Avaliação das metodologias de dimensionamento para reforços à flexão de estruturas de betão armado com sistemas CFRP

Mariana Gato Canário

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Professor Doutor António José da Silva Costa

Doutor João Pedro da Lage da Costa Firmo

Júri

Presidente: Professor Doutor Orlando José Barreiros D'Almeida Pereira

Orientador: Doutor João Pedro da Lage da Costa Firmo

Vogal: Professor Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio

Outubro 2021

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Resumo

Com o aumento das intervenções de reabilitação e reforço de estruturas de betão armado, tornou-se necessário desenvolver técnicas adequadas de reparação e reforço, destacando-se a colagem de materiais compósitos reforçados com fibras (FRP), nomeadamente os constituídos por uma matriz à base de resina epóxida na qual são embebidas fibras de carbono (CFRP). A utilização crescente deste tipo de técnica foi acompanhada pelo desenvolvimento de estudos científicos, permitindo melhorar o conhecimento sobre o seu desempenho mecânico e desenvolver verificações de segurança para o seu dimensionamento; de facto, atualmente estão disponíveis diversos documentos sobre o tema.

Esta dissertação tem como objetivo principal analisar e comparar as principais recomendações de dimensionamento para elementos estruturais de betão armado reforçados à flexão com sistemas CFRP, instalados utilizando a técnica de colagem exterior (EBR) ou a de inserção no betão de recobrimento (NSM). Este estudo inicia-se com a apresentação das metodologias de dimensionamento para reforço à flexão com CFRP's preconizadas nos documentos atuais; seguidamente, aplicam-se as diferentes metodologias de dimensionamento num exemplo prático real; e, finalmente, as previsões de cargas de rotura obtidas através das diferentes metodologias são comparadas com as obtidas experimentalmente em ensaios de flexão de vigas e lajes de betão armado reforçadas com sistemas CFRP disponíveis na literatura.

Com base nos resultados obtidos conclui-se que os valores sugeridos pelos principais documentos para a extensão de dimensionamento do sistema CFRP são em geral, conservativos em relação aos experimentais, especialmente os que resultam da metodologia proposta no anexo do Eurocódigo 2.

Palavras-chave: betão armado, recomendações de dimensionamento, reforço à flexão com CFRP, EBR, NSM.

Abstract

With the increasing number of rehabilitation and strengthening interventions on reinforced concrete (RC) structures, there has been a need to develop adequate repair/strengthening techniques, such as external bonding of fibre reinforced polymer composites (FRP), namely those with epoxy matrix in which carbon fibres are embedded (CFRP). The increasing use of this strengthening technique was complemented by the development of scientific studies, allowing for a better understanding of its mechanical performance and for the development of design guidelines; several documents about the topic are available nowadays.

The main goal of this dissertation is to analyse and compare the current design recommendations for flexural strengthening of RC structures using CFRP systems, either applied using the externally bonded technique (EBR) or the near surface mounted reinforcement (NSM) technique. This study starts with a presentation of the methodologies recommended in the current documents for the design of RC structures flexurally strengthened with CFRP systems; then, the different design methodologies are applied to practical design examples; finally, the predictions of the failure load obtained according to the different methodologies are compared to those obtained in flexural tests of RC beams and slabs strengthened with CFRP systems, available in the literature.

Based on the results obtained in the present study it was possible to conclude that the values determined according to by the main documents for the design strain of CFRP systems are, in general, conservative when compared to the experimental ones, especially those obtained with the methodology proposed in the annex of Eurocode 2.

Keywords: reinforced concrete, design recommendations, flexural strengthening with CFRP, EBR, NSM.

Índice

Declaração i

Resumo iii

Abstract v

Índice de Figuras x

Índice de Tabelas xi

Simbologia xiii

1 Introdução 1

1.1 Enquadramento geral 1

1.2 Objetivos 2

1.3 Organização da dissertação 3

2 Revisão bibliográfica 5

2.1 Introdução 5

2.2 Características gerais dos materiais CFRP 5

2.3 Caracterização do reforço à flexão 6

2.4 Modos de rotura 8

2.4.1 Sistemas EBR 8

2.4.2 Sistemas NSM 9

2.5 Metodologias de dimensionamento para reforço de estruturas de betão a esforços de flexão com recurso a laminados de CFRP 10

2.5.1 Hipóteses de cálculo 10

2.5.2 Análise do documento Bulletin 14 da *fib* 11

2.5.2.1 Estado limite último de flexão 11

2.5.2.2 Verificações de destacamento do reforço CFRP 14

2.5.2.3 Recomendações em situações de serviço 16

2.5.3 Análise do documento *Bulletin 90 da fib* 16

2.5.3.1 Estado limite último de flexão 16

2.5.3.2 Verificações de destacamento do reforço CFRP 18

2.5.3.3 Recomendações em situações de serviço 21

2.5.3.4 Perda acidental do sistema CFRP – Reservas de segurança 21

2.5.4 Análise do documento ACI-440.2R-17 22

2.5.4.1 Estado limite último de flexão 22

2.5.4.2 Recomendações em situações de serviço 24
2.5.4.3 Perda acidental do sistema CFRP – Reservas de segurança 25
2.5.5 Análise do documento CNR-DT 200 R1/2012 25
2.5.5.1 Estado limite último de flexão 25
2.5.5.2 Verificações de destacamento do reforço CFRP 28
2.5.5.3 Recomendações em situações de serviço 28
2.5.5.4 Perda acidental do sistema CFRP – Reservas de segurança 29
2.5.6 Análise do documento *Annex J* do EC2 – parte 1 29
2.5.6.1 Estado limite último de flexão 29
2.5.6.2 Verificações de destacamento do reforço CFRP 29
2.5.6.3 Recomendações em situações de serviço 31
2.5.7 Comparação das abordagens de dimensionamento 32
3 Aplicação dos documentos selecionados para a técnica EBR 35
3.1 Introdução 35
3.2 Aplicação dos documentos selecionados num exemplo prático 35
3.2.1 Descrição e análise da estrutura existente 35
3.2.1.1 Estrutura existente 36
3.2.1.2 Propriedades mecânicas dos materiais e resistência dos elementos 37
3.2.2 Dimensionamento do reforço à flexão com sistema CFRP 37
3.2.2.1 Resultados obtidos para a laje e viga 39
3.2.2.2 Análise dos resultados obtidos para a laje e viga 40
3.3 Aplicação dos documentos selecionados comparando com resultados obtidos experimentalmente 40
3.3.1 Descrição dos ensaios experimentais 41
3.3.1.1 Considerações iniciais 41
3.3.1.2 Caso de estudo 1 41
3.3.1.3 Caso de estudo 2 43
3.3.1.4 Caso de estudo 3 44
3.3.2 Apresentação dos resultados obtidos com a utilização dos documentos selecionados 45
3.3.3 Análise comparativa dos resultados obtidos com os resultados experimentais 47
3.3.3.1 Comparação dos valores da extensão máxima do sistema CFRP 48

