} \cdot f_{fe} \cdot (\sin \beta + \cos \beta) \cdot d_v}{s_f} \quad (3.34)$$

Em que

ϕ é um parâmetro que tem em conta o tipo de esforço; na condição de esforço transversal toma o valor 0.85;

ψ_f é um coeficiente que depende do tipo de configuração do reforço de FRP (Tabela 3.4);

Tabela 3.4 – Valores do parâmetro ψ_f , de acordo com o tipo de configuração de reforço.

Tipo de configuração do reforço	Valor do parâmetro ψ_f
Envolve em completo o elemento estrutural (“O”)	0.95
Envolve o elemento em dois lados (“S”) ou em três lados (“U”)	0.85

β é o ângulo da orientação das fibras de FRP, d_v é a altura útil do reforço de FRP e s_f trata-se do espaçamento na direção do eixo da viga (Figura 3.4).

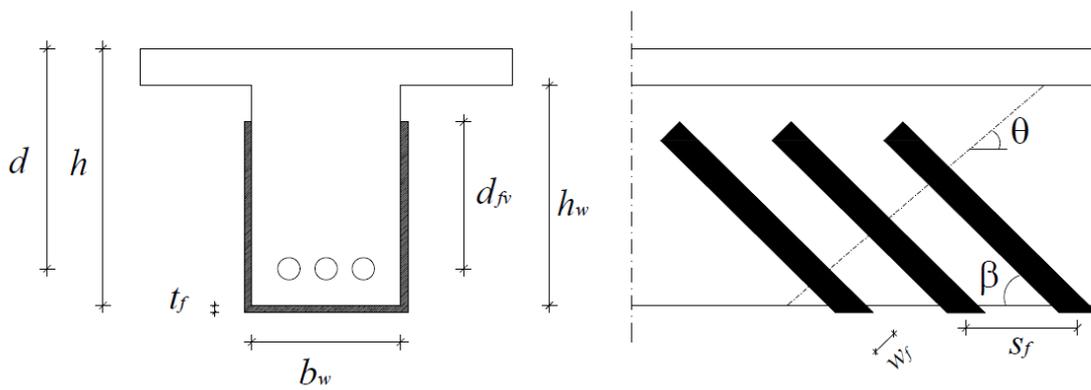


Figura 3.4 – Representação esquemática dos parâmetros necessários para a formulação ACI (Areias, 2010).

A_{fv} é a área de FRP que depende dos parâmetros: número de camadas (n), espessura (t_f) e largura de FRP (w_f), calculado pela equação (3.35);

$$A_{fv} = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \quad (3.35)$$

f_{fe} refere-se à tensão efetiva do FRP, onde se tem em conta a extensão efetiva do FRP (ε_{fe}) e o módulo de elasticidade do FRP (E_f), determina-se através da expressão (3.36);

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} \cdot E_f \quad (3.36)$$

A extensão efetiva define-se como a extensão máxima obtida pelo reforço FRP, no instante em que a capacidade de carga máxima, do elemento reforçado, é alcançada. O valor desta depende dos modos de rotura e, conseqüentemente, da configuração de reforço de FRP elegida.

$$\varepsilon_{fe} = \begin{cases} 0.004 \leq 0.75 \cdot \varepsilon_{fu} & \text{se configuração em "O"} \\ k_v \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0.004 & \text{se configuração em "U" ou em "S"} \end{cases} \quad (3.37)$$

Em que

ε_{fu} é a extensão última do FRP, obtido pela expressão (3.44).

k_v refere-se a um coeficiente de redução da aderência e pode ser determinado pela seguinte expressão, no caso em que a região em estudo apresenta valores de esforço transversal alto e de momentos baixos (por exemplo, na proximidade dos apoios de uma viga simplesmente apoiada sujeita a carregamento monotónico):

$$k_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (3.38)$$

O coeficiente k_v depende de parâmetros como:

k_1 tem em conta a resistência do betão e depende do valor característico da resistência à compressão do betão (f'_c), calcula-se através da expressão (3.39).

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad (3.39)$$

k_2 considera o tipo de configuração do reforço FRP, alcançado pela expressão (3.40).

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & \text{para configuração em "U"} \\ \frac{d_{fv} - 2 \cdot L_e}{d_{fv}} & \text{para configuração em "S"} \end{cases} \quad (3.40)$$

L_e é o comprimento de ligação efetivo, retirado a partir da expressão (3.41).

$$L_e = \frac{23300}{(n_f \cdot t_f \cdot E_f)^{0.58}} \quad (3.41)$$

O módulo de elasticidade, para fibras unidireccionais, é obtido através da Lei de Hooke:

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (3.42)$$

A tensão máxima, resistente à tração, depende do valor da tensão máxima, resistente à tração (f_{fu}^*) – consultada através de catálogos pelos fabricantes –, e de um fator de redução (C_E) – definido pela ACI Committee 440 (2008); calcula-se pela expressão (3.43)

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad (3.43)$$

A extensão última do FRP contempla o fator de redução mencionado anteriormente (C_E) e o valor de extensão última (ε_{fu}^*).

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (3.44)$$

O factor C_E considera uma redução no parâmetro em estudo dependendo das condições de exposição ambiental e tipos de fibra.

Tabela 3.5 – Valores do factor C_E , segundo o ACI Committee 440 (2008).

Tipos de fibra	Condições de exposição	Valor do parâmetro C_E
Carbono	Interior	0.95
	Exterior	0.85
	Ambientes agressivos	
Vidro	Interior	0.75
	Exterior	0.65
	Ambientes agressivos	0.50
Aramida	Interior	0.85
	Exterior	0.75
	Ambientes agressivos	0.70

3.3 FORMULAÇÕES ANALÍTICAS PARA REFORÇOS AO CORTE COM FRP INSERIDOS NO BETÃO DE RECOBRIMENTO (TÉCNICA NSM)

3.3.1 Formulação Nanni *et al.* (2004)

De acordo com a proposta de Nanni *et al.* (2004), o valor da contribuição do reforço ao corte com FRP, aplicado com a técnica NSM, na resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado através da técnica NSM é obtida através da equação (3.45):

$$V_f = \begin{cases} 4 (a_f + b_f) \tau_b L_{tot\ min} \sin \alpha & \text{para o caso do reforço com laminados} \\ 2 (\pi \cdot d_f) \tau_b L_{tot\ min} \sin \alpha & \text{para o caso do reforço com varões} \end{cases} \quad (3.45)$$

Em que a_f e b_f são as dimensões da secção transversal do laminado e d_f é o diâmetro da secção transversal do varão de FRP. O parâmetro τ_b é o valor médio da tensão de aderência (resistência da ligação colada), enquanto $L_{tot\ min}$ é o somatório dos comprimentos de colagem efetivos do FRP (L_i - ver Figura 3.5) que atravessam a fenda de corte (com inclinação

admitida constante e igual a 45°) na posição mais desfavorável. O valor de $L_{tot\ min}$ é obtido por intermédio da expressão (3.46).

$$L_{tot\ min} = \sum_i L_i \tag{3.46}$$

Quando um FRP é atravessado pela fenda de corte é dividido em duas partes, ficando assim o FRP com dois comprimentos de amarração. O comprimento L_i é o menor destes dois comprimentos de amarração e é obtido usando a expressão (3.47).

$$L_i = \begin{cases} \min\left(\frac{s_f}{\cos\alpha + \sin\alpha} i; l_{max}\right) & i = 1 \dots N/2 \\ \min\left(l_{net} - \frac{s_f}{\cos\alpha + \sin\alpha} i; l_{max}\right) & i = \frac{N}{2} + 1 \dots N \end{cases} \tag{3.47}$$

Na Figura 3.5 ilustram-se alguns dos parâmetros intervenientes na expressão (3.47). Assim, α é a orientação do FRP em relação ao eixo (longitudinal) da viga, enquanto que o parâmetro l_{net} representa o comprimento total efetivo do FRP (Figura 3.5) e c é a espessura do betão de recobrimento das armaduras longitudinais.

$$l_{net} = l_b - \frac{2c}{\sin\alpha} \tag{3.48}$$

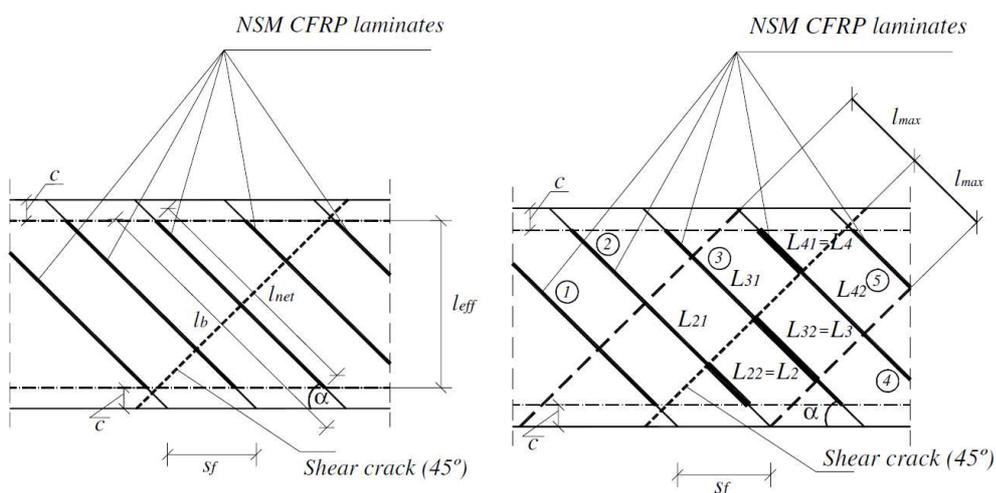


Figura 3.5 – Representação esquemática das variáveis utilizadas na formulação de Nanni *et al.* (2004), por exemplo $\sum_i L_i = L_2 + L_3 + L_4$ (Barros e Dias, 2006).

A primeira limitação (3.47) tem em conta que a rotura se dá pela ligação colada e representa o comprimento efetivo mínimo do laminado de FRP intersetado pela fenda de corte e é

calculado tendo em conta o valor do parâmetro N que é igual ao valor dado pela expressão (3.48) arredondado para o inteiro mais baixo (por exemplo, $N=5.7 \rightarrow N=5$).

$$N = \frac{l_{eff}(1 + \cot \alpha)}{s_f} \quad (3.49)$$

Na expressão (3.49) l_{eff} representa, tal como representado na Figura 3.5, a projeção vertical do comprimento l_{net} e é definido por:

$$l_{eff} = l_b \sin \alpha - 2c \quad (3.50)$$

A segunda limitação (3.47), $L_i = l_{max}$, resulta da imposição da condição de equilíbrio de forças considerando um determinado valor máximo para a extensão efetiva no FRP, designada por ε_{fe} (ver Figura 3.6).

$$l_{max} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{fe}}{2} \frac{a_f b_f E_f}{a_f + b_f \tau_b} & \text{para o caso do reforço aplicado com laminados} \\ \frac{\varepsilon_{fe}}{4} d \frac{E_f}{\tau_b} & \text{para o caso do reforço aplicado com varões} \end{cases} \quad (3.51)$$

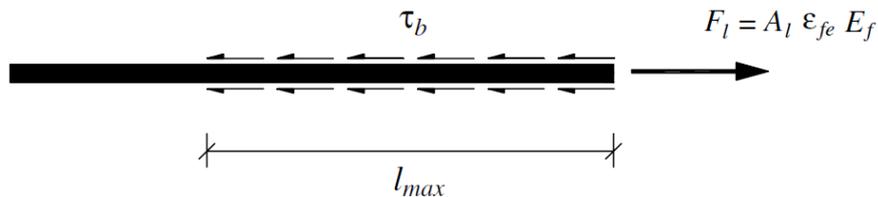


Figura 3.6 – Representação esquemática de l_{max} (Barros e Dias, 2006).

De acordo com a formulação de Nanni *et al.* (2004), os valores a considerar para os parâmetros τ_b e ε_{fe} são, respetivamente, 6.9 MPa (valor obtido em ensaios de aderência com varões) e 4.0‰. Dias e Barros (2006) verificam que para o caso de laminados, a consideração $\tau_b = 6.9 \text{ MPa}$ e $\varepsilon_{fe} = 4.0\text{‰}$ conduzia a valores demasiado conservativos da contribuição V_f .

Com efeito estes autores concluíram que, para um conjunto de vigas testadas experimentalmente, o valor da relação entre o V_f obtido experimentalmente e o valor do V_f obtido analiticamente usando a formulação de Nanni *et al.* (2004) era de 2.51. Neste sentido, Dias e Barros (2006) propuseram para τ_b e ε_{fe} os valores de 16.1 MPa e 5.9‰,

respetivamente. Estes novos valores resultaram de ensaios de *pull-out* com laminados de CFRP inseridos efetuados por Sena Cruz e Barros (2004). Com estes novos valores o valor médio da relação entre o V_f obtido experimental e o valor do V_f obtido analítico obtido usando a formulação de Nanni *et al.* (2004) foi de 1.39.

3.3.2 Formulação Dias e Barros (2013)

Com base em Dias e Barros (2013), a contribuição do reforço ao corte de vigas de betão armado através da técnica NSM com laminados de CFRP é obtida através da equação (3.52):

$$V_f = h_w \cdot \frac{A_{fv}}{s_f} \cdot f_{fe} \cdot (\cot \alpha + \cot \theta_f) \cdot \sin \theta_f \quad (3.52)$$

Em que

θ_f – orientação dos laminados relativamente ao eixo da viga;

α – orientação da fissura de rotura crítica (o valor admitido é de 45°);

h_w – altura da alma da viga (igual ao comprimento de laminados quando inserido na vertical);

s_f – espaçamento dos laminados consecutivos;

A_{fv} – área de reforço ao corte de CFRP;

f_{fe} – tensão efetiva do CFRP .

A área de reforço ao corte de CFRP (A_{fv}) é igual a duas vezes o valor da área da secção transversal do laminado, ou seja:

$$A_{fv} = 2 \cdot a_f \cdot b_f \quad (3.53)$$

De acordo com a expressão (3.54), a tensão efetiva do CFRP (f_{fe}) é obtida pelo produto do seu módulo de elasticidade, E_f , pela extensão efetiva, ε_{fe} .

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (3.54)$$

A extensão efetiva do CFRP (ε_{fe}) é obtida por:

$$\varepsilon_{fe} = C_1 \left[(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / f_{cm} \right]^{2/3} / \gamma_f \quad (3.55)$$

Na expressão (3.55), E_f e E_s são, respetivamente, os módulos de elasticidade do CFRP e do aço. Além disso, ρ_f e ρ_{sw} referem-se, respetivamente, às percentagens de CFRP e de aço; enquanto que γ_f é um fator de segurança, que deve ser considerado 1.3.

As constantes C_1 e C_2 presentes na expressão (3.55) são calculadas por intermédio das expressões (3.56) e (3.57), respetivamente.

$$C_1 = 3.76888 e^{-0.1160261\theta_f + 0.0010437\theta_f^2} \quad (3.56)$$

$$C_2 = 0.460679 \times e^{0.0351199\theta_f - 0.0003431\theta_f^2} \quad (3.57)$$

Capítulo 4

Apresentação da base de dados

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O capítulo 4 tem como objetivo apresentar a base de dados, atualmente existente, com resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de FRP. A base de dados foi inicializada por Lima e Barros (2011), com cerca de 250 vigas reforçadas ao corte com compósitos de FRP aplicados com a técnica da colagem externa (EBR). Posteriormente, esta base de dados foi aumentada (Areias (2010); Barros *et al.* (2011)) passando a base de dados a ter 451 vigas reforçadas com a técnica EBR e 83 vigas reforçadas com a técnica NSM.

No âmbito da presente dissertação procedeu-se a uma nova atualização da base de dados fazendo com que, atualmente, a base de dados tenha 594 vigas reforçadas com a técnica EBR e 106 vigas reforçadas com a técnica NSM. Para esta nova atualização foi feito um levantamento exaustivo de artigos científicos e teses que incluíssem trabalhos experimentais sobre a aplicação de compósitos de FRP no reforço ao corte de vigas de betão armado (técnica EBR e técnica NSM). A recolha dos artigos e teses foi sistematizada através do programa *Mendeley*. Este *software* permite a organização da pesquisa, gera bibliografias e possibilita a procura de artigos baseada no tema em estudo.

Este capítulo encontra-se dividido em duas partes. A primeira está centrada nas vigas reforçadas com a técnica EBR e a segunda é dedicada às vigas reforçadas com a técnica NSM.

4.2 VIGAS REFORÇADAS COM A TÉCNICA DA COLAGEM EXTERNA

4.2.1 Descrição da base de dados

De acordo com o que foi anteriormente referido, a versão atual da base de dados contém resultados experimentais de 594 vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de FRP aplicados com a técnica EBR. Na Tabela 4.1 apresenta-se a informação genérica sobre os trabalhos experimentais associados às referidas 594 vigas.

Na Tabela 4.2 procede-se à divisão das 594 vigas reforçadas ao corte com compósitos de FRP aplicados com a técnica EBR em função do tipo de FRP (AFRP no caso de fibra de aramida, CFRP no caso de fibra de carbono e GFRP no caso de fibra de vidro) e do tipo de configuração do FRP em termos de superfície colada. Neste contexto, por simplificação, atribuem-se símbolos a cada tipo de configuração de superfície do FRP:

- “S” refere-se a reforço de FRP colado apenas nas faces laterais da viga (Figura 2.5a);
- “U” refere-se a reforço de FRP que é aplicado em forma de “U” (Figura 2.5b);
- “O” refere-se a reforço de FRP que envolve totalmente a secção transversal da viga (Figura 2.5c).

Tabela 4.2 – Distribuição das vigas reforçadas com a técnica EBR, de acordo com o tipo de FRP e com o tipo de configuração do reforço.

Tipo de FRP	Número de vigas	Configuração			Total
		S	U	O	
AFRP	34	1	11	22	34
CFRP	518	167	258	93	518
GFRP	42	12	15	15	42
Total	594	180	284	130	594

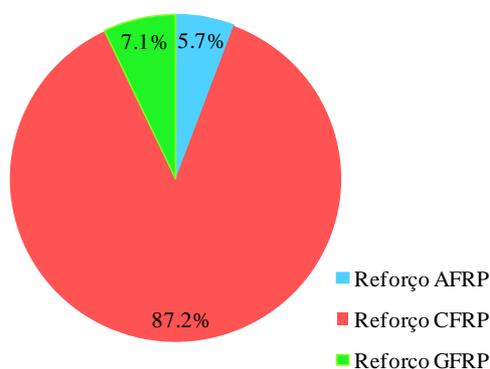
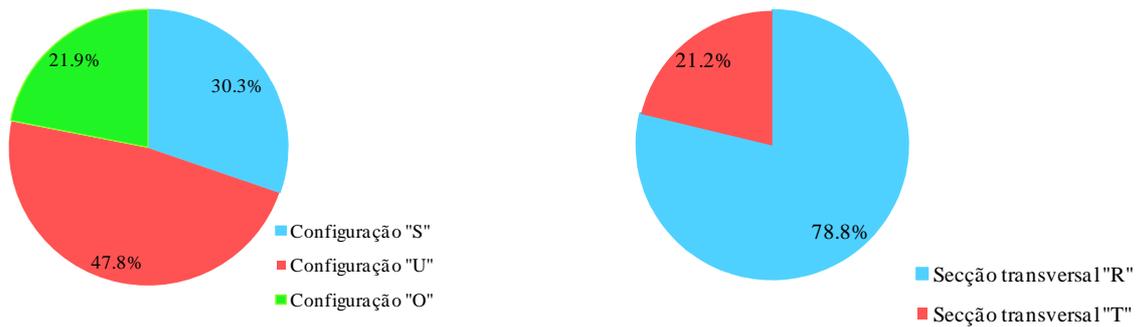
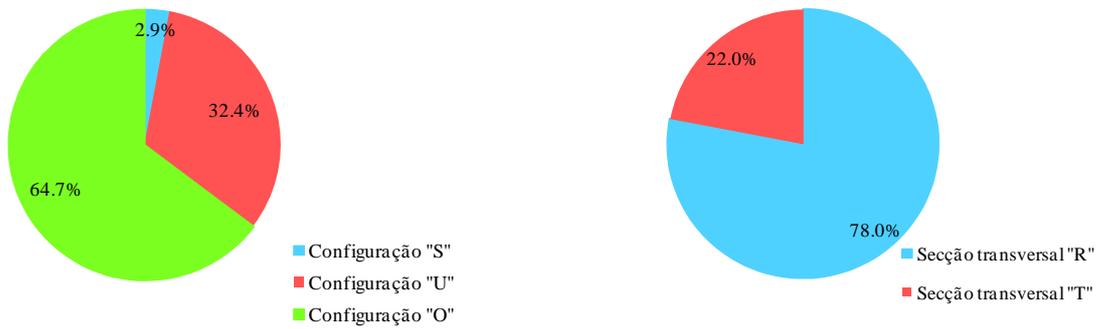


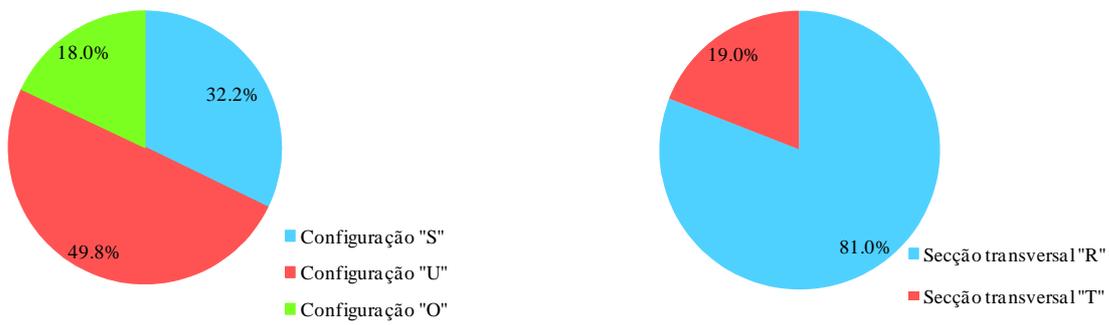
Figura 4.1 – Distribuição das vigas reforçadas com a técnica EBR de acordo com o tipo de FRP.



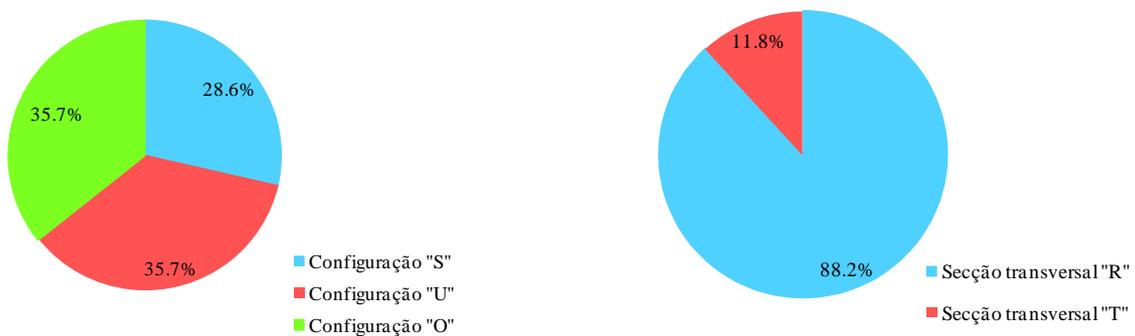
(a) Reforço de FRP



(b) Reforço de AFRP



(c) Reforço de CFRP



(d) Reforço de GFRP

Figura 4.2 – Distribuição das vigas reforçadas com a técnica EBR pelo tipo de FRP, de acordo com o tipo de configuração do reforço e da secção transversal das vigas.

Tendo como base os dados da Tabela 4.2 é possível concluir que o FRP mais usado no reforço ao corte de vigas de betão armado com a técnica EBR tem sido o de fibra de carbono (CFRP). Com efeito, tal como representado na Figura 4.1 (a), o reforço de CFRP, de GFRP e de AFRP está associado a, respetivamente, 87.2%, 7.1% e 5.7% das vigas da base dados reforçadas ao corte com a técnica EBR.

No que diz respeito ao tipo de configuração do FRP em termos de superfície colada das 594 vigas reforçadas com a técnica EBR, em 47.8% dos casos o reforço foi aplicado em forma de “U”, em 30.3% dos casos o reforço foi aplicado em forma de “S” e o reforço em forma de “O” foi aplicado em 21.9% dos casos (Figura 4.2 (a)). Desta forma, verifica-se que a configuração de reforço mais estudada foi a configuração em forma de U.