3.3.3.2 Comparação dos valores da carga resistente obtida 50
3.4 Considerações finais 52
4 Aplicação dos documentos selecionados para a técnica NSM 53
4.1 Introdução 53
4.2 Aplicação dos documentos selecionados num exemplo prático 53
4.2.1 Resultados obtidos para a laje e viga 54
4.2.2 Análise dos resultados obtidos para a laje e viga 55
4.2.3 Comparação dos resultados obtidos para o sistema EBR e NSM 55
4.3 Aplicação dos documentos selecionados comparando com resultados obtidos experimentalmente 56
4.3.1 Descrição dos ensaios experimentais 56
4.3.1.1 Caso de estudo 1 56
4.3.1.2 Caso de estudo 2 58
4.3.1.3 Caso de estudo 3 59
4.3.2 Apresentação dos resultados obtidos com a utilização dos documentos selecionados 60
4.3.3 Análise comparativa dos resultados obtidos com os resultados experimentais 61
4.3.3.1 Comparação dos valores da extensão última do sistema CFRP 61
4.3.3.2 Comparação dos valores da carga resistente obtida 62
4.4 Considerações finais 63
5 Conclusões e perspetivas de desenvolvimentos futuros 65
5.1 Conclusões 65
5.2 Perspetivas de desenvolvimentos futuros 66
Bibliografia 68
Anexos 70

Índice de Figuras

Figura 2.1 - a) reforço à flexão de uma laje com laminados de CFRP; b) reforço à flexão de vigas com laminados de CFRP (ambos sistemas EBR) 7
Figura 2.2 - Reforço à flexão de uma laje com laminado de CFRP pelo sistema NSM 7
Figura 2.3 - Modos de rotura de destacamento de um elemento de betão com sistema EBR 9
Figura 2.4 - Modos de rotura de destacamento de um elemento de betão com sistema NSM (10
Figura 2.5 - Análise da secção para o estado limite último de flexão: (a) geometria; (b) distribuição de extensões e (c) distribuição de tensões 12
Figura 2.6 - Força máxima resistente na zona de ancoragem no caso em que o comprimento de amarração é superior ao máximo 15
Figura 2.7 - Análise da secção para o estado limite último de flexão: (a) geometria; (b) distribuição de extensões e (c) distribuição de forças 17
Figura 2.8 - Representação esquemática da profundidade efetiva do sistema CFRP para a técnica NSM 18
Figura 2.9 - Representação esquemática da distância ar 21
Figura 2.10 - Análise da secção para o estado limite último de flexão: (a) geometria; (b) distribuição de extensões e (c) distribuição de tensões 23
Figura 2.11 - Modos de rotura de um elemento reforçado com sistema FRP (modo1 - extensão máxima no betão à compressão e modo 2 - extensão máxima de tração do sistema FRP 27
Figura 2.12 - Elemento reforçado com sistema CFRP com fendas de flexão adjacentes 31
Figura 3.1 - Planta da laje do edifício. 36
Figura 3.2 – Corte A-A da laje na direção mais condicionante com a representação das armaduras. 36
Figura 3.3 - Secção da viga que necessita de reforço (Corte B-B). 36
Figura 3.4 - Parâmetros para a determinação da largura efetiva do banzo 38
Figura 3.5 - Características da secção da viga do caso de estudo 1 42
Figura 3.6 - Modelo de cálculo da viga do caso de estudo 1 42
Figura 3.7 - Características da secção da viga do caso de estudo 2 43
Figura 3.8 - Modelo de cálculo da viga do caso de estudo 2 43
Figura 3.9 - Rotura da viga por destacamento do laminado CFRP com arranque do betão de recobrimento 44
Figura 3.10 - Características da secção da laje do caso de estudo 3. 44
Figura 3.11 - Modelo de cálculo da laje do caso de estudo 3 45
Figura 3.12 - Rotura da faixa de laje por destacamento do laminado CFRP na zona de ancoragem 45
Figura 4.1 - Características da secção da viga do caso de estudo 1. 57
Figura 4.2 - Modelo de cálculo da viga do caso de estudo 1 57
Figura 4.3 - Rotura da viga por destacamento do laminado CFRP com fendilhação expressiva 57
Figura 4.4 - Características da secção da viga do caso de estudo 2. 58

Figura 4.5 - Modelo de cálculo da viga do caso de estudo 2 58
Figura 4.6 - Rotura da viga por destacamento da camada de betão de recobrimento que inclui os laminados de CFRP 59
Figura 4.7 - Características da secção da laje do caso de estudo 3 59
Figura 4.8 - Rotura da faixa de laje por destacamento do laminado CFRP pela extremidade associado a fendas por corte 60

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Principais características de resinas epóxidas 6
Tabela 2.2 - Principais características físicas e mecânicas dos laminados CFRP comercializados em Portugal 7
Tabela 2.3 - Extensões de dimensionamento dos laminados de CFRP recomendadas pelos principais fabricantes a atuar em Portugal (Sika e S&P). 13
Tabela 2.4 - Extensões dos elementos para os dois modos de rotura 27
Tabela 2.5 - Diferentes valores limite da extensão do CFRP para a técnica EBR conforme o documento 33
Tabela 2.6 - Diferentes valores limite da extensão do CFRP para a técnica NSM conforme o documento 33
Tabela 2.7 - Diferença entre os documentos relativamente à limitação de tensão de tração do sistema CFRP em serviço 34
Tabela 3.1 - Resumo das propriedades mecânicas dos materiais da estrutura a reforçar. 37
Tabela 3.2 - Momento resistente da laje e viga V2 a reforçar. 38
Tabela 3.3 - Extensão do sistema CFRP obtida através dos diferentes documentos. 39
Tabela 3.4 - Área de laminado obtida através dos diferentes documentos. 40
Tabela 3.5 - Características do aço, betão e laminados do caso de estudo 1 41
Tabela 3.6 - Características do aço, betão e laminados do caso de estudo 2 43
Tabela 3.7 - Características do aço, betão e laminado do caso de estudo 3 44
Tabela 3.8 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento fib 14. 46
Tabela 3.9 - Carga máxima resistente obtida através de métodos de verificação de segurança complementares relativos a fenómenos de destacamento do sistema CFRP utilizando o documento fib 14 [expressão (2.15)]. 46
Tabela 3.10 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento fib 90. 46
Tabela 3.11 Carga máxima resistente obtida através de métodos de verificação de segurança complementares relativos a fenómenos de destacamento do sistema CFRP utilizando o documento fib 90 [expressão (2.15) com alterações referidas na secção 2.5.3.2]. 46
Tabela 3.12 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento americano ACI. 47

Tabela 3.13 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento da CNR. 47
Tabela 3.14 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento Anexo J. 47
Tabela 3.15 - Carga máxima resistente obtida através de métodos de verificação de segurança complementares relativos a fenómenos de destacamento do sistema CFRP utilizando o documento Anexo J [expressão (2.86)]. 47
Tabela 3.16 - Comparação da extensão máxima do sistema CFRP obtida através dos documentos e experimentalmente. 48
Tabela 3.17 - Valores obtidos para a extensão máxima do sistema CFRP utilizando o método mais complexo do documento Anexo J. 49
Tabela 3.18 - Comparação da carga resistente considerando a verificação da capacidade resistente à flexão com a carga obtida experimentalmente. 50
Tabela 3.19 - Comparação da carga resistente obtida pelos métodos de verificação de segurança complementares relativos a fenómenos de destacamento. 51
Tabela 4.1 - Extensão do laminado obtida através dos diferentes documentos. 54
Tabela 4.2 - Área de laminado obtida através dos diferentes documentos. 54
Tabela 4.3 - Comparação das áreas obtidas pelos diferentes sistemas de reforço. 55
Tabela 4.4 - Características do aço, betão e laminados do caso de estudo 1 56
Tabela 4.5 - Características do aço, betão e laminados do caso de estudo 2 58
Tabela 4.6 - Características do reforço do caso de estudo 3 59
Tabela 4.7 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento Bulletin 90 da fib. 60
Tabela 4.8 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento ACI. 60
Tabela 4.9 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento Anexo J. 61
Tabela 4.10 - Comparação entre a extensão máxima do sistema CFRP obtida através dos documentos com os valores experimentais. 61
Tabela 4.11 - Comparação da carga resistente obtida pelos diferentes documentos com a carga obtida experimentalmente. 62

Simbologia

Símbolos latinos	Definição
a_{ba}	Fator específico do produto para o comportamento a longo prazo do adesivo
a_{bc}	Fator específico do produto para o comportamento a longo prazo do betão
A_f	Área do laminado
a_{fE}	Distância entre o apoio e o fim do laminado
a_r	Distância livre entre o fim do elemento e o CFRP
A_{s1}	Área das armaduras tracionadas
A_{s2}	Área das armaduras comprimidas
b	Largura da secção de betão
b	Largura do banzo
b_{eff}	Largura efetiva do banzo
b_f	Largura do laminado
b_w	Largura da alma da secção
c	Posição da linha neutra
d	Distância entre a fibra superior da secção e o centro de gravidade das armaduras
d_1	Distância das armaduras longitudinais de tração à superfície inferior do elemento
d_2	Distância das armaduras longitudinais de compressão à superfície superior do elemento
d_f	Profundidade efetiva do sistema
d_{s1}	Distância entre a fibra superior da secção e o centro de gravidade das armaduras
d_{s2}	Distância das armaduras longitudinais de compressão à superfície superior do elemento
E_f	Módulo de elasticidade do laminado de CFRP
E_s	Módulo de elasticidade das armaduras
f_{ack}	Resistência à compressão característica do adesivo
f_{atk}	Resistência à tração característica do adesivo
f_{bd}	Tensão de aderência entre o sistema FRP e o betão
$f_{bfk,máx}$	Tensão resistente máxima da ancoragem
f_{bfRd}	Tensão resistente máxima da ancoragem
FC	Fator de confiança
F_c	Força resultante da tensão de compressão no betão
$f_c{}'$	Valor de cálculo da tensão máxima de compressão no betão

f_{cbd}	Tensão de corte resistente entre o reforço e o betão
f_{cd}	Valor de cálculo da tensão máxima de compressão no betão
f_{cm}	Valor médio de resistência à compressão
f_{ctk}	Valor característico da resistência do betão à tração
f_{ctm}	Valor médio da tensão de rotura à tração do betão
$f_{ctm,surf}$	Resistência média à tração superficial do betão
f_{ck}	Valor característico da resistência à compressão do betão
F_f	Força resultante da tensão de tração nos laminados
F_{fb}	Força máxima resistente do CFRP
f_{fb}	Tensão de resistência máxima do reforço para sistema NSM
F_{fbd}	Resistência máxima por laminado de sistema NSM
$f_{fbd,IC}$	Média do valor da tensão resistente de aderência
$F_{fEd,a}$	Tensão de resistência na fenda A
$F_{fEd,b}$	Tensão de resistência na fenda B
$F_{fEd}(x)$	Tensão no sistema CFRP
f_{fdd}	Tensão máxima permitida na zona de ancoragem
$f_{fdd,2}$	Tensão máxima do sistema CFRP
$f_{fdd,rid}$	Tensão máxima permitida quando o comprimento de amarração é inferior ao ótimo
f_{fk}	Valor característico da tensão máxima resistente do CFRP
f_{fk}	Valor característico da resistência à tração
$f_{f,s}$	Tensão no CFRP para o carregamento de serviço
f_{fu}	Tensão resistente à tração do CFRP
F_s	Força resultante da tensão de tração nas armaduras
f_s	Tensão de tração das armaduras
f_{yd}	Valor de cálculo da tensão de cedência do aço
f_{yk}	Valor característico da tensão de cedência o aço
G_f	Energia de fratura
h	Altura da secção de betão
k	Coeficiente dependente da altura ou espessura do elemento estrutural
k_1	Fator de redução da área de secção de betão comprimido
k_2	Fator de redução da distância ao centro de aplicação de esforços de compressão
k_b	Fator que tem em conta a geometria da ligação
k_{bck}	Fator específico do produto para a rotura por destacamento do betão
k_c	Fator que tem em conta o estado de compacidade do betão

k_g	Fator corretivo adicional
$k_{G,2}$	Fator corretivo
k_{sys}	Fator do específico do produto para a rotura por destacamento do adesivo
$k_{sys,b1}$	Fator de sistema específico do produto
$k_{sys,b2}$	Fator de sistema específico do produto
$k_{sys,b3}$	Fator de sistema específico do produto
k_{tc}	Coeficiente que considera o efeito na resistência à compressão do betão de cargas com duração prolongada
k_{tt}	Coeficiente que considera o efeito na resistência à tração do betão de cargas com duração prolongada
k_q	Coeficiente que tem em conta a distribuição do carregamento
L	Largura do vão do elemento
l_b	Comprimento de amarração
l_e	Comprimento efetivo de aderência
l_{ed}	Comprimento ótimo de amarração
$l_{b,máx}$	Comprimento de amarração máximo
$M_{E,0}(x)$	Momento fletor atuante na altura da aplicação do reforço
$M_{Ed}(x)$	Momento fletor atuante depois do reforço
M_n	Momento fletor resistente nominal
M_{rd}	Momento resistente do elemento
M_{sd}	Momento atuante
M_u	Momento fletor atuante de cálculo
P	Carga máxima resistente
p_f	Perímetro da secção do reforço de CFRP
R_n	Resistência nominal do elemento
s_0	Capacidade de deformação do sistema CFRP
$s_{cr,min}$	Espaçamento mínimo entre fendas
$s_{cr,máx}$	Espaçamento máximo entre fendas
S_{DL}	Ações permanentes consideradas no dimensionamento do reforço
s_{f0k}	Deslizamento máximo da ligação
S_{LL}	Ações variáveis consideradas no dimensionamento do reforço
s_r	Espaçamento entre fendas
t_f	Espessura do laminado
$T_{fa,máx}$	Força máxima resistente na zona de ancoragem
T_{fa}	Força resistente na zona de ancoragem
V	Esforço transverso na secção em causa
V_{ED}	Máximo esforço transverso na zona do apoio
$V_{Rd,cfE}$	Resistência máxima para não ocorrer separação entre o laminado

	e o betão
x	Posição da linha neutra
w_{DL}	Valor da carga permanente
w_{LL}	Valor de carga variável
w_u	Valor da carga de dimensionamento
z	Braço entre forças de tração e compressão, igual a 0,9d
z_m	Altura média