A escolha das fibras de carbono e da configuração de reforço em forma de U para o reforço de uma parte significativa das 594 vigas deve-se ao melhor desempenho das fibras de carbono, em relação às de vidro e de aramida, e ao facto da configuração em U ser a que possibilita aliar melhor a simplicidade de execução e o grau de eficácia que se consegue obter com o reforço.

De acordo com os dados da Tabela 4.2 e da Figura 4.2, das vigas reforçadas com CFRP, em cerca de 49.8% dos casos o reforço foi aplicado em forma de “U”, em 32.2% dos casos o reforço foi aplicado em forma de “S” e em 18% dos casos o reforço foi aplicado em forma de “O”. Nas vigas com GFRP foram usadas as três configurações de reforço em percentagens semelhantes. No caso do reforço com AFRP, a forma de reforço em “O” foi a mais adotada (64.7% dos casos) enquanto que o reforço em forma de “S” foi aplicado em apenas uma viga (2.9% dos casos).

De acordo com a Figura 4.2 (b), as secções transversais das vigas reforçadas com FRP em análise tinham duas formas distintas: a retangular (468 vigas que corresponde a 78.8% da totalidade das vigas) e em forma “T” (126 vigas que corresponde a 21.2% da totalidade das vigas). Esta tendência verifica-se independentemente do tipo de FRP (Figura 4.2).

Tal como referido no Capítulo 2 desta dissertação (Figura 2.6), o reforço ao corte de FRP em termos de distribuição no elemento estrutural a reforçar pode ser aplicado de forma discreta ou de forma contínua. Além disso, a orientação do FRP em relação ao eixo da viga a reforçar pode apresentar vários valores (ver exemplos na Figura 2.7 do Capítulo 2). Na Tabela 4.3 apresenta-se a distribuição das 594 vigas em função do tipo de distribuição do reforço (discreto *vs* contínuo) e da inclinação do FRP. A orientação do FRP (em relação ao eixo da

viga) foi dividida em três grupos: 90°, 45° e ângulos diferentes de 90° e 45°, sendo que estes casos estão identificados com “≠” (25°, 73°).

Tabela 4.3 – Número de vigas de acordo com o tipo de distribuição, em função da configuração ou da inclinação do reforço.

Tipo de distribuição	N.º de vigas	Tipo de configuração			Inclinação		
		S	U	O	90°	45°	≠
Discreto	274	74	138	62	231	39	4
Contínuo	320	106	146	68	259	53	8
Total	594	180	284	130	490	92	12

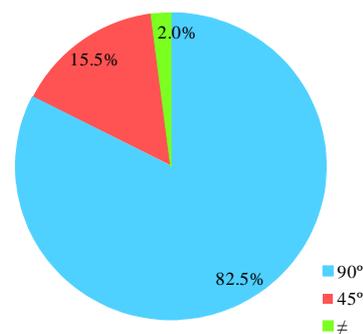
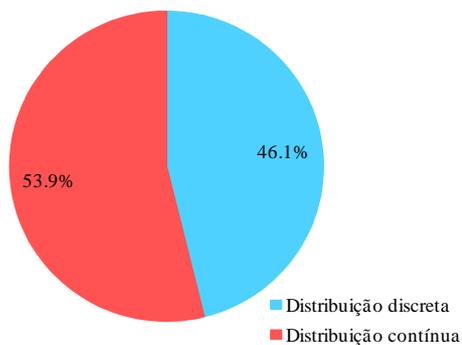


Figura 4.3 – Distribuição das vigas reforçadas através da técnica EBR com compósitos FRP, de acordo com o tipo de distribuição do reforço e da orientação do FRP.

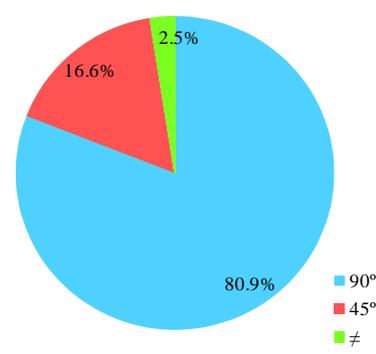
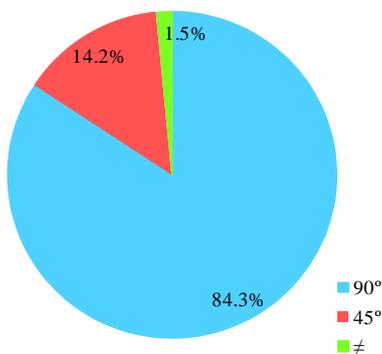


Figura 4.4 – Orientação dos FRP para o caso do reforço aplicado de forma discreta e para o caso do reforço aplicado de forma contínua.

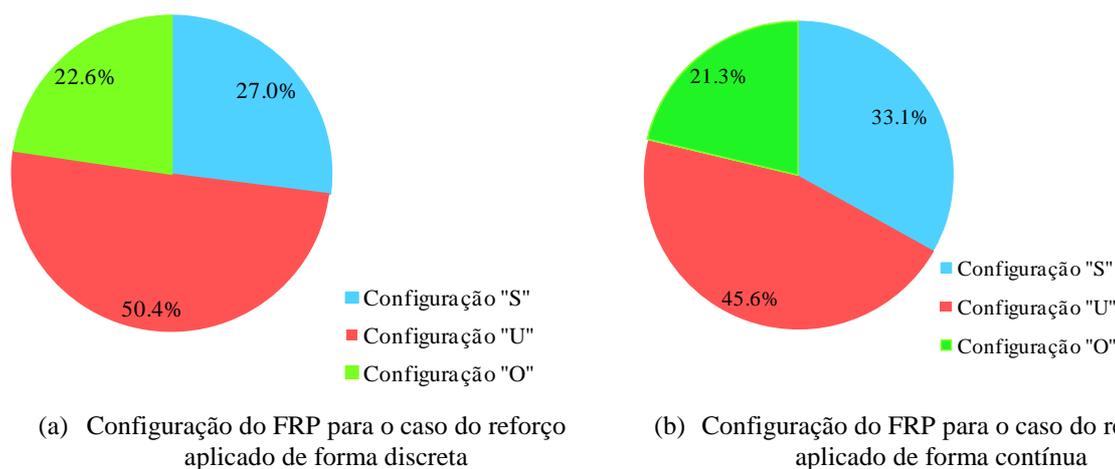


Figura 4.5 – Configuração do FRP para o caso do reforço aplicado de forma discreta e para o caso do reforço aplicado de forma contínua.

De acordo com os dados da Tabela 4.3, da Figura 4.3 (a) e da Figura 4.4 (a), o reforço aplicado de forma discreta foi a solução adotada em 274 vigas (46.1% do total de vigas): em 231 vigas (84.3% dos casos) o reforço foi aplicado com a orientação das fibras a 90° relativamente ao eixo da viga; em 39 vigas (14.2% dos casos) o reforço foi aplicado com a orientação a 45°; em 4 vigas (1.5% dos casos) o reforço foi aplicado com uma orientação de diferente de 90° e 45°. Tal como representado na Figura 4.5 (a), o reforço discreto de FRP foi aplicado em forma de “S” em 74 vigas (27.0% dos casos), em forma de “U” em 138 vigas (50.4% dos casos) e em forma de “O” em 62 vigas (22.6% dos casos).

De acordo com os dados da Tabela 4.3, da Figura 4.3 (a) e da Figura 4.4 (b), o reforço aplicado de forma contínua foi a solução adotada em 320 vigas (53.9% do total de vigas): em 259 vigas (80.9% dos casos) o reforço foi aplicado com a orientação das fibras a 90° relativamente ao eixo da viga; em 53 vigas (16.6% dos casos) o reforço foi aplicado com a orientação a 45°; em 8 vigas (2.5% dos casos) o reforço foi aplicado com uma orientação diferente de 90° e 45°. Tal como representado na Figura 4.5 (b), o reforço contínuo de FRP foi aplicado em forma de “S” em 106 vigas (33.1% dos casos), em forma de “U” em 146 vigas (45.6% dos casos) e em forma de “O” em 68 vigas (21.3% dos casos).

Em termos de orientação do FRP, independentemente do reforço ser aplicado de forma discreta ou contínua (Figura 4.3 (b)) verifica-se que das 594 vigas, em 490 vigas (82.5% dos casos) o reforço foi aplicado perpendicularmente ao eixo da viga (orientação do FRP a 90°), em 92 vigas (15.5% dos casos) o reforço foi aplicado com uma orientação de 45° enquanto

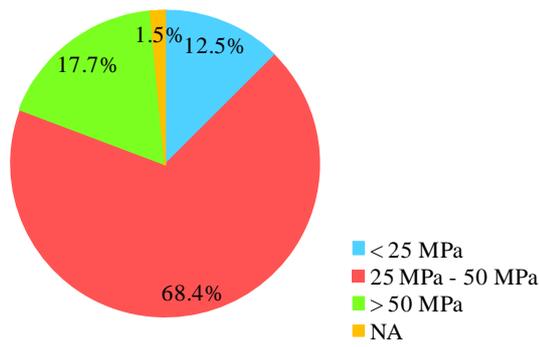
que em 12 vigas (2.0% dos casos) o reforço foi aplicado com uma orientação diferente de 90° e de 45° (25° e 73°).

Além dos parâmetros anteriormente referidos, na Tabela 4.4 apresenta-se a distribuição das vigas em análise tendo em conta outros parâmetros que interferem no desempenho de uma viga de betão armado reforçada ao corte com compósitos de FRP. Estes parâmetros são:

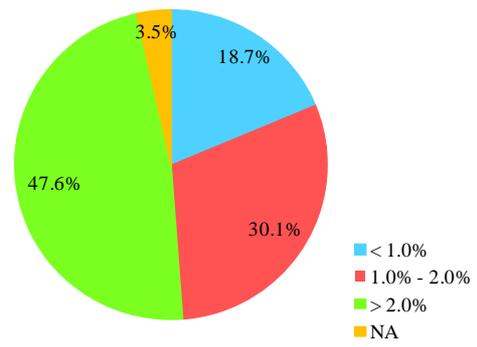
- O valor médio da tensão de rotura do betão à compressão, f_{cm} ;
- A percentagem de armadura longitudinal, ρ_{sl} ;
- A percentagem de armadura transversal, ρ_{sw} ;
- A percentagem de reforço de FRP, ρ_f ;
- A relação a/d definida pela razão entre a altura útil, d , e o vão de corte, a .

Tabela 4.4 – Informações gerais sobre as vigas da base de dados com o reforço de FRP aplicado com a técnica EBR.

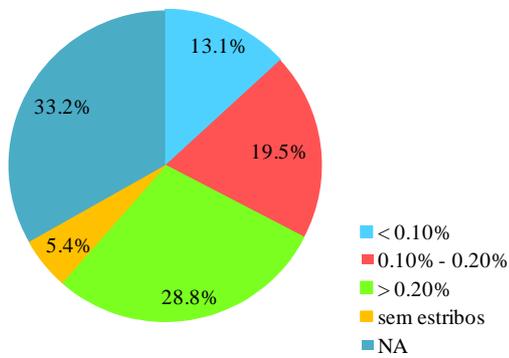
Parâmetro		Número de vigas	Notas
Gama de resistência de betão (f_{cm})	<25 MPa	74	Em 9 vigas não foi possível obter informação relativa a este parâmetro.
	25MPa - 50MPa	406	
	>50MPa	105	
Percentagem de armadura longitudinal (ρ_{sl})	<1.0%	111	Em 21 vigas não foi possível obter informação relativa a este parâmetro.
	1.0% - 2.0%	179	
	> 2.0%	283	
Percentagem de armadura transversal (ρ_{sw})	<0.10%	78	Em 32 vigas (5.4%) não existe armadura transversal. Em 197 vigas não foi possível obter informação para a quantificação deste parâmetro.
	0.10% - 0.20%	116	
	>0.20%	171	
Percentagem de reforço (ρ_f)	<0.10%	164	Em 6 vigas não foi possível obter informação para a quantificação deste parâmetro.
	0.10% - 0.20%	122	
	>0.20%	302	
Razão a/d	<2.5	159	Em 21 vigas não foi possível obter informação para este parâmetro.
	2.5-3.5	338	
	>3.5	76	



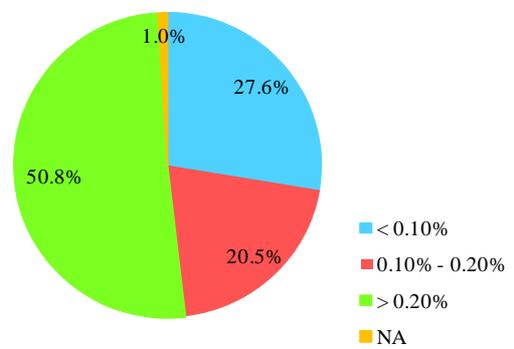
(a) Gama de resistência de betão



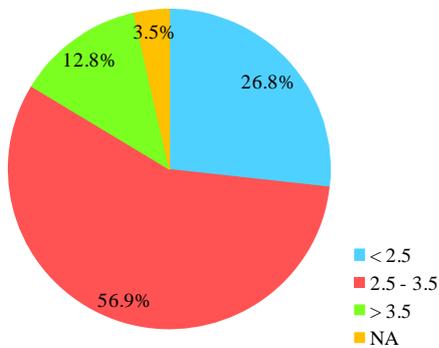
(b) Percentagem de armadura longitudinal



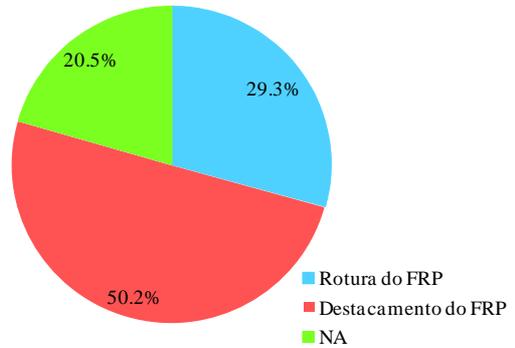
(c) Percentagem de armadura transversal



(d) Percentagem de reforço



(e) Razão a/d



(f) Modos de rotura

Figura 4.6 – Informações gerais das vigas da base de dados reforçadas com a técnica EBR usando compósitos de FRP.

Na Figura 4.6 apresenta-se informação complementar à da Tabela 4.4. Nesta figura, as vigas em que não foi possível obter informação para a quantificação do parâmetro em análise (gama de resistência do betão, percentagem da armadura longitudinal, percentagem de armadura transversal, percentagem de reforço e valor da relação a/d) são representadas por “NA”.

De acordo com os dados da Tabela 4.4 e da Figura 4.6 (a), 68.4% das vigas tinham um betão com f_{cm} entre 25 MPa e 50 MPa, 17.7% das vigas tinham um betão com f_{cm} superior a 50 MPa e 12.5% das vigas tinham um betão com f_{cm} inferior a 25 MPa.

Em termos de percentagem de armadura longitudinal ρ_{sl} (Figura 4.6 (b)), cerca de metade das vigas (47.6%) tinham uma percentagem ρ_{sl} superior a 2.0%, 30.1% das vigas tinham uma percentagem ρ_{sl} compreendida entre 1.0%-2.0% e 18.7% das vigas tinham uma percentagem ρ_{sl} inferior a 1%.

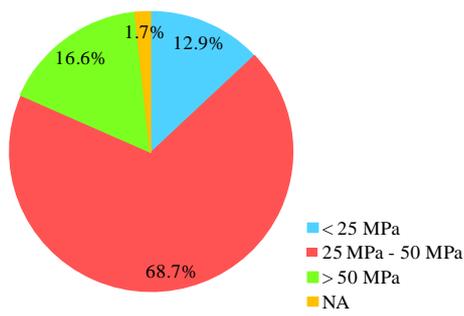
De acordo com os dados da Tabela 4.4 e da Figura 4.6 (c), 32 vigas (5.4%) não continham armadura transversal. Além disso, em 28.8% das vigas a percentagem de armadura transversal ρ_{sw} era superior a 0.2%, em 19.5% das vigas a percentagem ρ_{sw} estava compreendida entre 0.1%-0.2% e em 13.1% das vigas a percentagem ρ_{sw} era inferior a 0.1%.

Das 594 vigas reforçadas ao corte com FRP colado externamente verifica-se que em 164 vigas (27.6% dos casos) a percentagem de reforço (ρ_f) era inferior a 0.10%, em 122 vigas (20.5% dos casos) o valor de ρ_f estava compreendido entre 0.10 e 0.20% e em 302 vigas (50.8% dos casos) o valor de ρ_f era superior a 0.20%.

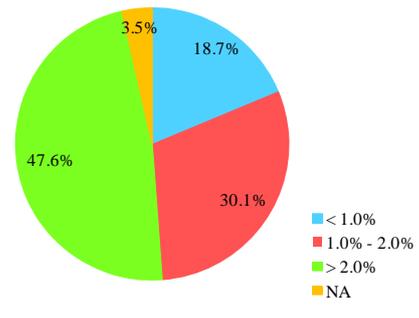
Em termos da relação a/d verifica-se que 159 vigas (26.8%) tinham um valor de a/d menor que 2.5, em 338 vigas (56.9%) a relação a/d estava compreendida entre 2.5 e 3.5 e em 76 vigas (12.8%) a relação a/d era superior a 3.5.

Em termos do modo de rotura verifica-se que em 174 vigas (29.3%) ocorreu a rotura do FRP, enquanto em 298 vigas (50.2%) o modo de rotura foi o destacamento do FRP.

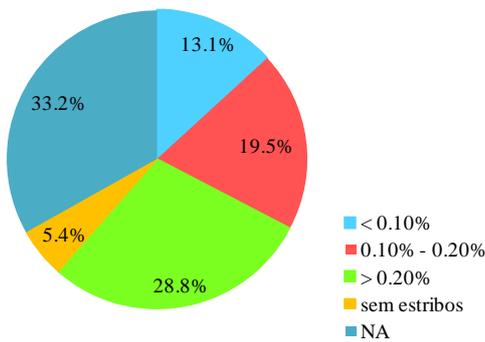
Após esta apresentação genérica das vigas que fazem parte da atual base de dados com resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de FRP, a análise da base de dados será centrada nos compósitos de CFRP (87.2% das vigas da base de dados foram reforçadas com CFRP).



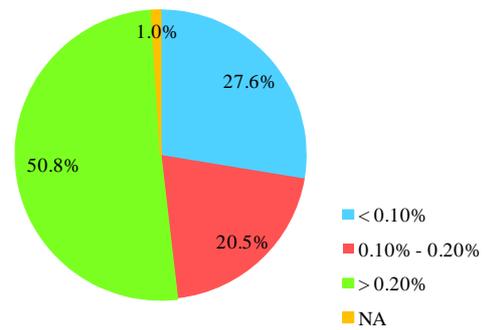
(a) Gama de resistência de betão



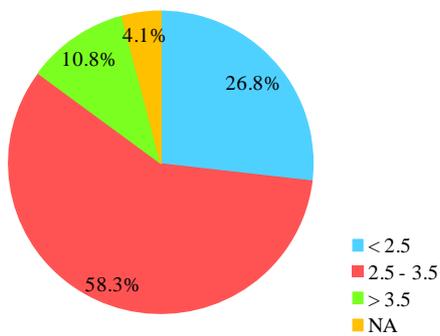
(b) Percentagem de armadura longitudinal



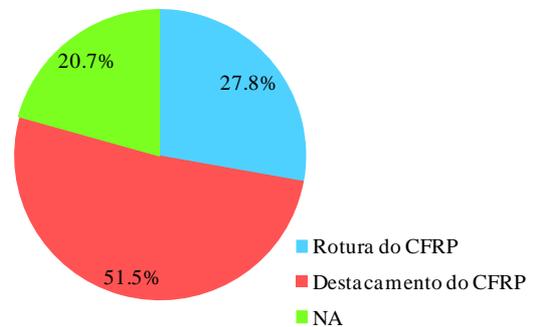
(c) Percentagem de armadura transversal



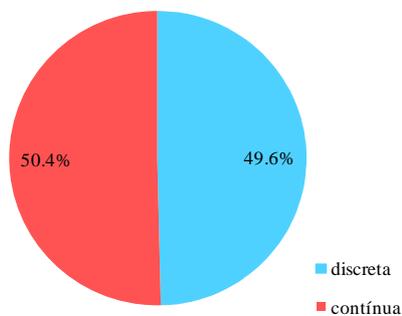
(d) Percentagem de reforço



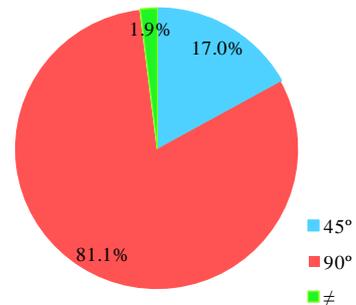
(e) Razão a/d



(f) Modos de rotura



(g) Tipo de distribuição do reforço



(h) Diferentes orientações do reforço

Figura 4.7 – Informações gerais das vigas da base de dados reforçadas com a técnica EBR usando compósitos de CFRP.

Na Figura 4.7 apresentam-se elementos que caracterizam as vigas da base de dados reforçadas ao corte com CFRP aplicado com a técnica EBR. A análise desta figura permite verificar que:

- Em cerca de 50% das vigas reforçadas, o CFRP foi aplicado em forma de U (em 32.2% das vigas o reforço foi aplicado em forma de S enquanto o reforço de CFRP foi aplicado em forma de O em 18% dos casos) - ver Figura 4.2 (c);
- Mais de três quartos das vigas (81%) tinham secção transversal retangular (R) - ver Figura 4.2 (c);
- Em metade das vigas o reforço foi aplicado de forma discreta enquanto que na outra metade o reforço foi aplicado de forma contínua - ver Figura 4.7 (g);
- Independentemente do reforço ser aplicado de forma discreta ou contínua, a orientação do reforço de CFRP mais testada foi a de 90° (cerca de 80% das vigas) - ver Figura 4.7 (h);
- Cerca de dois terços das vigas tinham um betão com f_{cm} , compreendido entre 25 MPa e 50 MPa, enquanto que em 13% das vigas o betão era de fraca resistência ($f_{cm} < 25$ MPa) - ver Figura 4.7 (a);
- De um modo geral as vigas tinham valores da percentagem de armadura longitudinal elevados, verificando-se que em cerca de 50% das vigas essa percentagem era superior a 2% - ver Figura 4.7 (b);
- A maior parte das vigas testadas continham uma percentagem de armadura transversal, sendo que em cerca de 30% do total das vigas essa percentagem era superior a 0.2% - ver Figura 4.7 (c);
- Em termos de percentagem de reforço, metade das vigas apresentam valores superiores a 0.20% - ver Figura 4.7 (d);
- Na maior parte das vigas testadas com CFRP, a relação a/d tinham valores compreendidos entre 2.5 e 3.5 (58.3%) enquanto que em 26.8% das vigas testadas com CFRP a referida relação era inferior a 2.5.
- Verifica-se que o modo de rotura predominante é o destacamento do CFRP, com cerca de 50% - ver Figura 4.7 (f).

4.2.2 Exemplo da introdução na DABASUM de uma viga de betão armado reforçada ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica EBR

As 594 vigas que anteriormente foram apresentadas estão introduzidas na DABASUM. Nesta secção é apresentada, a título de exemplo, a forma como é introduzida na DABASUM uma

viga de betão armado reforçada ao corte com compósitos de CFRP aplicados de acordo com a técnica EBR. A viga escolhida foi a viga 2S-7M(1) (Figura 4.8) do programa experimental efetuado por Dias e Barros (2012_a).

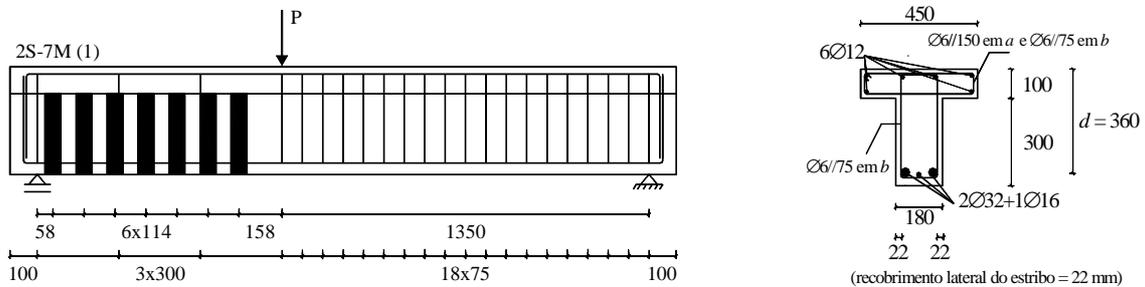


Figura 4.8 – Características geométricas da viga 2S-7M(1) ensaiada por Dias e Barros (2012_a).