Símbolos gregos	Definição
α	Coeficiente de monolitismo
α_{cc}	Coeficiente que considera o efeito do carregamento a longo prazo
β_1	Parâmetro que tem em conta o valor característico de resistência do betão
β_l	Fator que depende do comprimento de aderência
Γ_{Fd}	Energia de fratura
γ_{BA}	Coeficiente de segurança do material de ligação permanente/transitória
γ_c	Coeficiente minorativo da resistência do betão
γ_f	Coeficiente de segurança do material de resistência do CFRP
γ_{fb}	Coeficiente de segurança do material de ligação permanente/transitória
$\gamma_{f,d}$	Fator parcial de materiais CFRP
γ_{Rd}	Fator parcial de resistência
Δf_{fEd}	Diferença de tensões no CFRP entre fendas
$\Delta f_{fk,B}$	Resistência da ligação por adesão entre fendas
$\Delta f_{fk,C}$	Resistência de ligação devido à curvatura da viga
$\Delta f_{fk,F}$	Resistência da ligação por atrito
ΔF_{fRd}	Diferença de tensões de ligação do elemento entre fendas
Δf_{fRd}	Tensão resistente de ligação entre fendas adjacentes
$\Delta M_{Ed}(x)$	Diferença de momentos fletores
δ_G	Fator de redução da distância ao centro de aplicação de esforços de compressão
ε_0	Extensão na fibra da extremidade da secção durante o reforço
ε_c	Extensão de compressão do betão
ε_{cu}	Extensão na rotura por compressão do betão
ε_f	Extensão do laminado
ε_{fd}	Valor limite de dimensionamento da extensão do laminado
ε_{fdd}	Extensão para a qual ocorre o fenómeno de destacamento do

	laminado CFRP
ε_{fu}	Extensão última do sistema CFRP
ε_{fud}	Extensão para a qual ocorre o fenómeno de destacamento do laminado CFRP
ε_{fk}	Valor característico da extensão de rotura à tração do sistema FRP
ε_s	Extensão das armaduras
ε_{s1}	Extensão das armaduras tracionadas
ε_{s2}	Extensão das armaduras comprimidas
ε_{sy}	Extensão de cedência do aço
ε_{syd}	Extensão das armaduras na cedência
ε_{syk}	Extensão das armaduras na cedência
η	Coeficiente limite de tensão no FRP
η_{cc}	Fator que tem em conta a diferença entre a resistência à compressão dos provetes cilíndricos e a resistência efetiva da estrutura
κ_h	
λ	Parâmetro que tem em conta o valor característico de resistência do betão
ρ_1	Rácio entre a armadura de aço à tração e a área da alma da secção
σ_f	Tensão de tração para a combinação de cargas quase permanentes para evitar rotura do sistema CFRP
$\sigma_s(x)$	Tensão do aço
$\sigma_{s0}(x)$	Tensão do aço durante o reforço
σ_{s1}	Tensão das armaduras tracionadas
σ_{s2}	Tensão das armaduras comprimidas
τ_{b1d}	Resistência de ligação
τ_{b1k}	Valor característico da tensão de corte resistente
τ_{bak}	Resistência característica de ligação do adesivo
τ_{bck}	Resistência ao corte/de aderência do betão
τ_{bFk}	Valor característico da resistência da ligação por atrito
τ_{f1k}	Valor característico da tensão de corte resistente
τ_{Rd}	Tensão resistente de aderência
ψ	Fator de redução da área de secção de betão comprimido
ψ_f	Fator de redução da capacidade mecânica do CFRP
$\emptyset$	Fator de redução da resistência

1 Introdução

1.1 Enquadramento geral

A primeira metade do século XX é caracterizada por uma evolução extraordinária na utilização do betão e na compreensão do seu comportamento, tornando-se rapidamente o principal material de construção em aplicações estruturais. No entanto, ao contrário do que se pensava no início desse século, o betão armado não é um material eterno, apresentando-se, pelo contrário, sensível a determinados ambientes, podendo apresentar elevada deterioração ao longo do tempo. A deterioração de estruturas resultante do envelhecimento induzido pelas ações ambientais, do projeto e/ou construção deficiente, da falta de manutenção e de causas acidentais tem levado à sua degradação crescente. A necessidade de reparação e reforço é cada vez mais frequente e combinada com a utilização das estruturas para novas funções, designadamente utilizações diferentes de edifícios, maiores volumes de tráfego em pontes e viadutos e modificação do sistema estrutural. Estas são algumas das razões pelas quais a reabilitação de estruturas de betão tem recebido grande atenção por parte da indústria da construção.

De entre as várias técnicas de reforço de estruturas de betão, destaca-se a utilização de materiais compósitos reforçados com fibras (FRP's, do termo inglês "*Fiber Reinforced Polymers*"). Estes materiais podem ser constituídos por fibras de carbono, vidro, basalto ou aramida embebidas numa matriz polimérica, em geral de poliéster, vinilléster ou epóxida. Este tipo de materiais apresenta como principais vantagens face aos materiais tradicionais (por exemplo, em relação ao aço) a sua elevada resistência à tração, a reduzida massa volúmica, a elevada resistência à corrosão e à fadiga e uma notável facilidade de transporte e aplicação. Por isto, os FRP's têm sido utilizados em inúmeras operações de reforço de estruturas de betão armado, nomeadamente para o reforço à flexão e esforço transverso de vigas e lajes e ao esforço axial de pilares. Dos vários tipos de FRP's, os constituídos por uma matriz à base de resina epóxida na qual são embebidas fibras de carbono (CFRP's, do termo inglês "*Carbon Fiber Reinforced Polymers*") são os que apresentam características que melhor se adaptam à maioria das situações de reforço.

No entanto, apesar das vantagens enumeradas anteriormente, a utilização de CFRP's apresenta um custo relativamente elevado e alguns aspetos específicos do seu comportamento impedem que sejam uma alternativa incontestável relativamente às técnicas e materiais tradicionais. Este material apresenta uma relação constitutiva linear até à rotura, exibindo, por isso, um comportamento frágil. Além disso, e apesar de a sua tensão resistente à tração ser bastante elevada, os mecanismos de rotura prematuros do sistema de reforço na ligação betão-CFRP são relativamente frequentes, impedindo que a capacidade resistente do CFRP seja completamente explorada. Refira-se ainda que estes mecanismos apresentam também um comportamento frágil.

Ao longo dos últimos anos, o comportamento mecânico de elementos de betão armado reforçados com CFRP's foi alvo de estudos relativamente profundos, existindo, por isso, verificações de

segurança em diversos documentos que, direta ou indiretamente, tentam minimizar a ocorrência de roturas prematuras e a redução de ductilidade dos elementos onde são aplicados.

Apesar de existirem vários documentos internacionais que abordam recomendações relativas ao dimensionamento do reforço de estruturas de betão armado com sistemas CFRP, em Portugal não existem normas sobre o tema. Por isso, o dimensionamento de um reforço com CFRP pode resultar em áreas bastante diferentes conforme o documento técnico escolhido pelo projetista. Neste contexto, importa realçar a próxima versão do Eurocódigo 2 (EC2) que incluirá um anexo (J) informativo sobre o dimensionamento destes sistemas. Assim, torna-se relevante proceder a uma comparação das recomendações dos principais documentos técnicos existentes (incluindo o referido anexo do EC2) de forma a analisar as suas diferenças e perceber quais as vantagens e desvantagens de utilização de cada um.