DABASUM

DATABASE FOR FRP-BASED SHEAR STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS. (UNIVERSITY OF MINHO)

home chart **insert** edit forum search about Carla | Logout

Insert

(a)

Click on links below to navigate in restrict area.

- Insert a new Experimental Program**
- Insert a new Specimen
- Generate a chart of results of database

DABASUM

DATABASE FOR FRP-BASED SHEAR STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS. (UNIVERSITY OF MINHO)

home chart insert edit forum search about Carla | Logout

Register a new Experimental Program:

Fill up the form below to insert a new Experimental Program.

(b)

Name of Experimental Program?: *

Reference of Publication?: *

Link to Publication on Internet: *

Is this Publication the Original Source: *

Comments about the Experimental Program:

(*) Required field.

Figura 4.9 – Parâmetros que identificam o programa experimental onde se insere a viga a introduzir na DABASUM (DABASUM, 2013).

home chart insert edit forum search about

Register a new Specimen:

Give a name to the Specimen, choose the Experimental Program and fill the form below to insert a new Specimen.

Specimen as named by author: *

Experimental Program:

Geometry | Cross Section | Concrete | Flexural - Steel | Steel Stirrups | Flexural Strengthening | Shear Strengthening | Experimental Results

Fill the following fields about the longitudinal geometry of the specimen and loading conditions:

Description	Symbol	Value	Units	Valid Range	Help Image
Number of spans:	nos	<input type="text" value="1"/>		[1;2]	
Number of loads:		<input type="text" value="1"/>		[1;2]	
Entire length of specimen:	L_{tot}	<input type="text" value="2450"/>	(mm)	[500;nos*10000]	
Distance between supports:	L	<input type="text" value="2250"/>	(mm)	[500;10000]	
Shear span:	a	<input type="text" value="900"/>	(mm)	[15;5000]	
Distance between loads:	b	<input type="text"/>	(mm)	[0;4000]	

(*) Required field.
(?) Additional help.

Figura 4.10 – Parâmetros que caracterizam a geometria da viga (DABASUM, 2013).

(a)

Geometry | **Cross Section** | Concrete | Flexural - Steel | Steel Stirrups | Flexural Strengthening | Shear Strengthening | Experimental Results

Fill the following fields about the geometry characteristics of the specimen's cross section:

Shape of cross section: *

(*) Required field.
(?) Additional help.

(b)

Geometry | **Cross Section** | Concrete | Flexural - Steel | Steel Stirrups | Flexural Strengthening | Shear Strengthening | Experimental Results

Fill the following fields about the geometry characteristics of the specimen's cross section:

Shape of cross section: *

Description	Symbol	Value	Units	Valid Range	Help Image
Width of top flange:	b_{tz}	<input type="text" value="450"/>	(mm)	[20;2000]	
Thickness of top flange:	h_{tz}	<input type="text" value="100"/>	(mm)	[20;500]	
Width of the web:	b_w	<input type="text" value="180"/>	(mm) *	[20;2000]	
Total depth:	h	<input type="text" value="400"/>	(mm) *	[50;2000]	
Depth of the web:	h_w	<input type="text" value="300"/>	(mm) *	[50;2000]	
Concrete clear cover:	c	<input type="text" value="22"/>	(mm)	[8;150]	

(*) Required field.
(?) Additional help.

Figura 4.11 – Parâmetros que caracterizam a secção transversal da viga (DABASUM, 2013).

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
Fill the following fields about the concrete data:							
Description	Symbol	Value	Units	Valid Range			
Mean value of concrete cylinder compressive strength:	f_{cm}	<input type="text" value="39.7"/>	(MPa)	[5;100]			
Specified compressive strength of concrete (ACI):?	f_c'	<input type="text" value="31.545"/>	(MPa)	[5;100]			
Characteristic compressive cylinder strength of concrete:?	f_{ck}	<input type="text" value="31.7"/>	(MPa)	[5;100]			
Mean value of axial tensile strength of concrete:?	f_{ctm}	<input type="text" value="3"/>	(MPa)	[0.5;10]			
Secant modulus of elasticity of concrete:?	E_{cm}	<input type="text" value="33270"/>	(MPa)	[15000;50000]			
(★) Required field. (?) Additional help.							

Figura 4.12 – Parâmetros que caracterizam o betão da viga (DABASUM, 2013).

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
Fill the following fields of the arrangement of longitudinal tensile steel bars:							
Description	Symbol	Value	Units	Valid Range	Help Image		
Modulus of elasticity:	$E_{s,l}$	<input type="text" value="200000"/>	(MPa)	$[150;250] \times 10^3$	<p>3φ12 (layer 1) 2φ10 (layer 2)</p> <p>$d_{s,L1}$ $d_{s,L2}$ d_s</p> <p>3φ12 (layer 1: in this case $n_{s,L1} = 3$ and $\phi_{s,L1} = 12$ mm) 2φ10 (layer 2: in this case $n_{s,L2} = 2$ and $\phi_{s,L2} = 10$ mm)</p> <p>$\phi_{sw,v}$ d_s h</p> <p>c $\phi_{s,l}$</p> <p>$d_s = h - c - \phi_{sw,v} - \phi_{s,l}/2$ $\phi_{sw,v}$ - diameter of stirrups bars $\phi_{s,l}$ - diameter of longitudinal bars</p>		
Yield tensile stress:	$f_{sy,l}$	<input type="text" value="447"/>	(MPa)	[150;2000]			
Tensile strength:	$f_{su,l}$	<input type="text" value="566"/>	(MPa)	[150;2000]			
Depth of the layer 1 bars:	$d_{s,L1}$	<input type="text"/>	(mm)	[50;2000]			
Number of bars on the layer 1:	$n_{s,L1}$	<input type="text" value="3"/>		[0;19]			
Diameter of the bars on the layer 1:	$\phi_{s,L1}$	<input type="text" value="32"/>	(mm)	[6;50]			
Depth of the layer 2 bars:	$d_{s,L2}$	<input type="text"/>	(mm)	[50;2000]			
Number of bars on the layer 2:	$n_{s,L2}$	<input type="text" value="2"/>		[0;19]			
Diameter of the bars on the layer 2:	$\phi_{s,L2}$	<input type="text" value="16"/>	(mm)	[6;50]			
Depth:?	d_s	<input type="text" value="360"/>	(mm)	[50;2000]			
Cross sectional area:?	$A_{s,l}$	<input type="text" value="1810"/>	(mm ²)	[50;20000]			
Reinforcement ratio:?	$\rho_{s,l}$	<input type="text" value="0.028"/>		$[1;100] \times 10^{-3}$			
(★) Required field. (?) Additional help.							

Figura 4.13 – Parâmetros que caracterizam as armaduras longitudinais da viga (DABASUM, 2013).

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
Fill the following fields of the arrangement of steel stirrups:							
Description	Symbol	Value	Units	Valid Range	Help Image		
Modulus of elasticity:	$E_{s,wv}$	<input type="text" value="200000"/>	(MPa)	$[150;250] \times 10^3$	<p>$\phi_{sw,v}$ F $\phi_{s,w,v}$</p> <p>$S_{sw,v}$ h</p> <p>In this case $n_{sw,v} = 2$</p>		
Yield tensile stress:	$f_{sy,wv}$	<input type="text" value="542"/>	(MPa)	[150;2000]			
Tensile strength:	$f_{su,wv}$	<input type="text" value="594"/>	(MPa)	[150;2000]			
Number of legs per each stirrup:	$n_{sw,v}$	<input type="text" value="2"/>		[0;4]			
Diameter:	$\phi_{sw,v}$	<input type="text" value="6"/>	(mm)	[6;20]			
Spacing:	$S_{sw,v}$	<input type="text" value="300"/>	(mm)	[25;1000]			
Cross sectional area per each stirrup:?	$A_{sw,v}$	<input type="text" value="57"/>	(mm ²)	[0;500]			
Shear reinforcement ratio:?	$\rho_{sw,v}$	<input type="text" value="0.00105"/>		$[0;10] \times 10^{-3}$			
(★) Required field. (?) Additional help.							

Figura 4.14 – Parâmetros que caracterizam as armaduras transversais da viga (DABASUM, 2013).

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
----------	---------------	----------	------------------	----------------	------------------------	---------------------	----------------------

Fill the following fields of the arrangement of FRP systems for the shear strengthening:

Shear strengthening technique: *

-
-
-

a) Escolha da técnica de reforço ao corte.

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
----------	---------------	----------	------------------	----------------	------------------------	---------------------	----------------------

Fill the following fields of the arrangement of FRP systems for the shear strengthening:

Shear strengthening technique: *

Description	Symbol	Value	Units	Valid Range	Help Image
FRP material type:		<input type="text" value="Carbon"/> *			
Partial safety factor for FRP reinforcement (fib):?	γ_f	<input type="text" value="1.30"/> *			
Shear strength reduction factor (ACI):?	Φ	<input type="text" value="0.75"/> *			
Configuration reduction factor (ACI):?	ψ_f	<input type="text" value="0.85"/> *			
Environmental reduction factor (ACI):?	C_E	<input type="text" value="0.95"/> *			
FRP mechanical properties tested by the author:		<input type="text" value="Yes"/> *			
Partial safety factor for FRP reinforcement (CNR):?	γ_{fd}	<input type="text" value="1.5"/> *			
FRP modulus of elasticity:	$E_{f,w}$	<input type="text" value="218400"/> *	(MPa)	$[5;400] \times 10^3$	
FRP ultimate tensile strain:	$\epsilon_{fu,w}$	<input type="text" value="0.0131"/> *		$[0;1;50] \times 10^{-3}$	
FRP design tensile strength:?	$f_{f,w}$	<input type="text" value="1812.6"/> *	(MPa)	$[50;5000]$	
FRP ultimate tensile strength:	$f_{fu,w}$	<input type="text" value="2882"/> *	(MPa)	$[50;5000]$	
FRP configuration:		<input type="text" value="U"/> *			
Anchorage for the FRP:?	ANC	<input type="text" value="No"/> *			
Bidirectional Fiber system:?		<input type="text" value="No"/> *			
Discrete vs Continuous:	DST	<input type="text" value="Discrete"/> *			
Number of FRP layers:	$n_{f,w}$	<input type="text" value="1"/>		$[0;10]$	
FRP layer thickness:	$t_{f,w}$	<input type="text" value="0.178"/>	(mm)	$[33;5000] \times 10^{-3}$	
FRP shear reinforcement total thickness:	$t_{f,w}$	<input type="text" value="0.178"/> *	(mm)	$[33;5000] \times 10^{-3}$	
Width of FRP strip:	$w_{f,w}$	<input type="text" value="80"/> *	(mm)	$[1;200]$	
Area of FRP shear reinforcement:?	$A_{f,w}$	<input type="text"/>	(mm ²)	$[1;1000]$	
FRP shear reinforcement ratio:?	$\rho_{f,w}$	<input type="text" value="0.00103"/>		$[0;40] \times 10^{-3}$	
Height of bonded reinforcement (vertical projection):	h_f	<input type="text" value="300"/> *	(mm)	$[50;2000]$	
Distance from fibre end to beam top:	d_{ft}	<input type="text" value="100"/> *	(mm)	$[0;2000]$	
Distance from fibre end to beam bottom:	d_{fb}	<input type="text" value="0"/> *	(mm)	$[0;2000]$	
Spacing of FRP shear reinforcement along beam axis:	s_f	<input type="text" value="114"/> *	(mm)	$[1;1000]$	
Angle of FRP shear reinforcement system to beam axis:	β	<input type="text" value="90"/> *	(°)	$[0;90]$	
Corner radius of the section to be wrapped:	r_c	<input type="text" value="20"/> *	(mm)	$[0;200]$	

(*) Required field.
(?) Additional help.

b) Dados relativos ao reforço ao corte de CFRP aplicado com a técnica EBR.

Figura 4.15 – Parâmetros que caracterizam o reforço ao corte com FRP aplicado com a técnica EBR (DABASUM, 2013).

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
Fill the following fields about the results obtained from testing the specimen:							
			Description	Symbol	Value	Units	Valid Range
			Test site:		LAB	*	
			Load cycle:		Monotonic	*	
			Status regarding pre-cracking of specimen:		No	*	
			Shear force at concrete cracking initiation:	V_{cr}		(kN)	[0;1000]
			Maximum shear force of unstrengthened specimen:	V_{u1}	182.28	*	(kN) [0;2000]
			Maximum shear force of strengthened specimen:	V_{u2}	195.06	*	(kN) [0;2000]
			Nominal shear strength provided by FRP shear reinforcement:	$V_{f,exp}$	12.78	*	(kN) [0;1000]
			Gain in shear strength provided by FRP ratio:?		7	(%)	[0;400]
			Failure mode as defined by authors:		Debonding	*	
			FRP global failure mode:		Shear	*	
			Critical shear crack angle:	$\theta_{cr,e}$		(°)]0;90]
			Commentary to failure mode:				
(*) Required field. (?) Additional help.							

Figura 4.16 – Parâmetros relativos aos resultados experimentais da viga 2S-7M(1) (DABASUM, 2013).

4.3 VIGAS REFORÇADAS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE INSERÇÃO

4.3.1 Descrição da base de dados

De acordo com o que foi anteriormente referido, a versão atual da base de dados contém resultados experimentais de 106 vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica NSM. Na Tabela 4.5 apresenta-se informação genérica sobre os trabalhos experimentais associados às referidas 106 vigas.

Na Tabela 4.6 procede-se à divisão das 106 vigas reforçadas ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica NSM em função do tipo de CFRP (varão ou laminado) e do tipo de orientação do CFRP. Neste contexto, por simplificação, atribuem-se símbolos a cada tipo de reforço CFRP :

- “C” refere-se a varões de CFRP;
- “R” refere-se a laminados de CFRP.

Tabela 4.5 – Informação geral dos trabalhos experimentais com as vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica NSM.

Autores	Ano	Número de vigas ensaiadas	Propriedades e parâmetros											
			Geometria				Tipo de viga		Betão e aço			Cenário de reforço		
			Secção rectangular	Secção em T	Vão da viga $L < 2m$	Vão da viga $2m < L < 4m$	Vigas regulares ($a/d > 2$)	Pré-fendilhação	Resistência do betão	Armadura longitudinal	Armadura Transversal	Laminado	Varões	CFRP na vertical
De Lorenzis	2001	6												
Barros	2006	9												
De Lorenzis	2006	7												
Kotynia	2007	8												
Dias	2008	9												
El-Hacha	2009	4												
Gamino	2010	1												
Dias	2011	10												
Rahal	2011	3												
Cisneros	2012	16												
Dias_a	2012	16												
Dias_b	2012	14												
Wiwatrojanagul	2012	3												

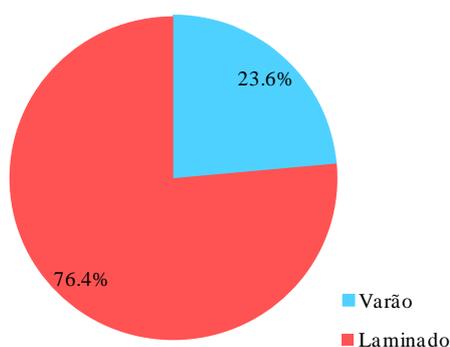
Tabela 4.6 – Distribuição das vigas reforçadas com a técnica NSM, de acordo com o tipo de CFRP e da orientação do CFRP.

Secção do reforço	N.º de vigas	Inclinação		
		45°	60°	90°
C	25	10	0	15
R	81	36	17	28
Total	106	46	17	43

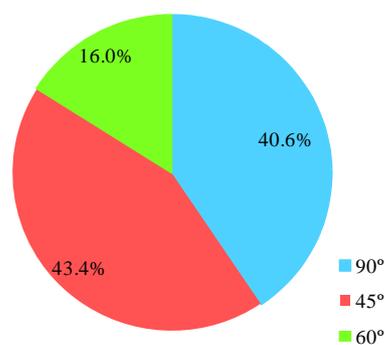
Tendo como base os dados da Tabela 4.6 é possível concluir que o CFRP mais usado no reforço ao corte de vigas de betão armado com a técnica NSM tem sido o laminado de CFRP. Com efeito, tal como representado na Figura 4.17 (a), o reforço com laminados e com varões de CFRP foi aplicado em, respetivamente, 76.4% e 23.6% das vigas reforçadas ao corte com a técnica NSM.

No que diz respeito à orientação do CFRP em relação ao eixo da viga, das 106 vigas reforçadas com a técnica NSM, de acordo com os dados da Tabela 4.6 e da Figura 4.17 (b), em 43.4% dos casos o reforço foi aplicado com uma orientação de 45°, em 40.6% dos casos o reforço foi aplicado com uma orientação de 90° (na vertical) e em 16.0% dos casos a orientação do reforço de CFRP foi de 60°.

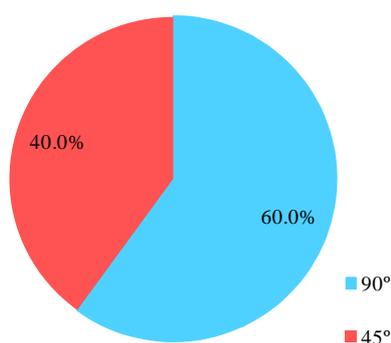
Das 25 vigas reforçadas com varões de CFRP, em 60% dos casos o reforço foi aplicado com uma orientação de 90°, enquanto que nos restantes casos (40%) a orientação do reforço de CFRP adotada foi de 45°. No caso do reforço ao corte com laminados de CFRP inseridos, em 34.6% das vigas testadas o reforço tinha uma inclinação 90°, em 44.4% das vigas testadas o reforço tinha uma inclinação 45° e nos restantes casos (21%) o reforço foi aplicado com orientação de 60°.



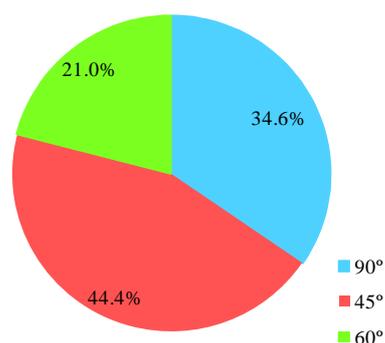
(a) Tipo de secção transversal do reforço



(b) Diferentes orientações do reforço



(c) Diferentes orientações do reforço (varão)



(d) Diferentes orientações do reforço (laminado)

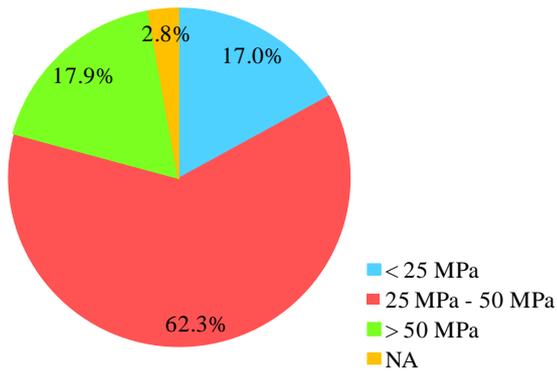
Figura 4.17 – Distribuição das vigas reforçadas com compósitos CFRP aplicados com a técnica NSM, de acordo com o tipo de secção transversal do CFRP e da orientação do reforço.

Além dos parâmetros anteriormente referidos, na Tabela 4.7 apresenta-se a distribuição das vigas em análise tendo em conta os seguintes parâmetros:

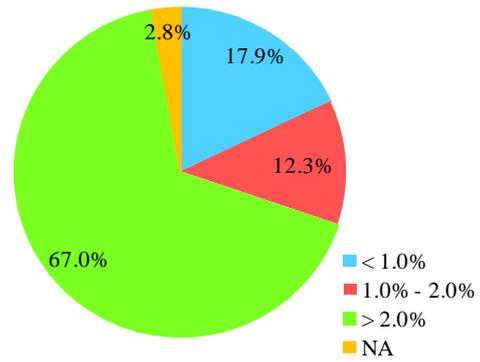
- O valor médio da tensão de rotura do betão à compressão, f_{cm} ;
- A percentagem de armadura longitudinal, ρ_{sl} ;
- A percentagem de armadura transversal, ρ_{sw} ;
- A percentagem de reforço de CFRP, ρ_f ;
- A relação a/d definida pela razão entre a altura útil, d , e o vão de corte, a

Tabela 4.7 – Informações gerais das vigas reforçadas pela técnica NSM, na base de dados.

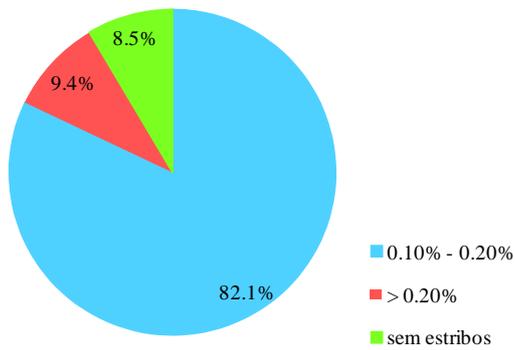
Parâmetro		Número de vigas	Notas
Gama de resistência de betão (f_{cm})	<25 MPa	18	Em 3 vigas não é possível a quantificação deste parâmetro.
	25MPa - 50MPa	66	
	>50MPa	19	
Percentagem de armadura longitudinal (ρ_{sl})	<1.0%	19	Em 3 vigas não é possível a quantificação deste parâmetro.
	1.0% - 2.0%	13	
	> 2.0%	71	
Percentagem de armadura transversal (ρ_{sw})	<0.10%	0	Em 9 vigas (6.6%) não existe armadura transversal.
	0.10% - 0.20%	87	
	>0.20%	10	
Percentagem de reforço (ρ_f)	<0.10%	29	-
	0.10%-0.20%	32	
	>0.20%	45	
Razão a/d	<2.5	9	-
	2.5-3.5	97	
	>3.5	0	



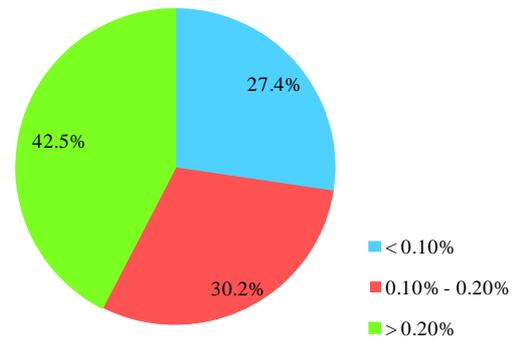
(a) Gama de resistência de betão



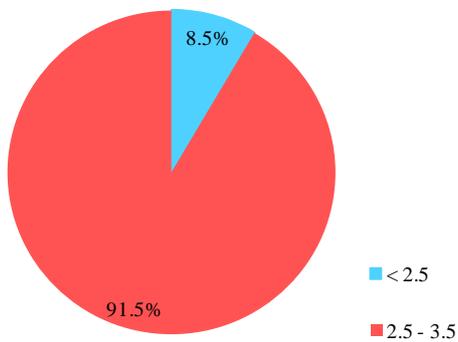
(b) Percentagem de armadura longitudinal



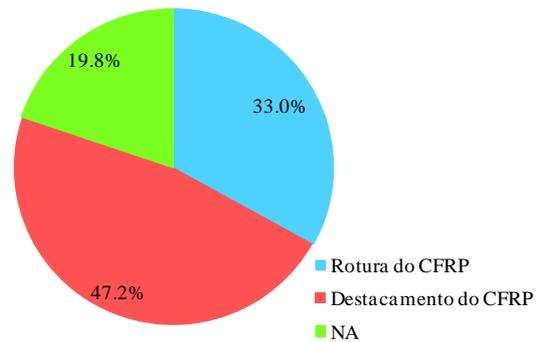
(c) Percentagem de armadura transversal



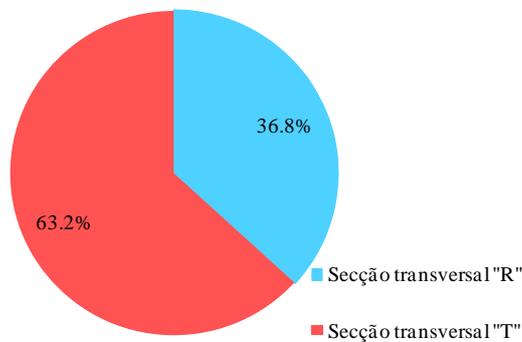
(d) Percentagem de reforço



(e) Razão a/d



(f) Diferentes modos de rotura



(g) Tipo de Secção transversal

Figura 4.18 – Informações gerais das vigas da base de dados reforçadas com a técnica NSM, na base de dados.

De acordo com os dados da Tabela 4.7 e da Figura 4.18 (a), 62.3% das vigas tinham um betão com f_{cm} entre os 25 MPa e 50 MPa, 17.9% das vigas tinham um betão com f_{cm} superior a 50 MPa e 17.0% das vigas tinham um betão com f_{cm} inferior a 25 MPa.

Em termos de percentagem de armadura longitudinal ρ_{sl} (Figura 4.18 (b)), cerca de dois terços das vigas (67%) tinham uma percentagem ρ_{sl} superior a 2.0%, 12.3% das vigas tinham uma percentagem ρ_{sl} compreendida entre 1.0%-2.0% e 17.9% das vigas tinham uma percentagem ρ_{sl} inferior a 1%.

De acordo com os dados da Tabela 4.7 e da Figura 4.18 (c) existe um reduzido número de vigas que não continham armadura transversal (9 vigas a que corresponde 6.6% dos casos). Além disso, em 9.4% das vigas a percentagem de armadura transversal (ρ_{sw}) era superior a 0.2% e em 82.1% das vigas a percentagem ρ_{sw} estava compreendida entre 0.1%-0.2%.

Das 106 vigas reforçadas ao corte com compósitos de CFRP inseridos, verifica-se (Figura 4.18 (d)) que em 29 (27.4% dos casos) vigas a percentagem de reforço (ρ_{fw}) era inferior a 0.10%, em 32 vigas (30.2% dos casos) o valor de ρ_f estava compreendido entre 0.10 e 0.20% e que em 45 vigas (42.5% dos casos) o valor de ρ_f era superior a 0.20%.

Em termos da relação a/d (Figura 4.18 (e)) verifica-se que 8.5% das vigas tinham $a/d < 2.5$ enquanto que as restantes vigas (91.5%) se caracterizavam por ter um valor de a/d compreendido entre 2.5 e 3.5.

Nos modos de rotura é possível diferenciar dois casos distintos: rotura do CFRP ou destacamento do CFRP. Em cerca de 50% das vigas, o modo de rotura foi o destacamento do CFRP (Figura 4.18 (f)).

Como informação final refira-se que em termos de de secção transversal das vigas, 36.8% das vigas tinham secção transversal retangular e 63.2% das vigas tinham secção transversal em “T” (Figura 4.18 (g)).

4.3.2 Exemplo da introdução na DABASUM de uma viga de betão armado reforçada ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica NSM

As 106 vigas que foram apresentadas na secção anterior estão introduzidas na DABASUM. Nesta secção é apresentada, a título de exemplo, a forma como é introduzida na DABASUM uma viga de betão armado reforçada ao corte com compósitos de CFRP aplicados de acordo

com a técnica NSM. A viga escolhida foi a viga 2S-7LV (Figura 4.19) do programa experimental efetuado por Dias e Barros (2012_a).

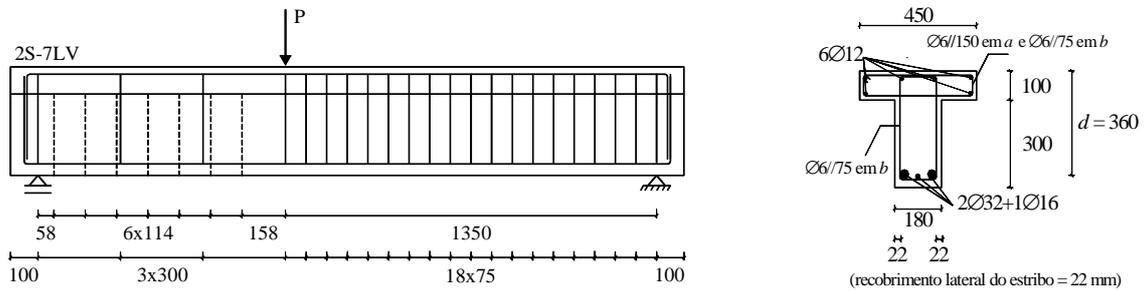
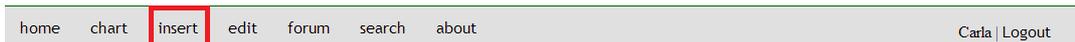


Figura 4.19 – Características geométricas da viga 2S-7LV ensaiada por Dias e Barros (2012_a).

DABASUM

DATABASE FOR FRP-BASED SHEAR STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS. (UNIVERSITY OF MINHO)



(a) Insert

Click on links below to navigate in restrict area.

- Insert a new Experimental Program**
- Insert a new Specimen
- Generate a chart of results of database

DABASUM

DATABASE FOR FRP-BASED SHEAR STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS. (UNIVERSITY OF MINHO)



Register a new Experimental Program:

(b)

Fill up the form below to insert a new Experimental Program.

Name of Experimental Program: *

Reference of Publication: *

Link to Publication on Internet: *

Is this Publication the Original Source: *

Comments about the Experimental Program:

(*) Required field.

Figura 4. 20 – Parâmetros que identificam o programa experimental onde se insere a viga a introduzir na DABASUM (DABASUM, 2013).

Register a new Specimen:

Give a name to the Specimen, choose the Experimental Program and fill the form below to insert a new Specimen.

Specimen as named by author: ★

Experimental Program:

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
----------	---------------	----------	------------------	----------------	------------------------	---------------------	----------------------

Fill the following fields about the longitudinal geometry of the specimen and loading conditions:

Description	Symbol	Value	Units	Valid Range	Help Image
Number of spans:	nos	<input type="text" value="1"/>		[1;2]	
Number of loads:		<input type="text" value="1"/>		[1;2]	
Entire length of specimen:	L_{tot}	<input type="text" value="2650"/>	(mm)	[500;nos*10000]	
Distance between supports:	L	<input type="text" value="2250"/>	(mm)	[500;10000]	
Shear span:	a	<input type="text" value="900"/>	(mm)	[15;5000]	
Distance between loads:	b	<input type="text"/>	(mm)	[0;4000]	

(★) Required field.
(?) Additional help.

Figura 4.21 – Parâmetros que caracterizam a geometria da viga (DABASUM, 2013).

(a)

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
----------	---------------	----------	------------------	----------------	------------------------	---------------------	----------------------

Fill the following fields about the geometry characteristics of the specimen's cross section:

Shape of cross section: ★

- choose
- R
- T**
- I

(★) Required field.
(?) Additional help.

(b)

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
----------	---------------	----------	------------------	----------------	------------------------	---------------------	----------------------

Fill the following fields about the geometry characteristics of the specimen's cross section:

Shape of cross section: ★

Description	Symbol	Value	Units	Valid Range	Help Image
Width of top flange:	b_{ts}	<input type="text" value="450"/>	(mm)	[20;2000]	
Thickness of top flange:	h_{ts}	<input type="text" value="100"/>	(mm)	[20;500]	
Width of the web:	b_w	<input type="text" value="180"/>	★ (mm)	[20;2000]	
Total depth:	h	<input type="text" value="400"/>	★ (mm)	[50;2000]	
Depth of the web:	h_w	<input type="text" value="300"/>	★ (mm)	[50;2000]	
Concrete clear cover:	c	<input type="text" value="22"/>	(mm)	[8;150]	

(★) Required field.
(?) Additional help.

Figura 4.22 – Parâmetros que caracterizam a secção transversal da viga (DABASUM, 2013).

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
Fill the following fields about the concrete data:							
Description	Symbol	Value	Units	Valid Range			
Mean value of concrete cylinder compressive strength:	f_{cm}	<input type="text" value="39.7"/>	(MPa)	[5;100]			
Specified compressive strength of concrete (ACI):?	f'_c	<input type="text" value="31.545"/>	(MPa)	[5;100]			
Characteristic compressive cylinder strength of concrete:?	f_{ck}	<input type="text" value="31.7"/>	(MPa)	[5;100]			
Mean value of axial tensile strength of concrete:?	f_{ctm}	<input type="text" value="3"/>	(MPa)	[0.5;10]			
Secant modulus of elasticity of concrete:?	E_{cm}	<input type="text" value="33270"/>	(MPa)	[15000;50000]			
(★) Required field. (?) Additional help.							

Figura 4.23 - Parâmetros que caracterizam o betão da viga (DABASUM, 2013).

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
Description	Symbol	Value	Units	Valid Range	Help Image		
Modulus of elasticity:	$E_{s,l}$	<input type="text" value="200000.000"/>	(MPa)	[150;250]x10 ³	<p>3φ12 (layer 1): in this case $n_{s,L1} = 3$ and $\phi_{s,L1} = 12$ mm 2φ10 (layer 2): in this case $n_{s,L2} = 2$ and $\phi_{s,L2} = 10$ mm</p> <p>$d_s = h - c - \phi_{sw,v} - \phi_{s,L}/2$ $\phi_{sw,v}$ - diameter of stirrups bars $\phi_{s,L}$ - diameter of longitudinal bars</p>		
Yield tensile stress:	$f_{sy,l}$	<input type="text" value="447.000"/>	(MPa)	[150;2000]			
Tensile strength:	$f_{su,l}$	<input type="text" value="566.000"/>	(MPa)	[150;2000]			
Depth of the layer 1 bars:	$d_{s,L1}$	<input type="text"/>	(mm)	[50;2000]			
Number of bars on the layer 1:	$n_{s,L1}$	<input type="text" value="2"/>		[0;19]			
Diameter of the bars on the layer 1:	$\phi_{s,L1}$	<input type="text" value="32.000"/>	(mm)	[6;50]			
Depth of the layer 2 bars:	$d_{s,L2}$	<input type="text"/>	(mm)	[50;2000]			
Number of bars on the layer 2:	$n_{s,L2}$	<input type="text" value="1"/>		[0;19]			
Diameter of the bars on the layer 2:	$\phi_{s,L2}$	<input type="text" value="16.000"/>	(mm)	[6;50]			
Depth:?	d_s	<input type="text" value="360.000"/>	(mm)	[50;2000]			
Cross sectional area:?	$A_{s,l}$	<input type="text" value="1810.000"/>	(mm ²)	[50;20000]			
Reinforcement ratio:?	$\rho_{s,l}$	<input type="text" value="0.028000"/>		[1;100]x10 ⁻³			
(★) Required field. (?) Additional help.							

Figura 4.24 – Parâmetros que caracterizam as armaduras longitudinais da viga (DABASUM, 2013).

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
Fill the following fields of the arrangement of steel stirrups:							
Description	Symbol	Value	Units	Valid Range	Help Image		
Modulus of elasticity:	$E_{s,sv}$	<input type="text" value="200000"/>	(MPa)	[150;250]x10 ³	<p>In this case $n_{sw,v} = 2$</p>		
Yield tensile stress:	$f_{sy,sv}$	<input type="text" value="542"/>	(MPa)	[150;2000]			
Tensile strength:	$f_{su,sv}$	<input type="text" value="594"/>	(MPa)	[150;2000]			
Number of legs per each stirrup:	$n_{sw,v}$	<input type="text" value="2"/>		[0;4]			
Diameter:	$\phi_{sw,v}$	<input type="text" value="6"/>	(mm)	[6;20]			
Spacing:	$S_{sw,v}$	<input type="text" value="300"/>	(mm)	[25;1000]			
Cross sectional area per each stirrup:?	$A_{sw,v}$	<input type="text" value="57"/>	(mm ²)	[0;500]			
Shear reinforcement ratio:?	$\rho_{sw,v}$	<input type="text" value="0.00105"/>		[0;10]x10 ⁻³			
(★) Required field. (?) Additional help.							

Figura 4.25 – Parâmetros que caracterizam as armaduras transversais da viga (DABASUM, 2013).

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
Fill the following fields of the arrangement of FRP systems for the shear strengthening:							
Shear strengthening technique: choose ★							
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> choose EBR NSM </div>							

a) Escolha da técnica de reforço ao corte.

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results																																																																																																																																	
Fill the following fields of the arrangement of FRP systems for the shear strengthening:																																																																																																																																								
Shear strengthening technique: NSM ★																																																																																																																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Description</th> <th>Symbol</th> <th>Value</th> <th>Units</th> <th>Valid Range</th> <th>Help Image</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FRP material type:</td> <td></td> <td>Carbon ★</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Partial safety factor for FRP reinforcement (fib):</td> <td>γ_f</td> <td>1.30</td> <td></td> <td></td> <td rowspan="10"> <p>FRP Bonded into grooves by epoxy adhesive</p> <p>Section A-A (laminates or bar)</p> <p>Width of the FRP laminate (v_f) or diameter of the FRP bar (d_f)</p> <p>Epoxy adhesive</p> <p>FRP</p> <p>c_f - FRP clear cover</p> </td> </tr> <tr> <td>Shear strength reduction factor (ACI):</td> <td>Φ</td> <td>0.75</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Configuration reduction factor (ACI):</td> <td>ψ_f</td> <td>0.85</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Environmental reduction factor (ACI):</td> <td>C_E</td> <td>0.95</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FRP mechanical properties tested by the author:</td> <td></td> <td>Yes</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Partial safety factor for FRP reinforcement (CNR):</td> <td>γ_{fd}</td> <td>1.5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FRP modulus of elasticity:</td> <td>$E_{f,w}$</td> <td>170900 ★</td> <td>(MPa)</td> <td>$[5;400] \times 10^3$</td> </tr> <tr> <td>FRP ultimate tensile strain:</td> <td>$\epsilon_{fu,w}$</td> <td>0.016 ★</td> <td></td> <td>$[0.1;50] \times 10^{-3}$</td> </tr> <tr> <td>FRP design tensile strength:</td> <td>$f_{f,w}$</td> <td>2741.7</td> <td>(MPa)</td> <td>$[50;5000]$</td> </tr> <tr> <td>FRP ultimate tensile strength:</td> <td>$f_{fu,w}$</td> <td>2741.7 ★</td> <td>(MPa)</td> <td>$[50;5000]$</td> </tr> <tr> <td>Groove depth:</td> <td>a_g</td> <td>13.5 ★</td> <td>(mm)</td> <td>$[1;300]$</td> </tr> <tr> <td>Groove thickness:</td> <td>b_g</td> <td>4.5 ★</td> <td>(mm)</td> <td>$[3;40]$</td> </tr> <tr> <td>FRP clear cover:</td> <td>c_f</td> <td></td> <td>(mm)</td> <td>$[0;150]$</td> </tr> <tr> <td>Shape of FRP cross section:</td> <td></td> <td>Rectangular ★</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Small size dimension of FRP cross section:</td> <td>t_f</td> <td>1.4 ★</td> <td>(mm)</td> <td>$[1;30]$</td> </tr> <tr> <td>Large size dimension of FRP cross section:</td> <td>w_f</td> <td>9.5 ★</td> <td>(mm)</td> <td>$[1;200]$</td> </tr> <tr> <td>Area of FRP shear reinforcement: ?</td> <td>$A_{f,w}$</td> <td>26.6</td> <td>(mm²)</td> <td>$[1;1000]$</td> <td rowspan="6"> </td> </tr> <tr> <td>FRP shear reinforcement ratio: ?</td> <td>$\rho_{f,w}$</td> <td>0.0013</td> <td></td> <td>$[0;40] \times 10^{-3}$</td> </tr> <tr> <td>Height of bonded reinforcement (vertical projection):</td> <td>h_f</td> <td>300 ★</td> <td>(mm)</td> <td>$[50;2000]$</td> </tr> <tr> <td>Distance from fibre end to beam top:</td> <td>d_{ft}</td> <td>100 ★</td> <td>(mm)</td> <td>$[0;2000]$</td> </tr> <tr> <td>Distance from fibre end to beam bottom:</td> <td>d_{fb}</td> <td>0 ★</td> <td>(mm)</td> <td>$[0;2000]$</td> </tr> <tr> <td>Spacing of FRP shear reinforcement along beam axis:</td> <td>s_f</td> <td>114 ★</td> <td>(mm)</td> <td>$[1;1000]$</td> </tr> <tr> <td>Angle of FRP shear reinforcement system to beam axis:</td> <td>β</td> <td>90 ★</td> <td>(°)</td> <td>$[0;90]$</td> </tr> </tbody> </table> <p>(*) Required field. (?) Additional help.</p>								Description	Symbol	Value	Units	Valid Range	Help Image	FRP material type:		Carbon ★				Partial safety factor for FRP reinforcement (fib):	γ_f	1.30			<p>FRP Bonded into grooves by epoxy adhesive</p> <p>Section A-A (laminates or bar)</p> <p>Width of the FRP laminate (v_f) or diameter of the FRP bar (d_f)</p> <p>Epoxy adhesive</p> <p>FRP</p> <p>c_f - FRP clear cover</p>	Shear strength reduction factor (ACI):	Φ	0.75			Configuration reduction factor (ACI):	ψ_f	0.85			Environmental reduction factor (ACI):	C_E	0.95			FRP mechanical properties tested by the author:		Yes			Partial safety factor for FRP reinforcement (CNR):	γ_{fd}	1.5			FRP modulus of elasticity:	$E_{f,w}$	170900 ★	(MPa)	$[5;400] \times 10^3$	FRP ultimate tensile strain:	$\epsilon_{fu,w}$	0.016 ★		$[0.1;50] \times 10^{-3}$	FRP design tensile strength:	$f_{f,w}$	2741.7	(MPa)	$[50;5000]$	FRP ultimate tensile strength:	$f_{fu,w}$	2741.7 ★	(MPa)	$[50;5000]$	Groove depth:	a_g	13.5 ★	(mm)	$[1;300]$	Groove thickness:	b_g	4.5 ★	(mm)	$[3;40]$	FRP clear cover:	c_f		(mm)	$[0;150]$	Shape of FRP cross section:		Rectangular ★			Small size dimension of FRP cross section:	t_f	1.4 ★	(mm)	$[1;30]$	Large size dimension of FRP cross section:	w_f	9.5 ★	(mm)	$[1;200]$	Area of FRP shear reinforcement: ?	$A_{f,w}$	26.6	(mm ²)	$[1;1000]$		FRP shear reinforcement ratio: ?	$\rho_{f,w}$	0.0013		$[0;40] \times 10^{-3}$	Height of bonded reinforcement (vertical projection):	h_f	300 ★	(mm)	$[50;2000]$	Distance from fibre end to beam top:	d_{ft}	100 ★	(mm)	$[0;2000]$	Distance from fibre end to beam bottom:	d_{fb}	0 ★	(mm)	$[0;2000]$	Spacing of FRP shear reinforcement along beam axis:	s_f	114 ★	(mm)	$[1;1000]$	Angle of FRP shear reinforcement system to beam axis:	β	90 ★	(°)	$[0;90]$
Description	Symbol	Value	Units	Valid Range	Help Image																																																																																																																																			
FRP material type:		Carbon ★																																																																																																																																						
Partial safety factor for FRP reinforcement (fib):	γ_f	1.30			<p>FRP Bonded into grooves by epoxy adhesive</p> <p>Section A-A (laminates or bar)</p> <p>Width of the FRP laminate (v_f) or diameter of the FRP bar (d_f)</p> <p>Epoxy adhesive</p> <p>FRP</p> <p>c_f - FRP clear cover</p>																																																																																																																																			
Shear strength reduction factor (ACI):	Φ	0.75																																																																																																																																						
Configuration reduction factor (ACI):	ψ_f	0.85																																																																																																																																						
Environmental reduction factor (ACI):	C_E	0.95																																																																																																																																						
FRP mechanical properties tested by the author:		Yes																																																																																																																																						
Partial safety factor for FRP reinforcement (CNR):	γ_{fd}	1.5																																																																																																																																						
FRP modulus of elasticity:	$E_{f,w}$	170900 ★	(MPa)	$[5;400] \times 10^3$																																																																																																																																				
FRP ultimate tensile strain:	$\epsilon_{fu,w}$	0.016 ★		$[0.1;50] \times 10^{-3}$																																																																																																																																				
FRP design tensile strength:	$f_{f,w}$	2741.7	(MPa)	$[50;5000]$																																																																																																																																				
FRP ultimate tensile strength:	$f_{fu,w}$	2741.7 ★	(MPa)	$[50;5000]$																																																																																																																																				
Groove depth:	a_g	13.5 ★	(mm)	$[1;300]$																																																																																																																																				
Groove thickness:	b_g	4.5 ★	(mm)	$[3;40]$																																																																																																																																				
FRP clear cover:	c_f		(mm)	$[0;150]$																																																																																																																																				
Shape of FRP cross section:		Rectangular ★																																																																																																																																						
Small size dimension of FRP cross section:	t_f	1.4 ★	(mm)	$[1;30]$																																																																																																																																				
Large size dimension of FRP cross section:	w_f	9.5 ★	(mm)	$[1;200]$																																																																																																																																				
Area of FRP shear reinforcement: ?	$A_{f,w}$	26.6	(mm ²)	$[1;1000]$																																																																																																																																				
FRP shear reinforcement ratio: ?	$\rho_{f,w}$	0.0013		$[0;40] \times 10^{-3}$																																																																																																																																				
Height of bonded reinforcement (vertical projection):	h_f	300 ★	(mm)	$[50;2000]$																																																																																																																																				
Distance from fibre end to beam top:	d_{ft}	100 ★	(mm)	$[0;2000]$																																																																																																																																				
Distance from fibre end to beam bottom:	d_{fb}	0 ★	(mm)	$[0;2000]$																																																																																																																																				
Spacing of FRP shear reinforcement along beam axis:	s_f	114 ★	(mm)	$[1;1000]$																																																																																																																																				
Angle of FRP shear reinforcement system to beam axis:	β	90 ★	(°)	$[0;90]$																																																																																																																																				

b) Dados relativos ao reforço ao corte de CFRP aplicado com a técnica NSM.

Figura 4.26 – Parâmetros que caracterizam o reforço ao corte com FRP aplicado com a técnica NSM (DABASUM, 2013).

Geometry	Cross Section	Concrete	Flexural - Steel	Steel Stirrups	Flexural Strengthening	Shear Strengthening	Experimental Results
Fill the following fields about the results obtained from testing the specimen:							
Description	Symbol	Value	Units	Valid Range			
Test site:		LAB			★		
Load cycle:		Monotonic			★		
Status regarding pre-cracking of specimen:		No			★		
Shear force at concrete cracking initiation:	V_{cr}		(kN)	[0;1000]			
Maximum shear force of unstrengthened specimen:	V_{u1}	182.28	(kN)	[0;2000]	★		
Maximum shear force of strengthened specimen:	V_{u2}	224.5	(kN)	[0;2000]	★		
Nominal shear strength provided by FRP shear reinforcement:	$V_{f,exp}$	42.2	(kN)	[0;1000]	★		
Gain in shear strength provided by FRP ratio:?		23	(%)	[0;400]			
Failure mode as defined by authors:		Rupture			★		
FRP global failure mode:		Shear			★		
Critical shear crack angle:	$\theta_{cr,\phi}$		(°)]0;90]			
Commentary to failure mode:							
(★) Required field. (?) Additional help.							

Figura 4.27 – Parâmetros relativos aos resultados experimentais da viga 2S-7LV (DABASUM, 2013).

Capítulo 5

Desempenho das formulações analíticas

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O Capítulo 4 teve como objetivo apresentar a base de dados, atualmente existente, com resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de FRP: 594 vigas reforçadas com a técnica EBR e 106 vigas reforçadas com a técnica NSM. No Capítulo 4 também foi ilustrada, a título de exemplo, a forma como se deve proceder para introduzir na DABASUM a informação relativa ao ensaio experimental de: i) uma viga de betão armado reforçada ao corte com compósitos de FRP aplicados com a técnica EBR; ou ii) uma viga de betão armado reforçada ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica NSM.

Tal como já foi referido anteriormente, na DABASUM estão programadas quatro formulações analíticas que permitem o cálculo da contribuição garantida pelo reforço de FRP colado externamente (técnica EBR) na resistência ao corte de uma viga de betão armado (V_f). As referidas formulações analíticas (*fib*, CNR e CIDAR e ACI) foram detalhadamente apresentadas no Capítulo 3. No âmbito dos trabalhos associados à presente dissertação foram introduzidas na DABASUM duas formulações analíticas que permitem o cálculo da contribuição garantida pelo reforço de CFRP inserido no betão de recobrimento (técnica NSM) na resistência ao corte de uma viga de betão armado (V_f). Estas duas formulações (Nanni *et al.* (2004) e Dias e Barros (2013)) foram detalhadamente descritas no Capítulo 3.

Na Figura 5.1 apresentam-se os gráficos fornecidos pela DABASUM para cada uma das quatro formulações analíticas referentes à utilização da técnica EBR. O mesmo tipo de gráfico é fornecido para as formulações de Nanni *et al.* (2004) e Dias e Barros (2013) em termos da técnica NSM.