1.2 Objetivos

Os critérios de dimensionamento adotados pelo projetista e os procedimentos de construção recomendados para o reforço de estruturas de betão com sistemas CFRP podem ter implicações técnico-financeiras significativas, podendo condicionar a viabilidade da utilização deste tipo de sistemas/materiais. Neste contexto, o presente trabalho pretende analisar as propostas dos seguintes documentos técnicos de referência:

- *Bulletin 14 da fib* (2001) [1];
- *Bulletin 90 da fib* (2019) [2];
- *Model Code 2010* (ponto 6.2 Ligação de reforços não metálicos) [5];
- ACI-440.2R-17 de *American Concrete Institute* (2017) [3];
- CNR-DT 200 R1/2012: *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures* (2014) [4];
- *Annex J* do EC2 – parte 1 (2020) [6].

Procura-se encontrar os pontos comuns e os de divergência entre as filosofias de dimensionamento de sistemas CFRP colados para o reforço de estruturas de betão armado.

O objetivo principal deste trabalho consiste em analisar as recomendações feitas para o dimensionamento de elementos estruturais de betão armado reforçados com sistemas CFRP, instalados de acordo com a técnica de colagem exterior (EBR) ou a técnica de inserção no betão de recobrimento (NSM). De modo a atingir estes objetivos, definiu-se um faseamento do trabalho composto por:

a) Elaboração de uma pesquisa bibliográfica sobre as propostas normativas e critérios de dimensionamento e verificação de segurança existentes;
b) Desenvolvimento de folhas de cálculo automático obedecendo às propostas normativas dos vários documentos selecionados;
c) Aplicação das folhas de cálculo a um projeto real, tanto para a técnica EBR como NSM;

d) Pesquisa de trabalhos de investigação com ensaios experimentais em elementos de betão armado reforçados à flexão com sistemas CFRP instalados de acordo com as técnicas EBR e NSM;
e) Estudo comparativo de resultados experimentais com os previstos de acordo com as propostas normativas, obtidos através das folhas de cálculo, incluindo a discussão das diferenças encontradas.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. Seguidamente, procede-se à descrição sumária de cada capítulo.

No presente capítulo apresenta-se o âmbito deste estudo, os seus objetivos e a organização do documento.

No segundo capítulo apresentam-se as principais características dos materiais FRP's em geral, e dos CFRP's em particular, descrevendo-se sumariamente as propriedades dos materiais constituintes, as principais propriedades físicas e mecânicas e as técnicas de reforço de estruturas de betão em que são aplicados. De seguida, apresentam-se os principais modos de rotura de cada tipo de técnica de reforço (EBR e NSM) e as principais recomendações e indicações dos diferentes documentos selecionados para o dimensionamento do reforço à flexão de estruturas de betão armado com sistemas CFRP (nomeadamente as hipóteses de cálculo assumidas, o dimensionamento para o estado limite último de flexão, verificações necessárias para evitar o destacamento do sistema CFRP, principais recomendações para situações de serviço e reservas de segurança necessárias).

No terceiro capítulo pretende-se fazer uma comparação dos métodos de cálculo expostos nos documentos apresentados, para a verificação da segurança à flexão de lajes e vigas de betão armado reforçadas com laminados de fibras de carbono através do sistema EBR, assim como, a verificação de segurança do destacamento do laminado de CFRP. Para tal, as diferentes metodologias aplicam-se num exemplo prático real, nomeadamente no reforço de um piso de um edifício, para perceber as implicações das recomendações dos diferentes documentos nas áreas de reforço necessárias. Além desse exemplo prático de dimensionamento, as metodologias dos diferentes documentos serão utilizadas para prever e comparar cargas de rotura obtidas experimentalmente em ensaios de flexão de vigas e lajes de betão armado reforçadas com sistemas CFRP disponíveis na literatura.

No quarto capítulo é feito um estudo semelhante ao capítulo anterior para a técnica de reforço com CFRPs instalados de acordo com a técnica NSM, sendo novamente aplicadas as recomendações dos vários documentos relativos a este tipo de reforço no mesmo exemplo prático real, bem como na previsão e comparação de cargas de rotura obtidas experimentalmente em ensaios de flexão de vigas e lajes de betão armado reforçadas com sistemas CFRP disponíveis na literatura.

Finalmente, no quinto capítulo apresentam-se as principais conclusões, obtidas da comparação entre as várias recomendações dos diferentes documentos apresentados.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Introdução

Neste capítulo sintetiza-se a evolução das recomendações dos principais documentos para o dimensionamento do reforço à flexão de estruturas de betão armado com materiais compósitos reforçados com fibras, em particular com fibras de carbono.

Numa primeira fase apresenta-se uma breve descrição das principais propriedades do material CFRP (secção 2.2); de seguida, descrevem-se as técnicas de reforço à flexão e os seus modos de rotura mais comuns (secção 2.3 e 2.4) e, por fim, as metodologias de dimensionamento do reforço à flexão segundo os documentos selecionados (secção 2.5).

2.2 Características gerais dos materiais CFRP

Um material compósito resulta da combinação de dois ou mais materiais que, quando usados isoladamente, podem não ter utilização como materiais de construção, mas que, quando combinados, e mantendo uma interface identificável, podem constituir um novo material. Este é o caso do CFRP que consiste num material compósito constituído por fibras de carbono embebidas numa matriz polimérica. As fibras garantem ao compósito a resistência e rigidez, enquanto a matriz, protege as fibras da ação direta de agentes ambientais, assegura uma melhor distribuição de tensões pelo sistema fibroso e evita a encurvadura das fibras quando o compósito é submetido a esforços de compressão. Para além disso, estes materiais compósitos podem também conter aditivos e material de enchimento (*filler*), que permitem melhorar certas propriedades e o próprio processo de fabrico [1].

Em relação às fibras de carbono, estas apresentam custo elevado quando comparadas com as de vidro, no entanto, caracterizam-se por elevados valores de tensão última e de módulo de elasticidade, associados a um reduzido peso próprio; refira-se que à temperatura ambiente estas não são afetadas pela humidade e ação de vários solventes, ácidos e bases.

Relativamente à matriz polimérica, esta é constituída essencialmente por resina que pode ser termoplástica ou termoendurecível, dependendo das propriedades que se pretende obter, do custo de produção e modo de cura a adotar. No entanto, em FRPs para aplicações em engenharia civil, as resinas mais utilizadas são as termoendurecíveis, nomeadamente poliéster, viniléster, epóxidas e fenólicas ([1],[11]).

Os materiais de enchimento (*filler*) são produtos quimicamente inertes que permitem a redução do custo dos compósitos e a melhoria significativa de algumas propriedades físicas e mecânicas, nomeadamente o comportamento ao fogo, dureza, resistência à fadiga e à fluência, resistência química e a agentes de degradação ambiental. Os compostos mais utilizados como *filler* são o carbonato de cálcio, o caulino, a alumina e o sulfato de cálcio [11].