Neste contexto, refira-se que uma das mais-valias da DABASUM é permitir a qualquer utilizador a possibilidade de inserir resultados experimentais de mais vigas do que as que atualmente fazem parte da base de dados apresentada no Capítulo 4. Depois de proceder ao preenchimento dos vários quadros apresentados no referido capítulo (Secção 4.2.2 no caso da

técnica EBR e Secção 4.3.2 no caso da técnica NSM), o utilizador pode submeter a inserção da sua viga na base de dados da DABASUM. Após a verificação dos valores introduzidos pelo utilizador (ao nível da introdução de todos os parâmetros obrigatórios e ao nível do cumprimento dos limites estabelecidos para um conjunto de parâmetros que são solicitados), é fornecido de imediato, para a viga que foi introduzida, os valores analíticos do V_f para as formulações do ACI, da *fib*, da CNR e do CIDAR se o reforço da viga foi aplicado com a técnica EBR, ou os valores analíticos do V_f para as formulações de Nanni *et al.* (2004) e de Dias e Barros (2013) se o reforço foi aplicado com a técnica NSM. De seguida, o utilizador pode observar os gráficos fornecidos pela DABASUM em termos da comparação experimental vs analítico dos valores de V_f contendo a atualização dos novos dados entretanto introduzidos (nos gráficos fornecidos pela DABASUM há a diferenciação da informação existente no sistema à data da inserção das novas vigas com a nova informação introduzida pelo utilizador).

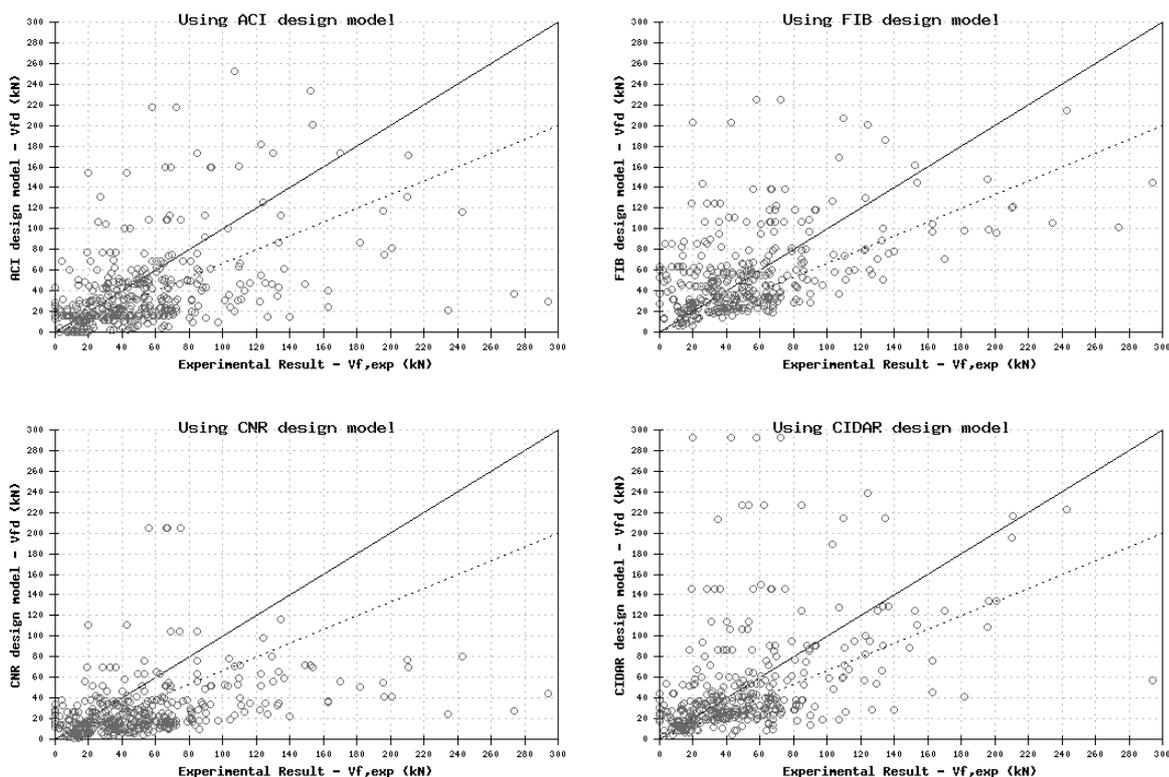


Figura 5.1 – Tipo de gráficos fornecidos pela DABASUM (DABASUM, 2013).

Nas secções seguintes do presente capítulo, para cada uma das técnicas de reforço ao corte (EBR e NSM) será feita uma análise ao desempenho de cada uma das formulações existentes

na DABASUM. Além disso, também será efetuada uma análise mais geral aos resultados obtidos no âmbito do desempenho das quatro formulações para a técnica EBR e das duas formulações para a técnica NSM.

Refira-se que a análise em termos das formulações analíticas da técnica EBR só foi efetuada para vigas reforçadas ao corte com compósitos de CFRP (no caso da técnica NSM, a base de dados só contém vigas reforçadas ao corte com CFRP). Independentemente da técnica de reforço ao corte, nesta análise não foram consideradas as vigas com modo de rotura por flexão.

O desempenho das formulações analíticas será avaliado tendo como base a comparação entre valores experimentais e valores analíticos da contribuição V_f . Para tal, definiu-se o coeficiente χ como sendo a razão entre o valor experimental ($V_{f,exp}$) e o valor analítico ($V_{f,ana}$) da contribuição V_f , ou seja:

$$\chi = \frac{V_f^{exp}}{V_f^{ana}} \quad (5.1)$$

Ainda no âmbito da avaliação do desempenho das formulações analíticas anteriormente referidas, designadamente na comparação entre valores experimentais e valores analíticos da contribuição V_f , foram definidas três zonas em termos dos valores do coeficiente χ definido pela expressão (5.1):

- zona A, em que os valores de χ são inferiores à unidade ($\chi < 1.0$), ou seja, situações em que existe uma situação de insegurança;
- zona B, em que os valores de χ estão compreendidos entre 1.0 e 1.5 ($1.0 \leq \chi \leq 1.5$);
- zona C, em que os valores de χ são superiores a 1.5 ($\chi > 1.5$), ou seja, situações em que há um sobredimensionamento do reforço de CFRP.

Na Figura 5.2 apresenta-se o gráfico valores experimentais (abscissas) vs valores analíticos (ordenadas) da contribuição V_f com a identificação das zonas A, B e C, anteriormente definidas.

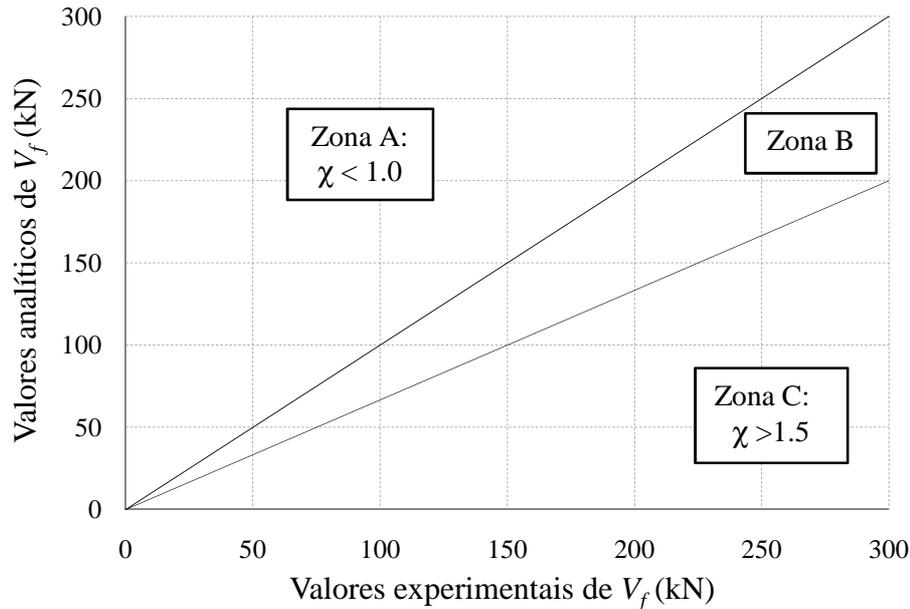


Figura 5.2 – Identificação das zonas A, B e C para avaliação do desempenho das formulações analíticas.

5.2. VERIFICAÇÃO DAS FORMULAÇÕES RELACIONAS COM O REFORÇO AO CORTE APLICADO COM A TÉCNICA DA COLAGEM EXTERNA (EBR)

5.2.1. Formulação *fib* (2001)

Na Tabela 5.1 apresenta-se a distribuição do número total de vigas em que foi aplicada a formulação *fib* (2001) pelas três zonas anteriormente referidas (A, B e C de acordo com a Figura 5.2). Além disso, é indicado o valor da percentagem de vigas associadas a cada uma das zonas A, B e C.

Tabela 5.1 – Aplicação da formulação *fib* (2001): distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.

Zona	χ	N.º de vigas	Percentagem
A	<1	222	50.0%
B	1-1.5	83	18.7%
C	>1.5	139	31.3%
Total		444	100.0%

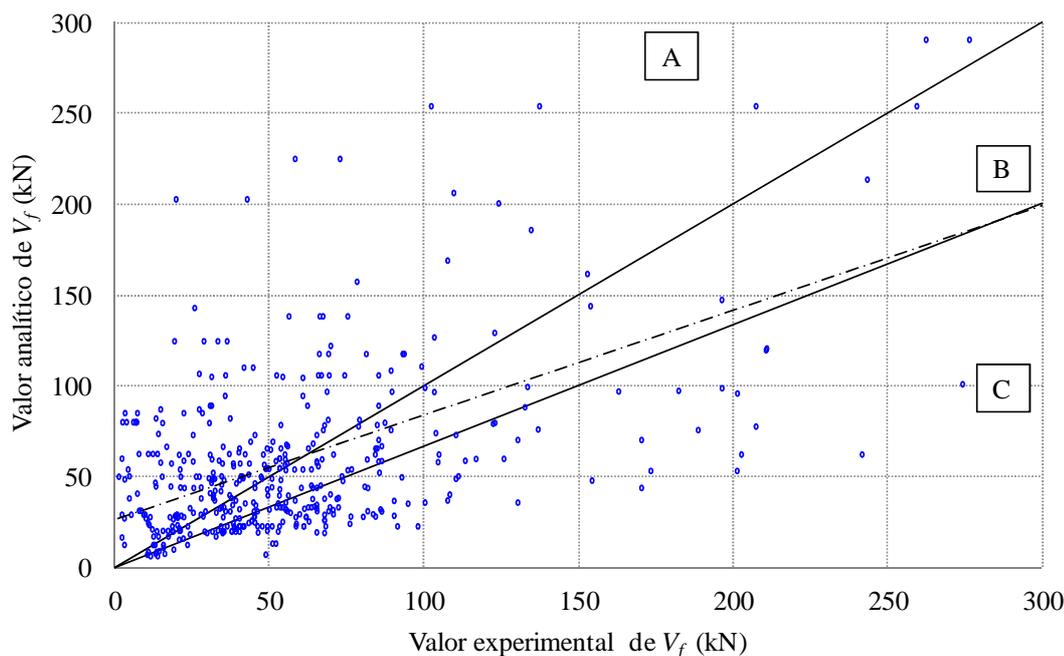


Figura 5.3 – Aplicação da formulação *fib* (2001): valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f .

Na Figura 5.3 apresenta-se a relação valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f para o caso da formulação proposta pela *fib*. Além disso, na Figura 5.3 apresenta-se as linhas correspondentes a $\chi = 1.0$ e a $\chi = 1.5$, identificam-se as zonas A, B e C anteriormente referidas, e apresenta-se a linha de tendência (regressão linear) da relação experimental vs analítico referente à formulação da *fib*.

De acordo com os dados da Tabela 5.1 foi possível aplicar a formulação da *fib* a 444 vigas reforçadas ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica EBR. Em 50.0% dos casos verificou-se que a formulação da *fib* conduziu a valores do lado da insegurança (valor experimental inferior ao valor analítico - Zona A). Na zona C encontram-se 31.3% das vigas, enquanto na zona B encontram-se apenas 18.7% das vigas, ou seja, das 444 vigas analisadas, 222 (50.0%) apresentaram valores do coeficiente χ superiores a 1.0 (lado da segurança).

Além da distribuição das 444 vigas pelas zonas A, B e C, anteriormente referida e ilustrada na Figura 5.3, o valor médio obtido para o parâmetro χ nestas vigas foi de 1.21. A linha de tendência (linha a traço ponto) representada na Figura 5.3 apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0.446 e caracteriza-se da seguinte forma: para valores de $V_{f,exp}$ inferiores a 63 kN está na Zona A, para valores de $V_{f,exp}$ entre 63 kN e 296 kN encontra-se na Zona B, verificando-se que para valores de $V_{f,exp}$ superiores a 296 kN está na zona C.

5.2.2 Formulação CNR (2004)

Na Tabela 5.2 apresenta-se a distribuição do número total de vigas em que foi aplicada a formulação CNR (2004) pelas zonas A, B e C. Além disso, também é indicado o valor da percentagem de vigas associadas a cada uma das referidas zonas.

Na Figura 5.4 apresenta-se a relação valores experimentais *vs* valores analíticos da contribuição V_f para o caso da formulação em análise (CNR, 2004). Além disso, na Figura 5.4 apresenta-se as linhas correspondentes a $\chi = 1.0$ e a $\chi = 1.5$, identificam-se as zonas A, B e C anteriormente referidas, e apresenta-se a linha de tendência (regressão linear) da relação experimental *vs* analítico referente à formulação CNR (2004).

Tabela 5.2 – Aplicação da formulação CNR (2004): distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.

Zona	χ	N.º de vigas	Percentagem
A	<1	83	20.0%
B	1-1.5	47	11.3%
C	>1.5	286	68.8%
Total		416	100.0%

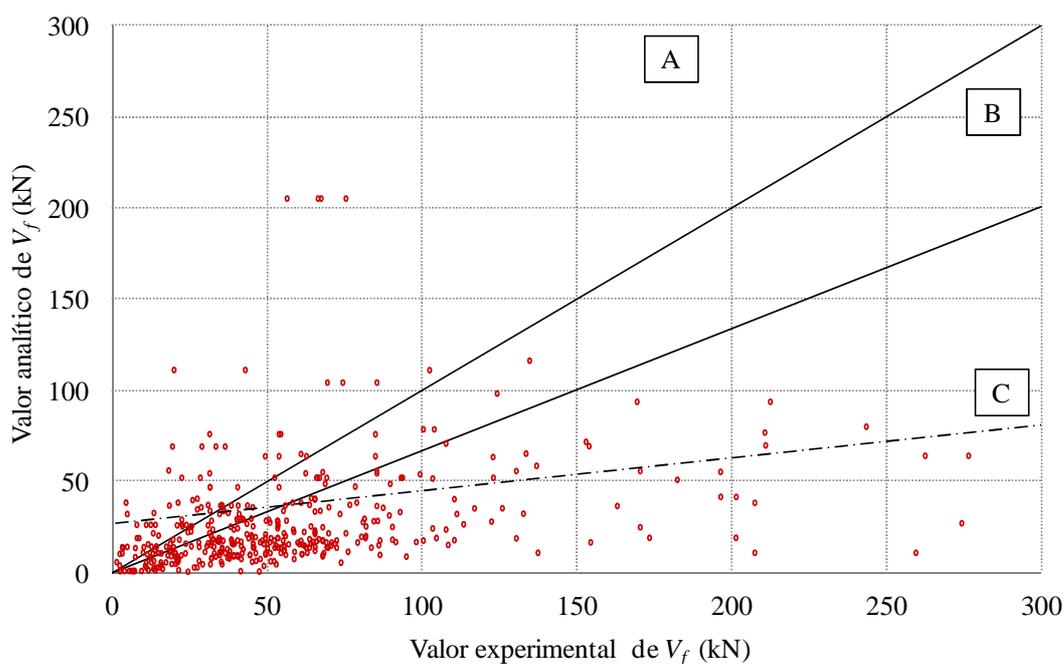


Figura 5.4 – Aplicação da formulação CNR (2004): valores experimentais *vs* valores analíticos da contribuição V_f .

De acordo com os dados da Tabela 5.2 foi possível aplicar a formulação do CNR a 416 vigas reforçadas ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica EBR. Em 20.0% dos casos verificou-se que a formulação do CNR conduziu a valores do lado da insegurança (valor experimental inferior ao valor analítico - Zona A). Na zona C encontram-se 68.8% das vigas, enquanto na zona B encontram-se apenas 11.3% das vigas, ou seja, das 416 vigas analisadas, 333 (80.0% dos casos) apresentaram valores do coeficiente χ superiores a 1.0 (lado da segurança).

Além da distribuição das 416 vigas pelas zonas A, B e C, anteriormente referida e ilustrada na Figura 5.4, o valor médio obtido para o parâmetro χ nestas vigas foi de 2.74. A linha de tendência (linha a traço ponto) representada na Figura 5.4 apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0.02 e caracteriza-se da seguinte forma: para valores de $V_{f,exp}$ inferiores a cerca de 33 kN encontra-se na Zona A, para valores de $V_{f,exp}$ entre 33 kN e 56 kN encontra-se na Zona B, verificando-se que para valores de $V_{f,exp}$ superiores a 56 kN encontra-se na zona C.

5.2.3 Formulação CIDAR (2006)

Na Tabela 5.3 apresenta-se a distribuição do número total de vigas em que foi aplicada a formulação CIDAR (2006) pelas zonas A, B e C. Além disso, também é indicado o valor da percentagem de vigas associadas a cada uma das referidas zonas.

Na Figura 5.5 apresenta-se a relação valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f para o caso da formulação em análise (CIDAR, 2006). Além disso, na Figura 5.5 apresenta-se as linhas correspondentes a $\chi = 1.0$ e a $\chi = 1.5$, identificam-se as zonas A, B e C anteriormente referidas, e apresenta-se a linha de tendência (regressão linear) da relação experimental vs analítico referente à formulação CIDAR (2006).

De acordo com os dados da Tabela 5.3 foi possível aplicar a formulação do CIDAR a 414 vigas reforçadas ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica EBR. Em 43.5% dos casos verificou-se que a formulação do CIDAR conduziu a valores do lado da insegurança (valor experimental inferior ao valor analítico - Zona A). Na zona C encontram-se 33.1% das vigas, enquanto na zona B encontram-se apenas 23.4% das vigas, ou seja, das 414 vigas analisadas, 234 (56.5% dos casos) apresentaram valores do coeficiente χ superiores a 1.0 (lado da segurança).

Além da distribuição das 414 vigas pelas zonas A, B e C, anteriormente referida e ilustrada na Figura 5.5, o valor médio obtido para o parâmetro χ nestas vigas foi de 1.32. A linha de tendência (linha a traço ponto) representada na Figura 5.5 apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0.197 e caracteriza-se da seguinte forma: para valores de $V_{f,exp}$ inferiores a cerca de 119 kN encontra-se na Zona A, enquanto que para valores de $V_{f,exp}$ superiores 119 kN encontra-se na Zona B.

Tabela 5.3 – Aplicação da formulação CIDAR (2006): distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.

Zona	χ	N.º de vigas	Percentagem
A	<1	180	43.5%
B	1-1.5	97	23.4%
C	>1.5	137	33.1%
Total		414	100.0%

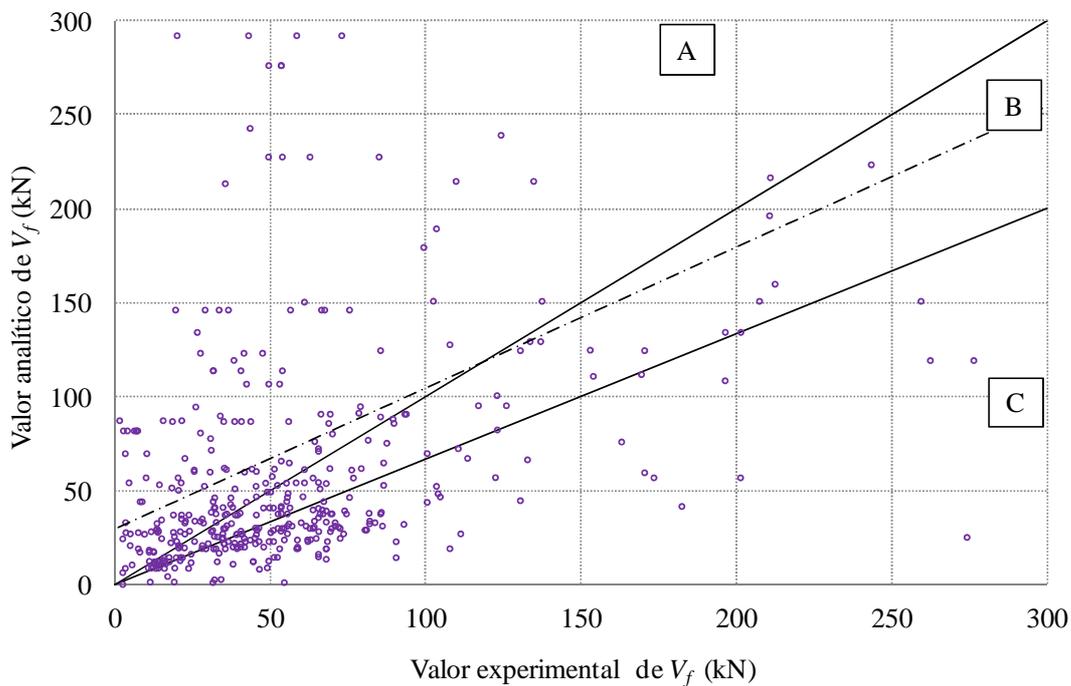


Figura 5.5 – Aplicação da formulação CIDAR (2006): valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f .

5.2.4 Formulação ACI (2008)

Na Tabela 5.4 apresenta-se a distribuição do número total de vigas em que foi aplicada a formulação ACI (2008) pelas zonas A, B e C. Além disso, também é indicado o valor da percentagem de vigas associadas a cada uma das referidas zonas.

Na Figura 5.6 apresenta-se a relação valores experimentais *vs* valores analíticos da contribuição V_f para o caso da formulação do ACI (2008). Além disso, na Figura 5.6 apresenta-se as linhas correspondentes a $\chi = 1.0$ e a $\chi = 1.5$, identificam-se as zonas A, B e C anteriormente referidas, e apresenta-se a linha de tendência (regressão linear) da relação experimental *vs* analítico referente à formulação ACI (2008).

Tabela 5.4 – Aplicação da formulação ACI (2008): distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.

Zona	χ	N.º de vigas	Percentagem
A	<1	163	39.9%
B	1-1.5	74	18.1%
C	>1.5	172	42.1%
Total		409	100.0%

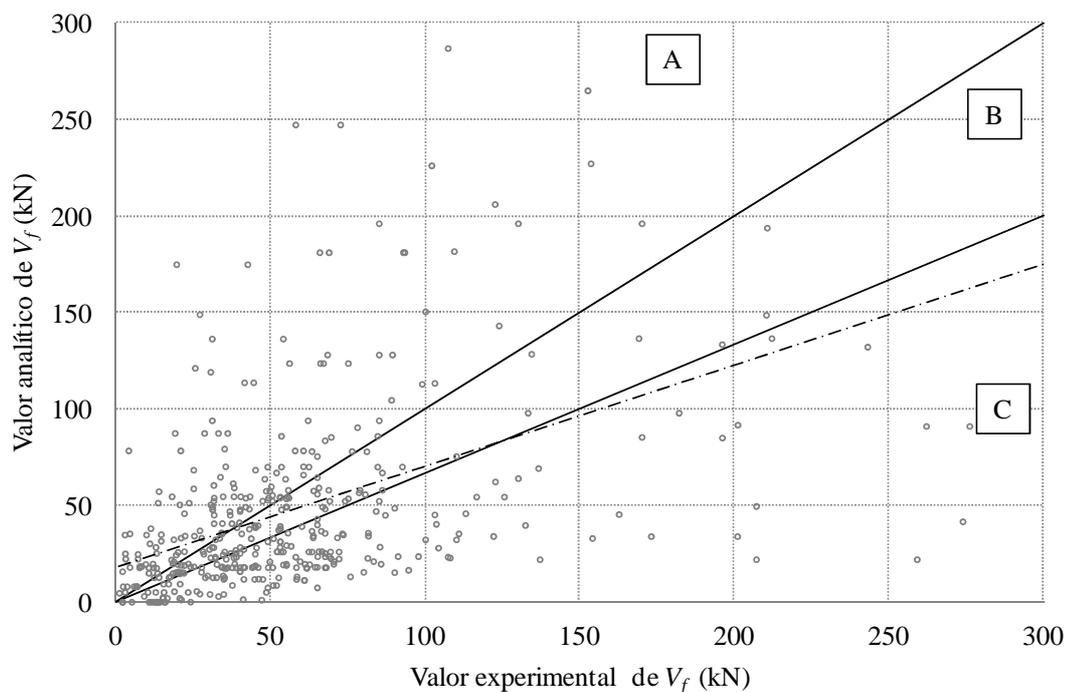


Figura 5.6 – Aplicação da formulação ACI (2008): valores experimentais *vs* valores analíticos da contribuição V_f .

De acordo com os dados da Tabela 5.4 foi possível aplicar a formulação do ACI a 409 vigas reforçadas ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica EBR. Em 39.9% dos casos verificou-se que a formulação do ACI conduziu a valores do lado da insegurança (valor experimental inferior ao valor analítico - Zona A). Na zona C encontram-se 42.1% das vigas, enquanto na zona B encontram-se apenas 18.1% das vigas, ou seja, das 409 vigas analisadas, 246 (60.1% dos casos) apresentaram valores do coeficiente χ superiores a 1.0 (lado da segurança).

Além da distribuição das 409 vigas pelas zonas A, B e C, anteriormente referida e ilustrada na Figura 5.6, o valor médio obtido para o parâmetro χ nestas vigas foi de 1.78. A linha de tendência (linha a traço ponto) representada na Figura 5.6 apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0.392 e caracteriza-se da seguinte forma: para valores de $V_{f,exp}$ inferiores a cerca de 37 kN encontra-se na Zona A, para valores de $V_{f,exp}$ entre 37 kN e 123 kN encontra-se na Zona B, verificando-se que para valores de $V_{f,exp}$ superiores a 123 kN encontra-se na zona C.

5.2.5 Análise comparativa do desempenho das formulações *fib*, CNR, CIDAR e ACI

Na Tabela 5.5 apresenta-se para cada umas formulações em análise (*fib* (2001), CNR (2004), CIDAR (2006) e ACI (2008)), o valor médio do parâmetro χ (representados na Figura 5.7), assim como a percentagem de vigas associadas às zonas A, B e C.

Tabela 5.5 – Avaliação do desempenho das formulações analíticas referentes à técnica EBR.

Formulação	Valor médio do parâmetro χ	Distribuição percentual das vigas pelas zonas A, B e C		
		Zona A	Zona B	Zona C
<i>fib</i> (2001)	1.21	50.0	18.7	31.3
CNR (2004)	2.74	20.0	11.3	68.8
CIDAR (2006)	1.32	43.5	23.4	33.1
ACI (2008)	1.78	39.9	18.1	42.1

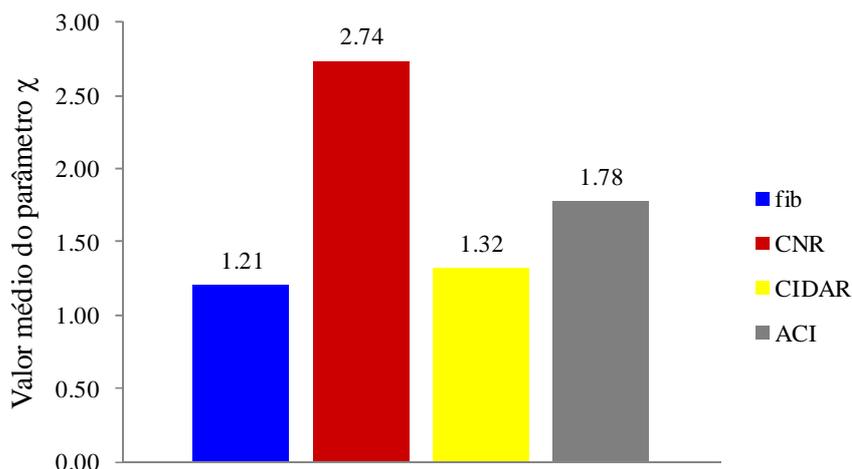


Figura 5.7 – Valor médio do parâmetro χ para as quatro formulações analíticas relativas à técnica EBR com compósitos de CFRP.

A análise dos valores apresentados na Tabela 5.5 e da Figura 5.7 permite constatar que as quatro formulações analisadas conduziram a valores médios do parâmetro χ superiores à unidade. O menor valor médio do parâmetro χ está associado à formulação da *fib*, com $\chi = 1.21$, enquanto que o valor médio de χ mais elevado foi registrado na formulação do CNR ($\chi = 2.74$). Para a formulação do CIDAR (2006) e do ACI (2008), o valor médio de χ foi, respectivamente, de 1.32 e 1.78.

Apesar do valor médio do parâmetro χ ser superior à unidade (lado da segurança), existem para as quatro formulações em análise, valores do parâmetro χ inferior à unidade num número significativo de vigas. Na formulação *fib*, CNR, CIDAR e ACI registaram-se valores de χ inferior à unidade (Zona A), respectivamente, em 50.0%, 20.0%, 43.5% e 39.9% das vigas analisadas. Neste contexto, destaca-se o valor de 50.0% apresentado pela formulação da *fib*, ou seja, em metade das vigas analisadas verificou-se uma situação de insegurança. Das três zonas A, B e C, aquela que está associado um menor número de vigas é a B, independentemente da formulação em análise (valores inferiores a 25%). No entanto, é nesta zona que há uma menor discrepância entre os valores das várias formulações. De acordo com os dados da Tabela 5.5 e da Figura 5.8, as formulações *fib*, CNR, CIDAR e ACI têm associadas à zona C, respectivamente, 31.3%, 68.8%, 33.1% e 42.1% das vigas analisadas. Neste contexto, destaca-se o valor de 68.8% apresentado pela formulação do CNR, ou seja, dois terços das vigas analisadas com esta formulação tem valor de χ superior a 1.5.

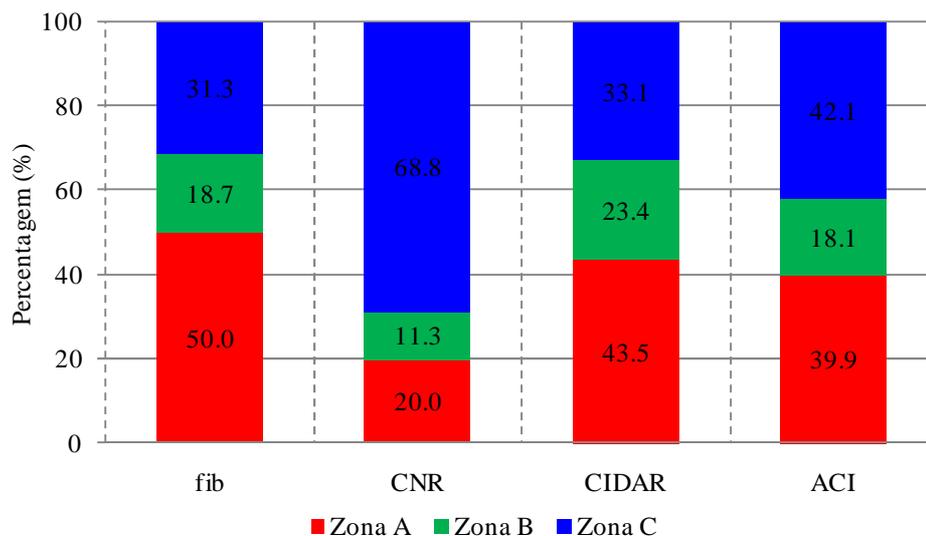


Figura 5.8 – Comparação do desempenho das quatro formulações analíticas (*fib*, CNR, CIDAR, ACI).

5.3. VERIFICAÇÃO DAS FORMULAÇÕES RELACIONADAS COM O REFORÇO AO CORTE APLICADO COM A TÉCNICA DA INSERÇÃO (NSM)

5.3.1 Formulação Nanni *et al.* (2004)

Na Tabela 5.6 apresenta-se a distribuição do número total de vigas em que foi aplicada a formulação Nanni *et al.* (2004) pelas zonas A, B e C. Além disso, é indicado o valor da percentagem de vigas associadas a cada uma das referidas zonas. Os valores da Tabela 5.6 foram obtidos adotando-se para os parâmetros τ_b e ε_{fe} presentes na formulação Nanni *et al.* (2004) os valores de 6.9 MPa e 4‰, respetivamente.

Tabela 5.6 – Aplicação da formulação Nanni *et al.* (2004) com $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4‰$: distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.

Zona	χ	N.º de vigas	Percentagem
A	<1	4	4.9%
B	1-1.5	8	9.9%
C	>1.5	69	85.2%
Total		81	100.0%

Na Figura 5.9 apresenta-se a relação valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f para o caso da formulação proposta por Nanni *et al.* (2004) com $\tau_b = 6.9$ MPa

e $\varepsilon_{fe} = 4\%$. Além disso, na Figura 5.9 apresentam-se as linhas correspondentes a $\chi = 1.0$ e a $\chi = 1.5$ e identificam-se as zonas A, B e C anteriormente referidas.

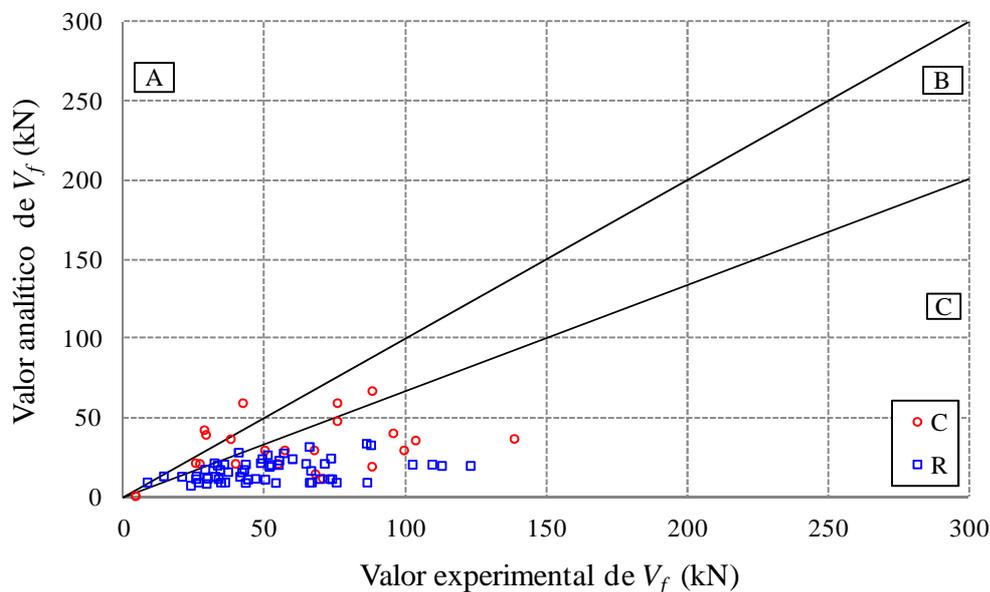


Figura 5.9 – Aplicação da formulação Nanni *et al.* (2004) com $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4\%$: valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f .

De acordo com os dados da Tabela 5.6 e da Figura 5.9, em cerca de 85% das vigas onde foi aplicada a formulação Nanni *et al.* (2004), com $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4\%$, verificaram-se valores de χ superiores a 1.5 (Zona C), concluindo-se assim que esta formulação é muito conservativa. Este cenário era previsível que ocorresse em virtude de nesta análise se ter considerado $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4\%$, quer para o reforço com varões como para o reforço com laminados. Tal como referido no Capítulo 3 da presente dissertação, os referidos valores de τ_b e ε_{fe} tornam a formulação bastante conservativa no caso dos laminados de CFRP.

Assim, na análise seguinte será feita a diferenciação do reforço com varões de CFRP, em que na formulação de Nanni *et al.* (2004) foi considerado $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4\%$, e do reforço com laminados de CFRP, em que na formulação de Nanni *et al.* (2004) foi considerado $\tau_b = 16.1$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 5.9\%$ (a justificação destes valores para τ_b e ε_{fe} foi apresentada no Capítulo 3).

Na Tabela 5.7 apresenta-se a distribuição do número total de vigas em que foi aplicada a formulação Nanni *et al.* (2004) pelas zonas A, B e C. Além disso, é indicado o valor da percentagem de vigas associadas a cada uma das referidas zonas. Tal como referido anteriormente, os valores da Tabela 5.7 foram obtidos adotando-se para os parâmetros τ_b e ε_{fe}

presentes na formulação Nanni *et al.* (2004) os valores de 6.9 MPa e 4‰, respetivamente, para o caso de varões de CFRP e os valores de 16.1 MPa e 5.9‰, respetivamente para o caso dos laminados de CFRP.

Na Figura 5.10 apresenta-se a relação valores experimentais *vs* valores analíticos da contribuição V_f para o caso da formulação Nanni *et al.* (2004) com $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4‰$ para varões e com $\tau_b = 16.1$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 5.9‰$ para o caso de laminados. Além disso, na Figura 5.10 apresenta-se as linhas correspondentes a $\chi = 1.0$ e a $\chi = 1.5$, identificam-se as zonas A, B e C anteriormente referidas, e apresenta-se a linha de tendência (regressão linear) da relação experimental *vs* analítico referente à formulação em análise.

Tabela 5.7 – Aplicação da formulação Nanni *et al.* (2004) com $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4‰$ para varões e com $\tau_b = 16.1$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 5.9‰$ para o caso de laminados: distribuição das vigas pelas zonas A, B e C.

Zona	χ	$\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4‰$ N.º de vigas	$\tau_b = 16.1$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 5.9‰$ N.º de vigas	Percentagem
A	<1	3	6	11.1%
B	1-1.5	5	16	25.9%
C	>1.5	15	36	63.0%
Total		23	58	100.0%

De acordo com os dados da Tabela 5.7 em 11.1% das vigas analisadas verificou-se que a formulação Nanni *et al.* (2004), com $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4‰$ para varões e com $\tau_b = 16.1$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 5.9‰$ para o caso de laminados, conduziu a valores do lado da insegurança (valor experimental inferior ao valor analítico - Zona A). Na zona C encontram-se 63.0% das vigas, enquanto na zona B encontram-se apenas 25.9% das vigas, ou seja, das 81 vigas analisadas, 72 (88.9% dos casos) apresentaram valores do coeficiente χ superior a 1.0 (lado da segurança).

Além da distribuição das 81 vigas pelas zonas A, B e C, anteriormente referida e ilustrada na Figura 5.10, o valor médio obtido para o parâmetro χ nestas vigas foi de 2.21. A linha de tendência (linha a traço ponto) representada na Figura 5.10 apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0.16 e caracteriza-se da seguinte forma: para valores de $V_{f,exp}$ inferiores a cerca de 22 kN encontra-se na Zona A, para valores de $V_{f,exp}$ entre 22 kN e 37 kN encontra-

se na Zona B, verificando-se que para valores de $V_{f,exp}$ superiores a 37 kN encontra-se na zona C.

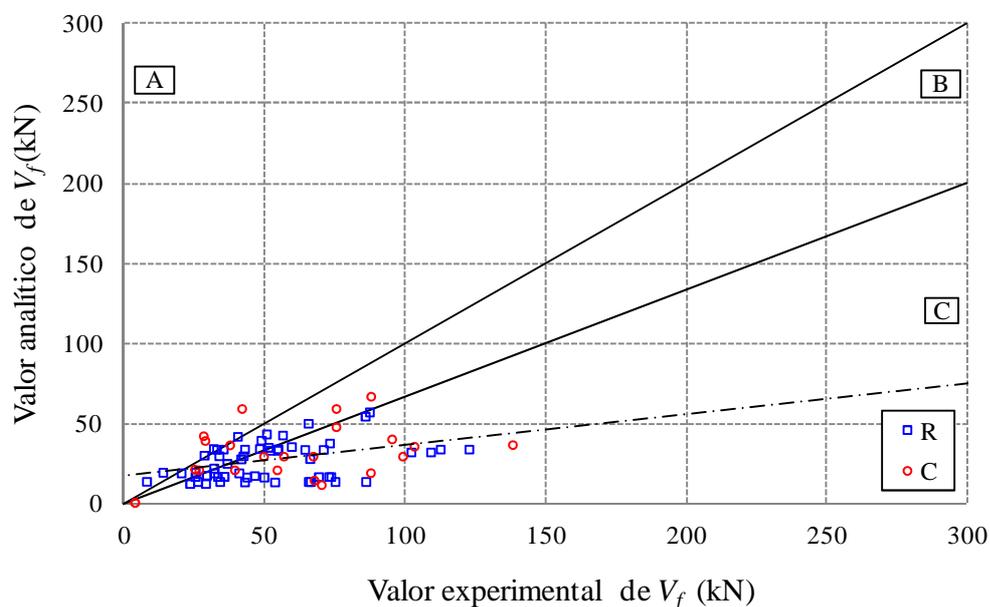


Figura 5.10 – Aplicação da formulação Nanni *et al.* (2004) com $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4\%$ para varões e com $\tau_b = 16.1$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 5.9\%$ para o caso de laminados: valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f .

5.3.2 Formulação Dias e Barros (2013)

Na Tabela 5.8 apresenta-se a distribuição do número total de vigas em que foi aplicada a formulação Dias e Barros (2013) pelas zonas A, B e C. Além disso, também é indicado o valor da percentagem de vigas associadas a cada uma das referidas zonas. Nesta análise, apenas foram consideradas as vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos, uma vez que os resultados experimentais em que se baseia a formulação analítica de Dias e Barros (2013) dizem respeito apenas à aplicação de laminados.

Tabela 5.8 – Aplicação da formulação Dias e Barros (2013): distribuição das vigas pelas zonas A, B e C (reforço com laminados de CFRP).

Zona	χ	N.º de vigas	Percentagem
A	<1	14	23.0%
B	1-1.5	34	55.7%
C	>1.5	13	21.3%
Total		61	100.0%

Na Figura 5.11 apresenta-se a relação valores experimentais vs valores analíticos da contribuição V_f para o caso da formulação proposta por Dias e Barros (2013). Além disso, na Figura 5.14 apresenta-se as linhas correspondentes a $\chi = 1.0$ e a $\chi = 1.5$ e identificam-se as zonas A, B e C anteriormente referidas.

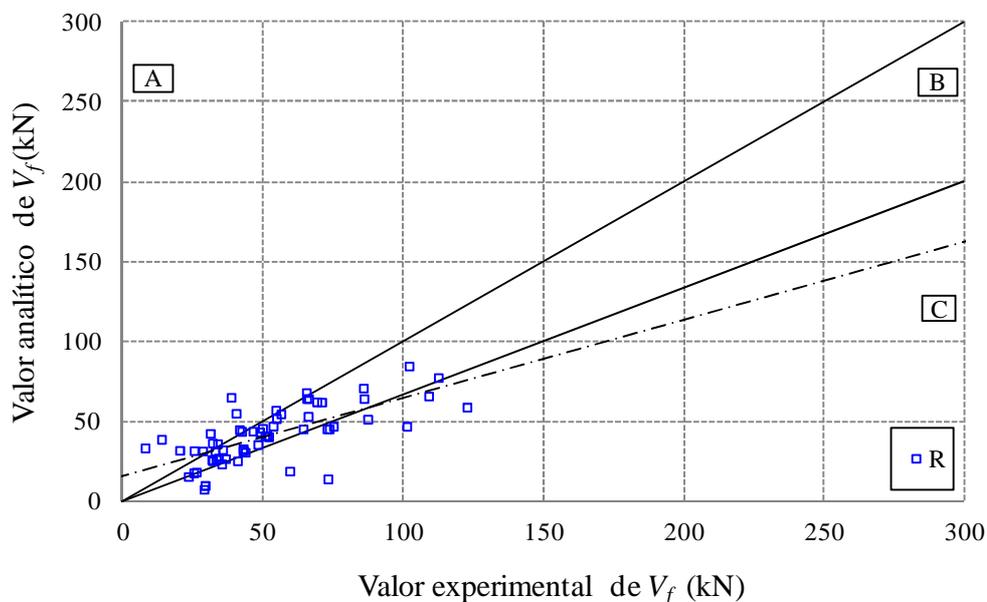


Figura 5.11 – Representação dos valores analíticos, através da formulação de Dias e Barros (2013), e respetivos valores experimentais (reforço com laminados de CFRP).

De acordo com os dados da Tabela 5.8 em 23.0% das vigas analisadas verificou-se que a formulação Dias e Barros (2013) conduziu a valores do lado da insegurança (valor experimental inferior ao valor analítico - Zona A). Na zona C encontram-se 21.3% das vigas, enquanto na zona B encontram-se apenas 55.7% das vigas, ou seja das 61 vigas analisadas, 47 (77% dos casos) apresentaram valores do coeficiente χ superior a 1.0 (lado da segurança).

Além da distribuição das 61 vigas pelas zonas A, B e C, anteriormente referida e ilustrada na Figura 5.11, o valor médio obtido para o parâmetro χ nestas vigas foi de 1.38. A linha de tendência (linha a traço ponto) representada na Figura 5.4 apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0.486 e caracteriza-se da seguinte forma: para valores de $V_{f,exp}$ inferiores a cerca de 32 kN encontra-se na Zona A, para valores de $V_{f,exp}$ entre 32 kN e 91 kN encontra-se na Zona B, verificando-se que para valores de $V_{f,exp}$ superiores a 91 kN encontra-se na zona C.

5.3.3 Análise comparativa do desempenho das formulações Nanni *et al.* (2013) e Dias e Barros (2013)

Na Tabela 5.9 apresenta-se para cada umas formulações em análise no âmbito da aplicação da técnica NSM, o valor médio do parâmetro χ assim como a percentagem de vigas associadas às zonas A, B e C. No caso da formulação de Nanni *et al.* (2013) os valores referem-se à análise que foi efetuada considerando $\tau_b = 6.9$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 4\%$ para varões e com $\tau_b = 16.1$ MPa e $\varepsilon_{fe} = 5.9\%$ para o caso de laminados. No caso da formulação de Dias e Barros (2013), os valores referem-se à análise que foi feita para as vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos.

Tabela 5.9 – Avaliação do desempenho das formulações analíticas referentes à técnica NSM.

Formulação	Valor médio do parâmetro χ	Distribuição das vigas pelas zonas		
		Zona A	Zona B	Zona C
Nanni <i>et al.</i> (2004)	2.21 (2.15) *	11.1% (10.3%) *	25.9% (27.6%) *	63.0% (62.1%) *
Dias e Barros (2013)	1.38	23.0%	55.7%	21.5%

* Os valores entre parêntesis referem-se ao resultado da aplicação da formulação de Nanni *et al.* (2004) para o caso das vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos.

A análise dos valores apresentados na Tabela 5.9 permite constatar que ambas as formulações analisadas conduziram a valores médios do parâmetro χ superiores à unidade. O valor médio de χ alcançado com a formulação de Nanni *et al.* (2004), independentemente do reforço ser com varões ou com laminados de CFRP, foi de 2.21.

O valor médio de χ alcançado com a formulação de Dias e Barros (2013) foi de 1.38. Refira-se que o valor médio de χ alcançado com a formulação de Nanni *et al.* (2004) apenas nas vigas reforçadas com laminados de CFRP foi de 2.15. Na Figura 5.12 apresenta-se, para ambas as formulações, a distribuição das vigas reforçadas com laminados de CFRP inseridos pelas zonas A, B e C. Nesta figura é possível verificar que à formulação de Nanni *et al.* (2004) está associado um menor número de vigas na zona A (lado da insegurança). Na formulação de Dias e Barros (2013) o maior número de vigas está na zona B (55.7% dos casos, enquanto que a formulação de Nanni *et al.* (2004) nesta zona tem 27.6% dos casos). O número de vigas que estão na zona C na formulação de Nanni *et al.* (2004) é claramente superior ao da formulação de Dias e Barros (2013). Com efeito, a percentagem de vigas na

zona C para a formulação de Nanni *et al.* (2004) e Dias e Barros (2013) é, respetivamente, 62.1% e 21.3%.

De um modo geral, é possível concluir que a formulação de Nanni *et al.* (2004) é mais conservativa que a formulação de Dias e Barros (2013).