É importante referir, também, que a colagem do CFRP ao betão é realizada através de um adesivo, que permite a transferência de tensões, possibilitando a ação conjunta dos dois materiais. Os

adesivos estruturais mais utilizados são as resinas epóxidas. Na tabela 2.1 apresentam-se os intervalos de valores das principais características mecânicas de resinas epóxidas.

Tabela 2.1 - Principais características de resinas epóxidas ([9], [11]).

Propriedade	Intervalo de valores
Módulo de elasticidade (GPa)	2 – 4,1
Resistência à tração (MPa)	55 – 130
Resistência à compressão (MPa)	80 – 120
Extensão na rotura (%)	1 – 9
Massa volúmica (g/cm^3)	1,2 – 1,3
Temperatura de transição vítrea (ºC)	50 - 270

Os materiais compósitos de CFRP utilizados no reforço de estruturas existentes surgem nas seguintes formas: laminados, mantas, varões e cordões.

No reforço à flexão por colagem de CFRPs são utilizados laminados e mantas. Os laminados resultam da impregnação de um conjunto de camadas contínuas de fibras por uma resina termoendurecível, consolidadas num processo de pultrusão realizado em fábrica com controlo da espessura e largura do compósito. As fibras têm uma orientação unidirecional permitindo a maximização da resistência e da rigidez na direção longitudinal do laminado, no entanto, as propriedades nas outras direções são significativamente inferiores. As mantas são constituídas por fibras contínuas unidirecionais ou orientadas em duas direções principais. Este material é polimerizado "*in situ*", sendo fornecido em estado seco ou pré-impregnado, e necessita de uma resina de saturação que é responsável pela transferência de esforços entre as fibras e entre o compósito e o substrato a reforçar ([1], [2], [12]).

2.3 Caracterização do reforço à flexão

Os compósitos de CFRP mais utilizados em reforço para esforços de flexão em estruturas de betão armado são os laminados e as mantas, geralmente, com as fibras paralelas à direção das tensões principais do elemento a reforçar. Os elementos mais comuns a reforçar são as lajes, vigas e pilares.

O reforço à flexão com materiais CFRP pode ser feito através de dois sistemas/técnicas: EBR (*externally bonded reinforcement*) em que o CFRP (mantas ou laminados) é colado nas faces exteriores dos elementos; e NSM (*near surface mounted*) em que os laminados ou varões são inseridos e colados no interior de rasgos executados no betão de recobrimento [2].

Na presente dissertação analisa-se, sobretudo, o reforço à flexão de lajes e vigas com laminados de CFRP aplicados de acordo com as técnicas EBR e NSM. Na figura 2.1 apresenta-se o reforço à flexão de uma laje e vigas com laminados de CFRP através do sistema EBR e na figura 2.2 apresenta-se o reforço à flexão de uma laje com laminados de CFRP pelo sistema NSM.

a)

b)

Figura 2.1 - a) reforço à flexão de uma laje com laminados de CFRP; b) reforço à flexão de vigas com laminados de CFRP (ambos sistemas EBR) ([1], [2]).

Figura 2.2 - Reforço à flexão de uma laje com laminado de CFRP pelo sistema NSM [2].

A utilização de materiais CFRP para o reforço de estruturas de betão apresenta inúmeras vantagens quando comparado com outros FRPs (vidro e aramida), realçando-se a sua elevada resistência à tração, valores de módulo de elasticidade elevados (semelhantes aos valores do aço), bom comportamento à fadiga e boa resistência química, nomeadamente à corrosão. No entanto, apresentam, também, desvantagens para além do seu custo e do facto de apresentar um comportamento elástico linear; um comportamento anisotrópico, em que as propriedades podem ser muito diferentes nas várias direções, dependendo da arquitetura de fibras; baixa resistência ao fogo e destacamento prematuro do CFRP do betão. Na tabela 2.2 apresentam-se os intervalos de algumas propriedades físicas e mecânicas dos laminados comercializados em Portugal pelas empresas *Sika* e *S&P* (atualmente as de maior expressão no mercado nacional).

Tabela 2.2 - Principais características físicas e mecânicas dos laminados CFRP comercializados em Portugal (adaptado de [8], [7]).

Propriedade	**Intervalo de valores**
Módulo de elasticidade (GPa)	165 – 240
Resistência à tração (MPa)	2800 – 3600
Extensão na rotura à tração (%)	0,5 – 1,70
Percentagem volúmica de fibras (%)	67 – 70
Massa volúmica (kg/m^3)	1650 a 2100
Temperatura de transição vítrea mínima (ºC)	50
Largura do laminado (mm)	50 – 150
Espessura do laminado (mm)	1,2 – 1,4

2.4 Modos de rotura

Para que seja possível definir os critérios de dimensionamento e de verificação de segurança dos elementos reforçados à flexão com sistemas CFRP aplicados de acordo com as técnicas EBR ou NSM, é necessário identificar e analisar os seus modos de rotura.

2.4.1 Sistemas EBR

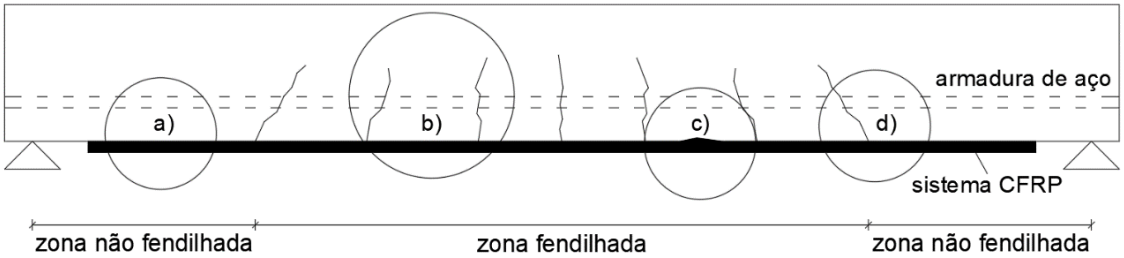
Os modos de rotura nos elementos reforçados à flexão com laminados de carbono instalado pelo sistema EBR podem-se dividir em três grupos:

- Modos de rotura característicos de elementos de betão armado;
- Rotura à tração do reforço em CFRP;
- Modos de rotura por destacamento (*i.e*. perda de aderência) do reforço em CFRP.

Os modos de rotura característicos de elementos de betão armado estão relacionados com os fenómenos de esmagamento do betão, rotura do aço e rotura do betão por corte. Na sequência da cedência do aço, pode ocorrer rotura à tração do CFRP ou esmagamento do betão (neste caso o CFRP fica intacto).

Em relação aos modos de rotura por destacamento do CFRP, designados por modos de rotura prematura, podem ocorrer em várias zonas do elemento e representam-se esquematicamente na figura 2.3, enumerando-se de seguida [1]:

- Destacamento do sistema CFRP na zona de amarração sem fendilhação do betão, por falha da aderência ao betão [modo a) da figura 2.3];
- Destacamento do sistema CFRP devido a fendas de flexão na zona central do elemento. Estas fendas verticais de flexão no betão podem propagar-se horizontalmente pela interface betão-CFRP provocando o destacamento em zonas afastadas da extremidade do laminado [modo b) da figura 2.3];
- Destacamento do sistema CFRP devido à fendilhação por corte. Este modo de rotura pode ocorrer devido à dispensa prematura do reforço CFRP não ser a adequada ou devido à rotura do substrato de betão provocado pelas elevadas tensões de corte [modo d) da figura 2.3];
- Destacamento localizado do sistema CFRP devido à irregularidade ou rugosidade da superfície de betão [modo c) da figura 2.3].