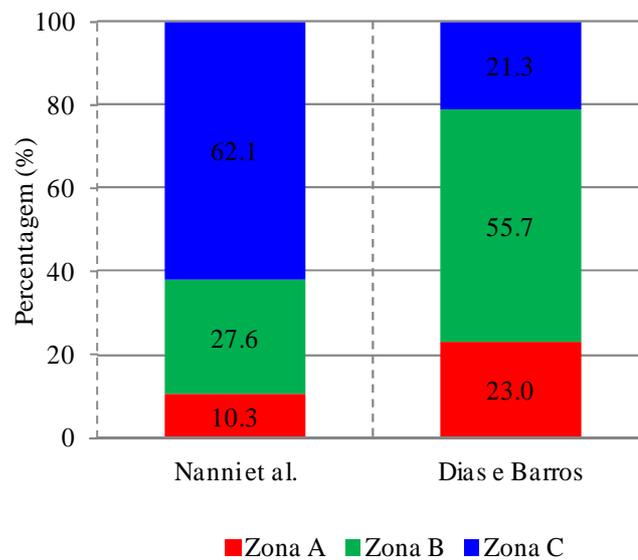


Figura 5.12 – Comparação do desempenho das formulações de Nanni *et al.* (2004) e Dias e Barros (2013).

Capítulo 6

Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros

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

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Nesta dissertação foi desenvolvido um trabalho de investigação na área do reforço ao corte de vigas de betão armado com materiais compósitos de CFRP. As conclusões que se podem extrair da investigação realizada são:

- A base de dados com resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de FRP, após a realização deste trabalho, contém 594 vigas em que o reforço foi aplicado com a técnica EBR e 106 vigas em que o reforço foi aplicado com a técnica NSM.
- Além das já existentes quatro formulações analíticas que permitem o cálculo da contribuição garantida pelo reforço de FRP colado externamente (técnica EBR) na resistência ao corte de uma viga de betão armado (V_f), a DABASUM (ferramenta informática onde está introduzida a base dados) passou a ter duas formulações analíticas referentes à quantificação da contribuição V_f quando o reforço é aplicado com a técnica NSM.
- Em termos das vigas reforçadas ao corte com compósitos de CFRP colados externamente, a análise comparativa entre os valores de V_f obtidos experimentalmente ($V_{f,exp}$) e os valores de V_f obtidos analiticamente ($V_{f,ana}$) por intermédio da aplicação das formulações *fib*, CNR, CIDAR e ACI permitiu concluir que em média o valor do parâmetro χ ($\chi = V_{f,exp} / V_{f,ana}$) é superior à unidade. Com efeito, o valor médio do parâmetro χ foi de 1.21, 2.74, 1.32 e 1.78, respetivamente para a formulação *fib*, CNR, CIDAR e ACI. Apesar dos valores médios de χ serem superiores à unidade, na formulação *fib*, CNR, CIDAR e ACI registaram-se valores de χ inferior à unidade (Zona A), respetivamente, em

50%, 20%, 43.5% e 39.9% das vigas analisadas. Independentemente da formulação analítica, de entre as zonas A (zona com χ inferior à unidade), B (zona com χ entre 1 e 1.5) e C (zona com χ superior a 1.5), a que tem um menor número de vigas associado é a zona B. Nesta zona não há discrepância tão grande dos valores entre formulações verificada quer na zona A como na zona C. À zona C estão associadas 31.3%, 68.8%, 33.1% e 42.1% das vigas analisadas, respetivamente, para as formulações *fib*, CNR, CIDAR e ACI.

- Em termos das vigas reforçadas ao corte com compósitos de CFRP aplicados com a técnica NSM, a análise comparativa entre os valores de V_f obtidos experimentalmente ($V_{f,exp}$) e os valores de V_f obtidos analiticamente ($V_{f,ana}$) por intermédio da aplicação das formulações de Nanni *et al.* (2004) e Dias e Barros (2013) permitiu concluir que em média o valor do parâmetro χ ($\chi = V_{f,exp} / V_{f,ana}$) é superior à unidade. O valor médio de χ alcançado com a formulação de Nanni *et al.* (2004), independentemente do reforço ser com varões ou com laminados de CFRP, foi de 2.21. O valor médio de χ alcançado com a formulação de Dias e Barros (2013), aplicada apenas a vigas reforçadas com laminados de CFRP inseridos, foi de 1.38. Neste contexto, refira-se que o valor médio de χ alcançado com a formulação de Nanni *et al.* (2004) apenas nas vigas reforçadas com laminados de CFRP inseridos foi de 2.15.
- Ainda no âmbito da análise do desempenho das formulações analíticas associadas à técnica NSM, a formulação de Nanni *et al.* (2004) caracteriza-se por cerca de 90% das vigas analisadas estarem do lado da segurança (valores de χ superior à unidade) e por ter um elevado número de vigas na zona C (próximo dos 65%). No caso da formulação de Dias e Barros (2013), 77% das vigas analisadas estavam do lado da segurança (valores de χ superior à unidade) e 56% das vigas analisadas estavam na Zona B.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados obtidos no âmbito da presente dissertação são uma contribuição para o nível do conhecimento existente em termos da aplicação de compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado. Em termos de desenvolvimentos futuros, alguns aspetos devem ser objeto de análise:

- Aumento da base de dados com mais resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de FRP aplicados de acordo com a técnica EBR.
- Realização de uma análise estatística mais pormenorizada dos resultados da comparação entre os valores experimentais e os valores analíticos obtidos pela aplicação das formulações analíticas *fib*, CNR e CIDAR e ACI. Calibração das referidas formulações de forma a melhorar o seu desempenho. Avaliação do desempenho de outras formulações analíticas existentes.
- Aumento da base de dados com mais resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte com compósitos de FRP aplicados de acordo com a técnica NSM.
- Realização de uma análise estatística mais pormenorizada dos resultados da comparação entre os valores experimentais e os valores analíticos obtidos pela aplicação das formulações analíticas de Nanni *et al.* (2004) e Dias e Barros (2013). Calibração das referidas formulações de forma a melhorar o seu desempenho. Avaliação do desempenho de outras formulações analíticas existentes.
- Ampliação das potencialidades da DABASUM com a consideração do reforço ao corte com FRP usando a técnica ETS.
- Desenvolvimento de um trabalho semelhante ao desenvolvido no âmbito da DABASUM para o caso do reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de FRP.

Capítulo 7

Referências bibliográficas

- Abdel-Jaber, M.S., Walker, P.R. e Hutchinson, A.R., 2003, “*Carbon fiber-reinforced polymer plates as shear strengthening for beams*”, *Materials and Structures*, 36, 291-301. ACI Committee 318, 2005, “*Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (318R-05)*”, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, pp. 430.
- ACI Committee 440, 2008, “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”, ACI 440.2R-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H., Ashraf, M., 2004, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer sheets with bonded anchorage*”, *ACI Structural Journal*, Volume 101, Issue 5, pp. 660-668.
- Alagusundaramoorthy, P., Harik, I.E., Choo, C.C., (2003), “*Shear strength of RC beams wrapped with CFRP fabric*”, Research Report, KTC-02-14/SPR 200-99-2F, Kentucky Transportation Center, University of Kentucky.
- Allam, S.M., Ebeido, T.I., 2003, “*Retrofitting of RC Beams Predamaged in Shear Using CFRP Sheets*”, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 42, Issue 1, pp. 87-101.
- Al-Sulaimani, G.J., Sharif, A., Basunbul, I.A., Baluch, M.H. e Ghaleb, B.N., 1994, “*Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding*”, *ACI Structural Journal*, Volume 91, Issue 3, pp. 458-464.
- Al-Tamimi, A., Hawileh, R., Abdalla, J. e Rasheed, H., 2011, “*Effects of Ratio of CFRP Plate Length to Shear Span and End Anchorage on Flexural Behavior of SCC RC Beams*”, *Journal of Composites for Construction*, Volume 15, Issue 6, December, pp. 908–919.
- Annaiah, R. H., Myers, J. J., Nanni, A., 2001, “*Shear Performance of RC Beams Strengthened In Situ with Composites*”, Department of Civil Engineering, University of Missouri - Rolla, U.S.A.

- Araki, N., Matsuzaki, Y., Nakano, K., Kataoka, T. e Fukuyama, H., 1997, “*Shear capacity of retrofitted RC members with continuous fiber sheets*”, Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Volume 1, Japan Concrete Institute, Tokyo, pp. 515–522.
- Areias, L., 2010, “*Aplicação de Formulações Analíticas a Resultados Experimentais de Vigas de Betão Armado Reforçadas ao Corte com Compósitos de CFRP*”, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, Novembro, 132 pp.
- Bae, S.-W., Tann, B. e Belarbi, A., 2012, “*Size effect of reinforced concrete beams strengthened in shear with externally bonded CFRP sheets*”, 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012), Rome, Italy, 13-15 June.
- Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Riskalla, S.H. e Triantafillou, T.C., 2002, “*Fiber-reinforced polymer composites for construction – State-of-the-art review*”, Journal of Composites for Construction, vol. 6, nº2, May, pp. 73-87.
- Barros, J.A.O. e Dias, S.J.E., 2006, “*Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams*”, Journal Cement & Concrete Composites, Volume 28, Issue 3, March, pp. 276-292.
- Beber, A.J., 2003, “*Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Belarbi, A., Murphy, M. e Bae, S.-W., 2012, “*Shear Strengthening of Full-Scale RC T-Beams with CFRP Sheets*”, The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS2012), Hokkaido University, Sapporo, Japan, 2-4 February.
- Berset, J.D., 1992, “*Strengthening of Reinforced Concrete Beams for Shear Using FRP Composites*”, M.S. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, USA.
- Bousselham, A. e Chaallal, O., 2006, “*Behaviour of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with Carbon fiber reinforced polymer: Experimental study*”, ACI structural Journal, Volume 103, Issue 3, pp. 339-347.

- Bousselham, A. e Chaallal, O., 2006, “*Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP*”, *Composites: Part B Journal*, Volume 37, pp. 37-46.
- Cao, S.Y., Chen, J.F., Teng, J.G., Hao, Z., Chen, J., 2005, “*Debonding in RC Beams Shear Strengthened with Complete FRP Wraps*”, *Journal of Composites for Construction*, Volume 9, Issue 5, pp. 417- 428.
- Carolin, A., 2003, “*Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*”, Doctoral Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Suécia, June, 190 pp.
- Carolin, A. e Täljsten, B., 2005, “*Experimental study of strengthening for increased shear bearing capacity*”, *Journal of Composites for Construction*, Volume 9, Issue 6, pp. 488-496.
- Chaallal, O., Nollet, M.J. e Perraton D., 1997, “*Renforcement au cisaillement de poutres en béton armé par des lamelles composites collées à l’aide de résine époxy*”, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 212, pp. 87-93.
- Chaallal, O., Shahawy, M. e Hassan, M., 2002, “*Performance of reinforced concrete T-girders strengthened in shear with carbon fiber reinforced polymer fabric*”, *ACI Structural Journal*, Volume 99, Issue 3, pp. 335-343.
- Chajes, M.J., Januska, T.F., Mertz, D.R., Thomson, T.A. e Finch, W.W., 1995, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics*”, *ACI Structural Journal*, Volume 92, Issue 3, pp. 295-303.
- CIDAR, 2006, “*Design guideline for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs*”, Draft 3 - submitted to Standards Australia, University of Adelaide, Australia.
- Cisneros, D., Arteaga, Á., De Diego, A., Alzate, A., Perera, R., 2012, “*Experimental study on NSM FRP shear retrofitting of RC beams*”, *6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012)*, Rome, Italy, 13-15 June.
- CNR, 2004, “*Instructions for design, execution and control of strengthening interventions through fiber reinforced composites*”, CNR-DT 200/04, *Consiglio Nazionale delle Ricerche*, Rome, Italy (English version).

- Colalillo, M. A., Sheikh, S. A., 2012, “*Seismic retrofit of large shear-critical reinforced concrete beams using CFRP*”, 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012), Rome, Italy, 13-15 June.
- DABASUM, 2013, Sistema informático que disponibiliza *on-line* uma base de dados com resultados experimentais de vigas de betão armado reforçadas ao corte com materiais compósitos de FRP, Universidade do Minho, Portugal, <http://dabasum.civil.uminho.pt/>.
- Dash, N., 2009, “*Strengthening of reinforced concrete beams using Glass fiber reinforced polymer composites*”, Master of Technology in Structural Engennering, National Institute of Technology Rourkela, India.
- De Lorenzis, L. e Nanni, A., 2001, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods*”, *ACI Structural Journal*, Volume 98, Issue 1, pp. 60-68.
- De Lorenzis, L. e Rizzo, A., 2006, “*Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement*”, Proceedings of the 2nd fib Congress, Naples, Italy, 5-8 June (CD-ROM).
- Deniaud, C. e Cheng, J. J. R., 2001, “*Shear Behavior of Reinforced Concrete T-Beams with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Sheets*”, *ACI Structural Journal*, Volume 98, Issue 3, May, pp. 386–394.
- Denieud, C., Cheng, J.J., 2003, “*Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Fiber Reinforced Polymer Sheets*”, *Journal of Composites for Construction*, Volume 7, Issue 4, pp. 302-310.
- Diagana, C., Li, A., Gedalia, B. e Delmas, Y., 2003, “*Shear strengthening efectiveness with CFRP strips*”, *Engineering Structures*, Volume 25, pp. 507-516.
- Dias, S. J. E., 2008, “*Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com técnica de inserção de laminados de CFRP*”, Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, Julho, 391 pp.
- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2006, “*Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams*”, *Journal Cement & Concrete Composites*, Volume 28, pp. 276-292.

- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2008, “*Shear strengthening of T cross section reinforced concrete beams by near surface mounted technique*”, *Journal of Composites for Construction*, Volume 12, Issue 3, May/June, pp. 300-311.
- 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*, Volume 32, Issue 2, February, pp. 373-384.
- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2011, “*Shear strengthening of RC T-section beams with low strength concrete using NSM CFRP laminates*”, *Journal Cement & Concrete Composites Journal*, Volume 33, Issue 2, pp. 334-345.
- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2012_a, “*Experimental behaviour of RC beams shear strengthened with NSM CFRP laminates*”, *Strain - An International Journal for Experimental Mechanics*, Volume 48, Issue 1, February, pp. 88-100.
- Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2012_b, “*NSM shear strengthening technique with CFRP laminates applied in high-strength concrete beams with or without pre-cracking*”, *Composites Part B: Engineering Journal*, Volume 43, Issue 2, March, pp. 290-301.
- Dias, S. J. E. e Barros, J. A. O., 2013, “*Shear strengthening of RC beams with NSM CFRP laminates: Experimental research and analytical formulation*”, *Composite Structures Journal*, Volume 99, May, pp. 477–490.
- Dias, S.J.E., Juvandes, L. e Figueiras, J.A., 2006, “*Estruturas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas de CFRP*”, *Revista IBRACON de Estruturas*, vol. 2, nº2, Junho, pp. 252-275.
- Ebead, U. e Saeed, H., 2012, “*Hybrid mechanically fastened/externally bonded FRP for RC beam shear strengthening*”, *6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012)*, Rome, Italy, 13-15 June.
- El-Hacha R. e Wagner M., 2009, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams using near surface mounted CFRP strips*”, *9th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymers Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9)*, Sydney, Australia
- Etman, E., 2011, “*External bonded shear reinforcement for T-section beams*”, *Structural Concrete Journal*, Volume 12, Issue 3, September, pp. 198–209.

- fib* - Bulletin 14, (2001), “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*”, Technical report by Task Group 9.3 FRP (Fiber Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, Fédération Internationale du Béton - *fib*, July, pp.130.
- Funakawa, I., Shimono, K., Watanabe, T., Asada, S. e Ushijima, S., 1997, “*Experimental study on shear strengthening with continuous fiber reinforcement sheet and methyl methacrylate resin*”, Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Japan Concrete Institute, Volume 1, Tokyo, pp. 475-482.
- Gamino, A.L., Sousa, J.L.A.O., Manzoli, O.L. e Bittencourt, T.N., 2010, “*Estruturas de concreto reforçadas com PRFC, Parte II: Análise dos Modelos de Cisalhamento*”, Ibracon Structures and Materials Journal, Volume 3, Issue 1, pp. 24-49.
- Godar, Ahmed; Chaallal, Omar; 2013, "Strut-and-tie method for externally bonded FRP shear-strengthened large-scale RC beams", *Composite Structures*, Volume 99, pp. 327-338.
- Godat, A, Qu, Z., Lu, X. Z., Labossière, P., Ye, L. P., Neale, K. W. e Asce, M., 2010, “*Size Effects for Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear with CFRP Strips*”, *Journal of Composites for Construction*, Volume 14, Issue 3, June, pp. 260–272.
- Grande, E., Imbimbo, M., Rasulo, A., 2009,” *Effect of transverse steel on the response of RC beams strengthened in shear by FRP: Experimental study*”, *Journal of Composites for Construction*, Volume 13, Issue 5, pp. 405-414.
- Guadagnini, M., Pilakoutas, K. e Waldron, P., 2003, “*Shear Performance of FRP Reinforced Concrete Beams*”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Volume 22, Issue 15, October, pp. 1389–1407.
- Hadi, M. N. S., 2003, “*Retrofitting of shear failed reinforced concrete beams*”, *Composite Structures Journal*, Volume 62, Issue 1, October, pp. 1–6.
- Ianniruberto, U. e Imbimbo, M., 2004, “*Role of Fiber Reinforced Plastic Sheets in Shear Response of Reinforced Concrete Beams: Experimental and Analytical Results*”, *Journal of Composites for Construction*, Volume 8, Issue 5, October, pp. 415–424.
- Jayprakash, J., Abdul Aziz, A.A., Abang Abdullah, A.A., Ashraboov A. A., 2006, “*Shear Resistance of Reinforced Concrete Beams with Bidirectional Carbon Fibre Fabric Strips*”, Fédération internationale du béton, Proceedings of the 2nd International Congress, Napoli, Italy.

- Jayprakash, J., Samad, A.A., Abbasovich, A.A., Ali, A.A., 2008, “*Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi directional CFRP strips*”, *Construction and Building Materials*, Volume 22, pp. 1148-1165.
- Juvandes, L., Dias, S.J.E. e Figueiras, J.A., 2003, “*Eficiência do reforço de faixas de laje com sistemas compósitos de CFRP*”, *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, nº52, Setembro, pp. 33-42.
- Kamiharako, A., Maruyama, K., Takada, K. e Shimomura T., 1997, “*Evaluation of shear contribution of FRP sheets attached to concrete beams*”, *Non-Metallic FRP reinforcement for concrete structures*, Proceedings of the third international symposium, Tokyo, Japan.
- Khalifa, A., M., 1999, “*Shear performance of reinforced concrete beams strengthened with advanced composites*”, PhD Thesis, University of Alexandria, Alexandria, Egypt.
- Khalifa, A. e Nanni, A., 2000, “*Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites*”, *Cement and Concrete Composites Journal*, Volume 22, Issue 3, June, pp. 165–174.
- Katakalos, K., Manos e G. e Papakonstantinou, C., 2012, “*Comparison between carbon and steel fiber reinforced polymers with or without anchorage*”, *6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012)*, Rome, Italy, 13-15 June.
- Kotynia, R., (2007), “*Shear strengthening of RC beams with NSM CFRP laminates*”, *8th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymers Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8)*, University of Patras, Greece.
- Koutas, L. e Triantafillou, T. C., 2012, “*Use of Anchors in Shear Strengthening of Reinforced Concrete T-Beams with FRP*”, *6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012)*, Rome, Italy, 13-15 June.
- Lee, H. K., Cheong, S. H., Ha, S. K. e Lee, C. G., 2011, “*Behavior and performance of RC T-section deep beams externally strengthened in shear with CFRP sheets*”, *Composite Structures Journal*, Volume 93, Issue 2, January, pp. 911–922.
- Leung, C. K. Y., Asce, M., Chen, Z., Lee, S., Ng, M. e Xu, M., 2007, “*Effect of Size on the Failure of Geometrically Similar Concrete Beams Strengthened in Shear with FRP*”

- Strips*”, Journal of Composites for Construction, Volume 11, Issue 5, October, pp. 487–496.
- Li, A. e Delmas, Y., 2001, “*Shear strengthening of RC beams with externally bonded CFRP sheets*”, Journal of Structures Engineering, Volume 127, Issue 4, April, pp. 374–380.
- Li, A., Diagana, C. e Delmas, Y., 2001, “*CRFP contribution to shear capacity of strengthened RC beams*”, Engineering Structures Journal, Volume 23, Issue 10, October, pp. 1212–1220.
- Li, A., Diagana, C. e Delmas, Y., 2002, “*Shear strengthening effect by bonded composite fabrics on RC beams*”, Composites: Part B, Volume 33, pp. 225-239.
- Matthys, S., 2000, “*Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement*”, Dissertation (Monograph), Faculty of Engineering, Ghent University, Belgium, 367 pp.
- Mitsui, Y., Murakami, K., Takeda, K., Sakai, H., 1998, "A Study on Shear Reinforcement of Reinforced Concrete Beams Externally Bonded with Carbon Fiber Sheets", Composites Interface Journal, Volume 5, Issue 4, pp. 285-295.
- Miyajima, H., Kosa, K., Tasaki, K. e Matsumoto, S., 2005, "*Shear strengthening of RC beams using carbon fiber sheets and its resistance mechanism*", Proceedings of the Fifth Workshop on Safety and Stability of Infrastructures against Environmental Impacts, De La Salle University, Manila, Philippines.
- Miyauchi, K., Inoue, S., Nishibayashi, S., e Tanaka, Y., 1997, “*Shear behavior of reinforced concrete beam strengthened with CFRP sheet*”, Trans. Japan Concrete Institute, Volume 19, pp. 97-104.
- Mofidi A. e Chaallal O., 2011, “*Performance of RC Beams Strengthened in Shear with Embedded Through-Section FRP Rods*”, First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Dubai, February, 6 pp.
- Mofidi, A., Chaallal, O., Benmokrane, B. e Neale, K., 2012, “*Performance and comparison of end-anchorage systems for RC beams strengthened in shear with U-wrap EB FRP*”, 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2012), Rome, Italy, 13-15 June.

- Monti, G., Liotta, M.A., 2007, “*Test and design equations for FRP-Strengthening in shear*”, Construction and Building Materials Journal, Volume 21, pp. 799-809.
- Moren, J.E., 2002, “*Shear Behaviour of reinforced concrete deep beams strengthened with CFRP laminates*”, M.Sc. Thesis, Faculty of New Jersey Institute of Technology, New Jersey, USA.
- Mosallam, A.S., Banaerjee, S., 2007, “*Shear enhancement of reinforced concrete beams strengthened with FRP composite laminates*”, Composites: Part B Journal, Volume 38, pp. 781-793.
- Nanni, A., 2004, “*Fiber reinforced polymer composites for infrastructure strengthening - From research to practice*”, VII AIMAT Congress, Ancona, Italy, June 29 - July 2, Key-note Paper KP2, 10 pp. (CD-ROM).
- Nanni, A., Ludovico, M. D. e Parretti, R., 2004, “*Shear Strengthening of a PC Bridge Girder with NSM CFRP Rectangular Bars*”, Advances in Structural Engineering Journal, Volume 7, Issue 4, January, pp. 97-110.
- Norris, T., Saadatmanes, H. e Ehsani, M., 1997, “*Shear and Flexural Strengthening of RC Beams with Carbon Fiber Sheets*”, Journal of Structures Engineering, Volume 123, Issue 7, July, pp. 903-911.
- Ono, K., Matsumura, M., Sakanishi, S., e Miyata, K., 1997, “*Strength improvement of rc bridge piers by carbon fiber sheet*”, Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Japan Concrete Institute, Tokyo, Volume 1, pp. 563-570.
- Park, S.Y., Naaman, A.E., Lopez, M.M. e Till, R.D., 2001, “*Shear strengthening of RC beams using glued CFRP sheets*”, FRP composites in civil Engineering, Volume 1, pp. 669-676.
- Pellegrino, C. e Modena, C., 2002, “*Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement*”, Journal of Composites for Construction, vol. 6, n°2, May, pp. 104-111.
- Pellegrino, C., Modena, C., 2006, “*Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams: Experimental study and analytical modeling*”, ACI Structural Journal, Volume 103, Issue 5, pp. 720-728.