Legenda:
- **modo a)**: destacamento do CFRP na zona de ancoragem;
- **modo b)**: destacamento do CFRP devido a fendas de flexão;
- **modo c)**: destacamento do CFRP devido a irregularidade na superfície do betão;
- **modo d)**: destacamento do CFRP devido a fendilhação por corte.

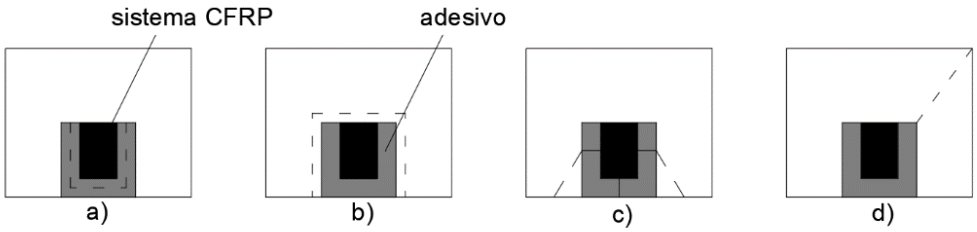
Figura 2.3 - Modos de rotura de destacamento de um elemento de betão com sistema EBR (adaptado de [1]).

Os modos de rotura por destacamento do reforço são indesejáveis pois são do tipo frágil, ou seja, ocorrem de forma brusca e repentina, o que faz com que em muitos casos não se tire um maior partido da elevada resistência do material, devido à diferença de rigidez comparativamente ao betão e às tensões de corte geradas na ligação (colada) entre estes materiais.

2.4.2 Sistemas NSM

À semelhança do sistema EBR, nos elementos reforçados à flexão pelo sistema NSM podem ocorrer os mesmos modos de rotura característicos de elementos de betão. Em relação aos modos de rotura por destacamento estes podem ocorrer em várias zonas do elemento e encontram-se representados esquematicamente na figura 2.4, enumerando-se de seguida [2]:

- Destacamento entre a interface do CFRP e do adesivo, ocorrendo por falha pura na interface ou por falha na coesão do adesivo [modo a) da figura 2.4];
- Destacamento entre a interface do adesivo e o betão, ocorrendo, novamente, por falha pura na interface ou por falha na coesão do betão [modo b) da figura 2.4];
- Rotura por fratura do adesivo, nomeadamente fendilhação longitudinal da ranhura com enchimento de adesivo acompanhado ou não de fratura do betão circundante [modo c) da figura 2.4];
- Destacamento do betão de recobrimento, podendo ocorrer em várias zonas do elemento, nomeadamente, na zona de ancoragem ou na zona final o elemento, por fendilhação devido à flexão e/ou ao corte e destacamento localizado [modo d) da figura 2.4].



Legenda:
- **modo a)**: destacamento entre a interface do CFRP e do adesivo;
- **modo b)**: destacamento entre a interface do adesivo e do betão;
- **modo c)**: rotura por fratura do adesivo;
- **modo d)**: destacamento do betão de recobrimento.

Figura 2.4 - Modos de rotura de destacamento de um elemento de betão com sistema NSM (adaptado de [2]).

Ao contrário do sistema EBR, os modos de rotura por destacamento do reforço NSM ocorre de forma mais progressiva (i.e. menos frágil) e a resistência da ligação entre CFRP-betão é, em geral, superior.

2.5 Metodologias de dimensionamento para reforço de estruturas de betão a esforços de flexão com recurso a laminados de CFRP

Nesta secção da dissertação apresentam-se as principais recomendações para o dimensionamento de reforços à flexão em elementos de betão armado com recurso a sistemas CFRP. Para esta análise, os documentos selecionados foram os seguintes:

- *Bulletin 14 da fib* (2001) [1];
- *Bulletin 90 da fib* (2019) [2];
- *Model Code 2010* (ponto 6.2 Ligação de reforços não metálicos) [5];
- ACI-440.2R-17 de *American Concrete Institute* (2017) [3];
- CNR-DT 200 R1/2012: *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures* (2014) [4];
- *Annex J* do EC2 – parte 1 (2020) [6].

De seguida, apresenta-se as hipóteses de cálculo assumidas nos vários documentos, assim como os pontos mais importantes de cada documento, de forma a analisar as diferenças de dimensionamento à flexão entre cada um, bem como a evolução ao longo do tempo destas metodologias.

2.5.1 Hipóteses de cálculo

Desde logo, é necessário apresentar claramente as hipóteses de cálculo assumidas no dimensionamento à flexão do reforço para o estado limite último, nomeadamente ([2],[3]):

- ligação perfeita entre o betão e o sistema de reforço, isto é, considera-se que não há escorregamento entre o CFRP e o substrato de betão (na realidade não existe esta ligação

perfeita, pois verifica-se alguma deformação por corte no adesivo, que causa um escorregamento relativo entre o CFRP e o substrato, no entanto, dados os valores reduzidos deste escorregamento é usual desprezar-se no dimensionamento);

- a preparação da superfície do betão é suficiente para alcançar o nível de resistência de ligação necessário;
- as ações a que a estrutura está sujeita no momento de aplicação do CFRP conduzem a uma resposta do elemento dentro da gama elástica.
- as extensões no reforço, no aço e no betão são diretamente proporcionais à distância à linha neutra, ou seja, as secções mantêm-se planas após o carregamento;
- os cálculos da resistência são baseados nas dimensões existentes, disposição de armaduras e nas propriedades dos materiais do elemento a ser reforçado;
- a resistência do betão à tração é ignorada;
- o reforço de CFRP tem comportamento elástico linear até à rotura.

Conhecendo as hipóteses de cálculo assumidas no dimensionamento à flexão do reforço para o estado limite último nos vários documentos, pode-se agora proceder à análise individual de cada documento. Assim, será feita uma análise das recomendações relativas ao estado limite último de flexão, das verificações necessárias para evitar o destacamento do sistema CFRP, das recomendações para a situação de serviço e algumas reservas de segurança que se deve ter em conta. Na secção seguinte, apresenta-se a análise do documento Bulletin 14 da *fib.*

2.5.2 Análise do documento Bulletin 14 da *fib*

O Bulletin 14 da *fib* (publicado em 2001) apenas tem recomendações de dimensionamento relativas ao reforço de sistemas CFRP pela técnica EBR, não tendo qualquer referência à técnica NSM.

2.5.2.1 Estado limite último de flexão

Primeiramente, importa referir que para o dimensionamento do sistema CFRP, este documento tem em conta dois modos de rotura distintos: rotura por esmagamento do betão à compressão ou rotura por destacamento do laminado. O método de cálculo para ambos os modos de rotura é semelhante, apresentando apenas algumas alterações que serão descritas de seguida.