- Pellegrino, C. e Vasic, M., 2013, “*Assessment of design procedures for the use of externally bonded FRP composites in shear strengthening of reinforced concrete beams*”, Composites Part B: Engineering Journal, Volume 45, Issue 1, February, pp. 727–741.
- Rahal, K. e Rumaih, H., 2011, “*Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted CFRP and steel bars*”, Engineering Structures Journal, Volume 33, Issue 1, January, pp. 53–62.
- Qu, Z., Lu, X. Z. e Ye, L. P., 2005, “*Size effect of shear contribution of externally bonded FRP U-Jackets for RC beams*”, Proceedings of International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005), Hong Kong, China.
- Saafan, M.A.A., 2006, “*Shear Strengthening of Reinforced concrete beams using GFRP wraps*”, Acta Polytechnica, Volume 46, Issue 1, pp. 24-32.
- Sato, Y., Ueda, T., Kakuta, Y. e Tanaka, T., 1996, “*Shear reinforcing effect of carbon fiber sheet attached to side of reinforced concrete beams*”, Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, pp. 621-627.
- Sato, Y., Ueda, T., Kakuta, Y., e Ono, S., (1997), “*Ultimate shear capacity of reinforced concrete beams with carbon fiber sheet*”, Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Japan Concrete Institute, 1, Tokyo, 499-506.
- Sena-Cruz, J.M. e Barros, J.A.O., 2004, “*Bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete in structural strengthening*”, Journal of Composites for Construction, vol. 8, nº 6, pp. 519-527.
- Siddiqui, N.A., 2009, “*Experimental investigation of RC beams strengthened with externally bonded FRP composites*”, Latin American Journal of Solids and Structures, Volume 6, pp. 343-362.
- Song, F.X., Fan, C.Z. e Jie, L., 2004, “*Experimental research on shear strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded CFRP sheets*”, College of Civil Engineering Southeast University NanJing, China.
- Taerwe, L., Khalil, H., e Matthys, S., 1997, “*Behaviour of rc beams strengthened in shear by external CFRP sheets*”, Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Japan Concrete Institute, Volume 1, Tokyo, pp. 483-490.

- Täljsten, B., 1997, “*Strengthening of concrete structures for shear with bonded CFRP fabrics*”, Recent advances in bridge engineering, EMPA, Switzerland, pp. 67-74.
- Täljsten, B., 2003, “*Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets*”, Construction and Building Materials, Volume 17, pp. 15-26.
- Teng, J. G., Chen, G. M., Chen, J. F., Rosenboom, O. A. e Lam, L., 2009, “*Behavior of RC Beams Shear Strengthened with Bonded or Unbonded FRP Wraps*”, Journal of Composites for Construction, Volume 13, Issue 5, October, pp. 394–404.
- Triantafillou, T.C., 1998, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxybonded FRP composites*”, ACI Structural Journal, Volume 95, Issue 2, pp.107-115.
- Uji, K., 1992, “*Improving shear capacity of existing reinforced concrete members by applying carbon fiber sheets*”, Trans. Japan Concrete Institute, Volume 14, pp. 253-266.
- Umezū, K., Fujita, M., Nakai, H. e Tamaki, K., 1997, “*Shear behavior of RC beams with aramid fiber sheet*”, Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Japan Concrete Institute, Volume 1, Tokyo, pp. 491-498.
- Wiwatrojanagul, P., Israngkura, B., Ayudhya, N. e Sahamitmongkol, R., 2012, “*NSM FRP Shear Strengthening of RC Beams with Internal Stirrups*”, Thammasat International Journal of Science and Technology (TIJSAT), Volume 17, Issue 1, January-March, pp. 16–30.
- Wong, R. S. Y. e Vecchio, F. J., 2003, “*Towards Modeling of Reinforced Concrete Members with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Composites*”, ACI Structural Journal, Volume 100, Issue 1, January-February, pp. 47–55.
- Zhang, Z., 2003, “*Shear strengthening of RC beams using carbon fiber reinforced polymer laminates*”, PhD Thesis, New Jersey Institute of Technology.
- Zhang, Z., Hsu, C. T. e Asce, F., 2005, “*Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminates*”, Journal of Composites for Construction, March/April, Volume 9, Issue 2, April pp. 158–169.
- Zhang, G., Kishi, N., Mikami, H., 2007, “*Effects of Bonding Configurations on Shear Behavior of RC Beams Reinforced With Aramid FRP Sheets*”, 8th International

Symposium on Fiber-Reinforced Polymers Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), University of Patras, Greece.

ANEXO

Exemplos de aplicação das formulações analíticas referentes ao reforço ao corte de vigas de betão armado com CFRP aplicado com a técnica NSM

- A.1 Exemplos de aplicação da formulação de *Nanni et al.* (2004)
- A.2 Exemplos de aplicação da formulação de *Dias e Barros* (2013)

A.1 Formulação analítica de Nanni *et al.* (2004)

Nesta secção são apresentados dois exemplos de aplicação da formulação de Nanni *et al.* (2004) na determinação do valor de cálculo da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM).

A.1.1 Exemplo 1

O primeiro exemplo refere-se à viga 2S-7LV testada por Dias e Barros (2012_a). Trata-se de uma viga com secção transversal em T que foi reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados na vertical. Os laminados, com secção transversal de $1.4 \times 9.5 \text{ mm}^2$, foram colocados com um espaçamento de 114 mm (Figura A.1)

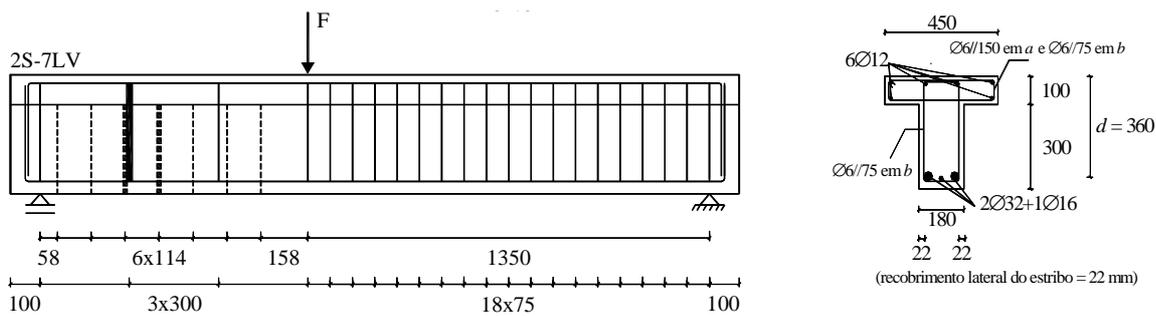


Figura A.1 – Características geométricas da viga 2S-7LV (Dias e Barros, 2012_a).

Tabela A.1 – Parâmetros necessários para aplicação da formulação de Nanni *et al.* (2004): exemplo 1.

Parâmetro	Nomenclatura	Valor
Valor médio da tensão de aderência (resistência da ligação colada)	τ_b^*	16.1 MPa
Extensão efetiva	ε_{fe}^*	5.9 ‰
Módulo de elasticidade do laminado de CFRP	E_f	170.9 GPa
Comprimento real de cada laminado de CFRP	l_b	300 mm
Recobrimento das armaduras longitudinais	rec	20 mm
Espaçamento dos laminados	s_f	114 mm
Dimensões dos laminados	$(a_f \times b_f)$	$1.4 \times 9.5 \text{ mm}^2$

* Como o reforço é com laminados de CFRP, para os parâmetros τ_b e ε_{fe} foram considerados os valores de 16.1 MPa e 5.9‰ (ver secção 3.3.1 do Capítulo 3).

Tabela A.2 – Aplicação da formulação de *Nanni et al.* (2004): exemplo 1.

Procedimento	Cálculo
<p>1. Determinação do parâmetro N</p> <p>O valor do parâmetro N é valor dado pela expressão seguinte arredondado para o inteiro mais baixo</p> $N = \frac{l_{eff}(1 + \cot \alpha)}{s_f}$ <p>O comprimento efetivo do CFRP na vertical l_{eff} é obtido por intermédio de:</p> $l_{eff} = l_b \sin \alpha - 2c$ <p>O α é a orientação do CFRP em relação ao eixo da viga e o parâmetro c é a espessura do betão de recobrimento das armaduras longitudinais</p> $c = rec + \emptyset_{estribo}$	$c = 20 + 6 = 26 \text{ mm}$ $l_{eff} = 300 \sin 90 - 2 \times 26 = 248 \text{ mm}$ $N = \frac{248(1 + \cot 90)}{114} = 2.18 \rightarrow 2$
<p>2. Determinação do parâmetro $L_{tot \min}$</p> <p>O parâmetro $L_{tot \min}$ corresponde ao somatório dos comprimentos de colagem efetivos dos CFRP que atravessam a fenda de corte (com inclinação admitida constante e igual a 45°) na posição mais desfavorável:</p> $L_{tot \min} = \sum_i L_i$ <p>em que o comprimento efetivo L_i de cada CFRP é obtido por:</p> $L_i = \begin{cases} \min\left(\frac{s_f}{\cos \alpha + \sin \alpha} i; l_{max}\right) & i = 1 \dots N/2 \\ \min\left(l_{net} - \frac{s_f}{\cos \alpha + \sin \alpha} i; l_{max}\right) & i = \frac{N}{2} + 1 \dots N \end{cases}$ <p>O comprimento efetivo do CFRP l_{net} é obtido por intermédio de:</p> $l_{net} = l_b - \frac{2c}{\sin \alpha}$ <p>O valor máximo admissível para o comprimento efetivo do CFRP l_{max} é determinado por:</p> $l_{max} = \frac{\varepsilon_{fe}}{2} \frac{a_f b_f E_f}{a_f + b_f \tau_b}$	$l_{max} = \frac{5.9 \times 10^{-3} \cdot 1.4 \times 9.5 \cdot 170.9 \times 10^3}{2 \cdot 1.4 + 9.5 \cdot 16.1} = 38.2 \text{ mm}$ $l_{net} = l_b - \frac{2c}{\sin \alpha} = 300 - \frac{2 \times 26}{\sin 90} = 248 \text{ mm}$ $L_1 = \min\left(\frac{114}{\cos 90 + \sin 90} \times 1; 38.2\right) = 38.2 \text{ mm}$ $L_2 = \min\left(248 - \frac{114}{\cos 90 + \sin 90} \times 2; 38.2\right) = 20 \text{ mm}$ $L_{tot \min} = \sum_i L_i = L_1 + L_2 = 38.2 + 20 = 58.2 \text{ mm}$
<p>3. Determinação do valor de cálculo da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal:</p> <p>O valor de cálculo da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal é obtido por intermédio de:</p> $V_{fd}^{Nanni} = \phi \psi_f (4(a_f + b_f) \tau_b L_{tot \min}) \sin \alpha$ <p>O valor de ϕ é de 0.85 e o valor de ψ_f é de 0.85.</p>	$V_{fd}^{Nanni} = 0.85 \times 0.85 \times (4 \times \left(\frac{1.4}{1000} + \frac{9.5}{1000}\right) \times 16.1 \times 58.2) \sin 90 = 29.5 \text{ kN}$

A.1.2 Exemplo 2

O segundo exemplo refere-se à viga 2S-7LI45 testada por Dias e Barros (2012_a). Trata-se de uma viga com secção transversal em T que foi reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados a 45°. Os laminados, com secção transversal de $1.4 \times 9.5 \text{ mm}^2$, foram colocados com um espaçamento de 157 mm (Figura A.2).

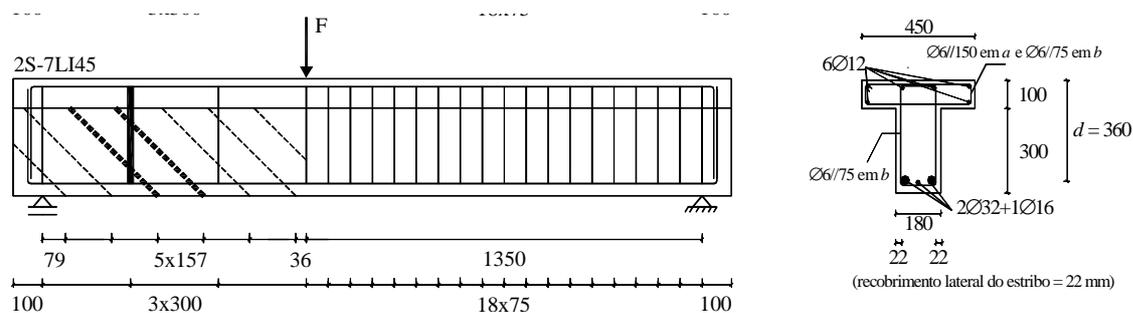


Figura A.2 – Características geométricas da viga 2S-7LI45 (Dias e Barros, 2012_a).

Tabela A.3 – Parâmetros necessários para aplicação da formulação de Nanni *et al.* (2004): exemplo 2.

Parâmetro	Nomenclatura	Valor
Valor médio da tensão de aderência (resistência da ligação colada)	τ_b^*	16.1 MPa
Extensão efetiva	ε_{fe}^*	5.9 ‰
Módulo de elasticidade do laminado de CFRP	E_f	170.9 GPa
Comprimento real de cada laminado de CFRP	l_b	424.3 mm
Recobrimento das armaduras longitudinais	rec	20 mm
Espaçamento dos laminados	s_f	157 mm
Dimensões dos laminados	$(a_f \times b_f)$	$1.4 \times 9.5 \text{ mm}^2$

* Como o reforço é com laminados de CFRP, para os parâmetros τ_b e ε_{fe} foram considerados os valores de 16.1 MPa e 5.9‰ (ver secção 3.3.1 do Capítulo 3).

Tabela A.4 – Aplicação da formulação de *Nanni et al.* (2004): exemplo 2.

Procedimento	Cálculos
<p>1. Determinação do parâmetro N</p> <p>O valor do parâmetro N é valor dado pela expressão seguinte arredondado para o inteiro mais baixo</p> $N = \frac{l_{eff}(1 + \cot \alpha)}{s_f}$ <p>O comprimento efetivo do CFRP na vertical l_{eff} é obtido por intermédio de:</p> $l_{eff} = l_b \sin \alpha - 2c$ <p>O α é a orientação do CFRP em relação ao eixo da viga e o parâmetro c é a espessura do betão de recobrimento das armaduras longitudinais</p> $c = r_{ec} + \phi_{estribo}$	$c = 20 + 6 = 26 \text{ mm}$ $l_{eff} = 424.3 \sin 45 - 2 \times 26 = 248 \text{ mm}$ $N = \frac{248(1 + \cot 45)}{157} = 3.16 \rightarrow 3$
<p>2. Determinação do parâmetro $L_{tot \min}$</p> <p>O parâmetro $L_{tot \min}$ corresponde ao somatório dos comprimentos de colagem efetivos dos CFRP que atravessam a fenda de corte (com inclinação admitida constante e igual a 45°) na posição mais desfavorável:</p> $L_{tot \min} = \sum_i L_i$ <p>em que o comprimento efetivo L_i de cada CFRP é obtido por:</p> $L_i = \begin{cases} \min\left(\frac{s_f}{\cos \alpha + \sin \alpha} i; l_{max}\right) & i = 1 \dots N/2 \\ \min\left(l_{net} - \frac{s_f}{\cos \alpha + \sin \alpha} i; l_{max}\right) & i = \frac{N}{2} + 1 \dots N \end{cases}$ <p>O comprimento efetivo do CFRP l_{net} é obtido por intermédio de:</p> $l_{net} = l_b - \frac{2c}{\sin \alpha}$ <p>O valor máximo admissível para o comprimento efetivo do CFRP l_{max} é determinado por:</p> $l_{max} = \frac{\varepsilon_{fe}}{2} \frac{a_f b_f E_f}{a_f + b_f \tau_b}$	$l_{max} = \frac{5.9 \times 10^{-3} \cdot 1.4 \times 9.5 \cdot 170.9 \times 10^3}{2 \cdot 1.4 + 9.5} \cdot 16.1 = 38.2 \text{ mm}$ $l_{net} = l_b - \frac{2c}{\sin \alpha} = 424.3 - \frac{2 \times 26}{\sin 45} = 350.8 \text{ mm}$ $L_1 = \min\left(\frac{157}{\cos 45 + \sin 45} \times 1; 38.2\right) = 38.2 \text{ mm}$ $L_2 = \min\left(350.8 - \frac{157}{\cos 45 + \sin 45} \times 2; 38.2\right) = 38.2 \text{ mm}$ $L_3 = \min\left(350.8 - \frac{157}{\cos 45 + \sin 45} \times 3; 38.2\right) = 17.7 \text{ mm}$ $L_{tot \min} = \sum_i L_i = L_1 + L_2 + L_3 = 38.2 + 38.2 + 17.7 = 94.1 \text{ mm}$
<p>3. Determinação do valor de cálculo da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal:</p> <p>O valor de cálculo da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal é obtido por intermédio de:</p> $V_{fd}^{Nanni} = \phi \psi_f (4(a_f + b_f) \tau_b L_{tot \min}) \sin \alpha$ <p>O valor de ϕ é de 0.85 e o valor de ψ_f é de 0.85.</p>	$V_{fd}^{Nanni} = 0.85 \times 0.85 \times (4 \times \left(\frac{1.4}{1000} + \frac{9.5}{1000}\right) \times 16.1 \times 94.1) \sin 45 = 33.7 \text{ kN}$

A.2 Aplicação da formulação de Dias e Barros (2013)

Nesta secção são apresentados dois exemplos de aplicação da formulação de Dias e Barros (2013) no cálculo do valor da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal de uma viga de betão armado reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos (técnica NSM).

A.2.1 Exemplo 1

O primeiro exemplo refere-se à viga 2S-7LV testada por Dias e Barros (2012_a). Trata-se da mesma viga usada no exemplo 1 da aplicação da formulação de Nanni *et al.* (2004), ou seja, uma viga com secção transversal em T que foi reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados na vertical. Os laminados, com secção transversal de $1.4 \times 9.5 \text{ mm}^2$, foram colocados com um espaçamento de 114 mm (Figura A.1). A viga no vão de corte onde foi aplicado o reforço de CFRP (Figura A.1) tinham estribos de 6 mm de diâmetro espaçados de 300 mm.

Tabela A.5 – Parâmetros necessários para aplicação da formulação de Dias e Barros (2013): exemplo 1.

Parâmetro	Nomenclatura	Valor
Largura da alma da viga	b_w	180 mm
Altura da alma da viga	h_w	300 mm
Resistência média à compressão do betão	f_{cm}	39.7 MPa
Módulo de elasticidade do laminado de CFRP	E_f	170.9 GPa
Módulo de elasticidade do aço dos estribos	E_s	200 GPa
Espaçamento dos laminados	s_f	114 mm
Dimensões dos laminados	$(a_f \times b_f)$	$1.4 \times 9.5 \text{ mm}^2$

Tabela A.6 – Aplicação da formulação de Dias e Barros (2013): exemplo 1.

Procedimento	Cálculos
<p>1. Determinação da taxa de reforço de CFRP e da taxa de armadura transversal</p> <p>A taxa de reforço de CFRP é dada por:</p> $\rho_f = \frac{2 \times a_f \times b_f}{b_w \times s_f \times \sin \theta_f}$ <p>A taxa de reforço de armadura transversal é dada por:</p> $\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w \times s_w}$	$\rho_f = \frac{2 \times 1.4 \times 9.5}{180 \times 114 \times \sin 90} = 0.001296$ $\rho_{sw} = \frac{56.55}{180 \times 300} = 0.001047$
<p>2. Cálculo do valor da extensão efetiva ε_{fe}</p> <p>O valor da extensão efetiva é dados por:</p> $\varepsilon_{fe} = C_1 \left[(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / f_{cm} \right]^{2/3} \gamma_f^{-C_2}$ <p>em que:</p> $C_1 = 3.76888 \times e^{-0.1160261 \rho_f + 0.0010437 \rho_f^2}$ $C_2 = -0.460679 \times e^{0.0351199 \rho_f - 0.0003431 \rho_f^2}$ $\gamma_f = 1.3$	$C_1 = 3.76888 \times e^{-0.1160261 \times 90 + 0.0010437 \times 90^2} = 0.516$ $C_2 = -0.460679 \times e^{0.0351199 \times 90 - 0.0003431 \times 90^2} = -0.675$ $\varepsilon_{fe} = \frac{0.516 \times \left[\left(\frac{170.9 \times 0.001296 +}{200 \times 0.001047} \right) / 39.7^{2/3} \right]^{-0.675}}{1.3} = 3.67 \text{ ‰}$
<p>3. Valor da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal obtido analiticamente</p> <p>O valor da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal é obtido por intermédio de:</p> $V_f = h_w \cdot \frac{A_{fv}}{s_f} \cdot f_{fe} \cdot (\cot \alpha + \cot \theta_f) \cdot \sin \theta_f$ <p>em que A_{fv} e f_{fe} são, respetivamente, a área de reforço ao corte de CFRP e a tensão efetiva do CFRP:</p> $A_{fv} = 2 \cdot a_f \cdot b_f$ $f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe}$	$A_{fv} = 2 \times \frac{1.4}{1000} \times \frac{9.5}{1000} = 0.0000266 \text{ m}^2$ $f_{fe} = 170900 \times 0.00367 = 627.2 \text{ MPa}$ $V_f =$ $= 0.3 \times \frac{0.0000266}{0.114} \times 627.2 \times 10^3 \times (1 + \cot 90) \times \sin 90 = 43.9 \text{ kN}$

A.2.2 Exemplo 2

O segundo exemplo refere-se à viga 2S-7LI45 testada por Dias e Barros (2012_a). Trata-se da mesma viga usada no exemplo 2 da aplicação da formulação de Nanni *et al.* (2004), ou seja, uma viga com secção transversal em T que foi reforçada ao corte com laminados de CFRP inseridos em entalhes efetuados a 45°. Os laminados, com secção transversal de 1.4×9.5 mm², foram colocados com um espaçamento de 157 mm (Figura A.2). A viga no vão de corte onde foi aplicado o reforço de CFRP (Figura A.2) tinham estribos de 6 mm de diâmetro espaçados de 300 mm.

Tabela A.7 – Parâmetros necessários para aplicação da formulação de Dias e Barros (2013): exemplo 2.

Parâmetro	Nomenclatura	Valor
Largura da alma da viga	b_w	180 mm
Altura da alma da viga	h_w	300 mm
Resistência média à compressão do betão	f_{cm}	39.7 MPa
Módulo de elasticidade do laminado de CFRP	E_f	170.9 GPa
Módulo de elasticidade do aço dos estribos	E_s	200 GPa
Espaçamento dos laminados	s_f	157 mm
Dimensões dos laminados	$(a_f \times b_f)$	1.4×9.5 mm ²

Tabela A.8 – Aplicação da formulação de Dias e Barros (2013): exemplo 2.

Procedimento	Cálculos
<p>1. Determinação da taxa de reforço de CFRP e da taxa de armadura transversal</p> <p>A taxa de reforço de CFRP é dada por:</p> $\rho_f = \frac{2 \times a_f \times b_f}{b_w \times s_f \times \sin \theta_f}$ <p>A taxa de reforço de armadura transversal é dada por:</p> $\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w \times s_w}$	$\rho_f = \frac{2 \times 1.4 \times 9.5}{180 \times 157 \times \sin 45} = 0.001331$ $\rho_{sw} = \frac{56.55}{180 \times 300} = 0.001047$
<p>2. Cálculo do valor da extensão efetiva ε_{fe}</p> <p>O valor da extensão efetiva é dados por:</p> $\varepsilon_{fe} = C_1 \left[(E_f \rho_f + E_s \rho_{sw}) / f_{cm} \right]^{2/3} / \gamma_f$ <p>em que:</p> $C_1 = 3.76888 \times e^{-0.1160261 \theta_f + 0.0010437 \theta_f^2}$ $C_2 = -0.460679 \times e^{0.0351199 \theta_f - 0.0003431 \theta_f^2}$ $\gamma_f = 1.3$	$C_1 = 3.76888 \times e^{-0.1160261 \times 45 + 0.0010437 \times 45^2} = 0.1685$ $C_2 = -0.460679 \times e^{0.0351199 \times 45 - 0.0003431 \times 45^2} = -1.1169$ $\varepsilon_{fe} = \frac{0.1685 \times \left[\left(\frac{170.9 \times 0.001331 +}{200 \times 0.001047} \right) / 39.7^{2/3} \right]^{-1.1169}}{1.3} = 5.07 \text{ ‰}$
<p>4. Valor da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal obtido analiticamente</p> <p>O valor da contribuição do CFRP na resistência ao esforço transversal é obtido por intermédio de:</p> $V_f = h_w \cdot \frac{A_{fv}}{s_f} \cdot f_{fe} \cdot (\cot \alpha + \cot \theta_f) \cdot \sin \theta_f$ <p>em que A_{fv} e f_{fe} são, respetivamente, a área de reforço ao corte de CFRP e a tensão efetiva do CFRP:</p> $A_{fv} = 2 \cdot a_f \cdot b_f$ $f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe}$	$A_{fv} = 2 \times \frac{1.4}{1000} \times \frac{9.5}{1000} = 0.0000266 \text{ m}^2$ $f_{fe} = 170900 \times 0.00507 = 866.5 \text{ MPa}$ $V_f =$ $= 0.3 \times \frac{0.0000266}{0.157} \times 866.5 \times 10^3 \times (1 + \cot 45) \times \sin 45 = 62.3 \text{ kN}$