Assim, considerando que o modo de rotura de uma secção transversal crítica ocorre por esmagamento do betão à compressão com cedência do aço das armaduras tracionadas, o cálculo do momento fletor resistente após o reforço para o estado limite último é obtido através de relações de equilíbrio da secção, calculando em primeiro lugar a posição da linha neutra x, através da seguinte expressão que traduz o equilíbrio de forças axiais,

$$0{,}85\,\psi\, f_{cd}\, b\, x + A_{s2}\, E_s\, \varepsilon_{s2} = A_{s1}\, f_{yd} + A_f\, E_f\, \varepsilon_f \qquad (2.1)$$

em que $\psi = 0{,}8$, f_{cd} corresponde ao valor de cálculo da tensão máxima de compressão no betão, f_{yd} corresponde ao valor de cálculo da tensão de cedência do aço, E_f corresponde ao módulo de

elasticidade do CFRP, E_s corresponde ao módulo de elasticidade das armaduras e as restantes variáveis podem observar-se na figura 2.5, sendo que,

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu}\frac{x - d_2}{x} \tag{2.2}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu}\frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \tag{2.3}$$

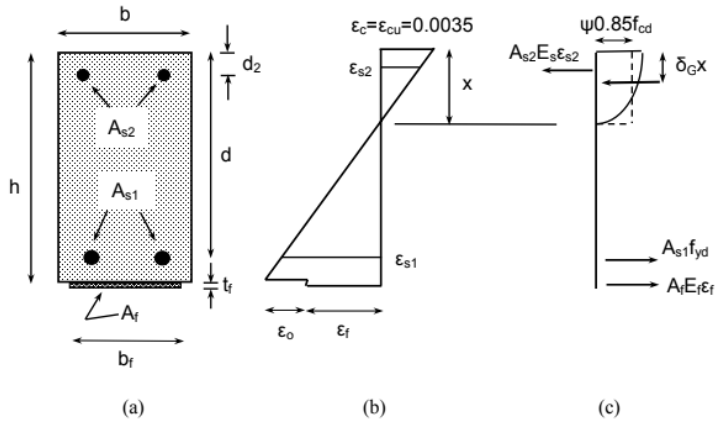


Figura 2.5 - Análise da secção para o estado limite último de flexão: (a) geometria; (b) distribuição de extensões e (c) distribuição de tensões [1].

Na figura anterior é necessário definir os seguintes parâmetros:

- ε_c – extensão de compressão do betão, que deverá no máximo ser 3,5‰ (extensão na rotura por compressão $\varepsilon_{cu} = 3{,}5‰$);
- ε_{s2} – extensão das armaduras comprimidas;
- ε_{s1} – extensão das armaduras tracionadas;
- ε_0 - extensão na fibra da extremidade da secção durante o reforço;
- ε_f – extensão do laminado;
- A_f – área do laminado;
- b_f – largura do laminado;
- t_f – espessura do laminado;
- b – largura da secção de betão;
- h - altura da secção de betão;
- d - distância entre a fibra superior da secção e o centro de gravidade das armaduras;
- d_2 – distância das armaduras longitudinais de compressão à superfície superior do elemento
- A_{s2} – área das armaduras comprimidas;
- A_{s1} – área das armaduras tracionadas.

Os parâmetros definidos acima são utilizados ao longo de todo o capítulo nos diferentes documentos.

O valor de cálculo do momento resistente obtém-se através da seguinte expressão [1],

$$M_{rd} = A_{s1}\, f_{yd}(d - \delta_G\, x) + A_f\, E_f\, \varepsilon_f(h - \delta_G\, x) + A_{s2}\, E_s\, \varepsilon_{s2}(\delta_G\, x - d_2) \tag{2.4}$$

em que $\delta_G = 0{,}4$. Para que se verifique a rotura do elemento por compressão do betão após cedência das armaduras, as condições seguintes devem ser respeitadas:

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu}\frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \tag{2.5}$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu}\frac{d - x}{h - x} \tag{2.6}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu}\frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud} \tag{2.7}$$

Na condição (2.7) é importante definir ε_{fud} que corresponde à extensão para a qual ocorre o fenómeno de destacamento do CFRP. O Bulletin 14 da *fib* recomenda limitar esta extensão entre 0,0065 e 0,0085, no entanto, não clarifica se este valor está afetado por coeficientes de segurança. De modo a analisar os valores sugeridos pelo documento, verificou-se as recomendações dos fabricantes com maior expressão em Portugal (*Sika* e *S&P)* para a extensão de dimensionamento dos laminados, apresentados na tabela 2.3, e percebeu-se que estes se encontram dentro do intervalo de valores sugeridos pelo documento Bulletin 14 da *fib*.

Tabela 2.3 - Extensões de dimensionamento dos laminados de CFRP recomendadas pelos principais fabricantes a atuar em Portugal (Sika e S&P) (adaptado de [7], [8]).

	Tipo de laminados	**Extensão de dimensionamento**
S&P	150/2000	0,00823
	200/2000	0,00715
Sika	Tipo S	0,0085
	Tipo M	0,0065

Nota: Tipo S – Módulo de elasticidade E=165000 MPa; Tipo M – Módulo de elasticidade E=210000 MPa.

Os valores indicados na tabela 2.3 são os definidos nos boletins de Informação Técnica do CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, para o sistema Sika (Avis Technique 3/10-669: 2011) e para o sistema S&P (Avis Technique 3/14-773: 2014). Estes valores correspondem à extensão de dimensionamento, como tal, estariam afetados por coeficientes de segurança, parecendo, por isso, viável utilizar os valores recomendados pelo documento *fib 14* como valores de dimensionamento.

Em relação ao modo de rotura por destacamento do CFRP, este verifica-se quando a condição (2.7) não é respeitada, e o método de determinação do valor de cálculo do momento resistente é semelhante ao apresentado anteriormente, alterando apenas ε_{cu} para ε_c, ε_f para ε_{fud}, passando ψ e δ_G a ser determinados da seguinte forma:

$$\psi = \begin{cases} 1000\, \varepsilon_c \left(0{,}5 - \dfrac{1000}{12}\varepsilon_c\right) & para\ \varepsilon_c \leq 0{,}002 \\ 1 - \dfrac{2}{3000\, \varepsilon_c} & para\ 0{,}002 \leq \varepsilon_c \leq 0{,}0035 \end{cases} \tag{2.8}$$

$$\delta_G = \begin{cases} \dfrac{8 - 1000\,\varepsilon_c}{4\,(6 - 1000\,\varepsilon_c)} & para\ \varepsilon_c \leq 0{,}002 \\ \dfrac{1000\,\varepsilon_c(3000\,\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\,\varepsilon_c\,(3000\,\varepsilon_c - 2)} & para\ 0{,}002 \leq \varepsilon_c \leq 0{,}0035 \end{cases} \tag{2.9}$$

Nas condições anteriores, ε_c determina-se da seguinte forma:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{fud}\,\frac{x}{h - x} \tag{2.10}$$

De seguida, apresentam-se as verificações complementares relativas ao destacamento do sistema CFRP.

2.5.2.2 Verificações de destacamento do reforço CFRP

A rotura por destacamento do sistema CFRP ou perda de aderência são modos de rotura frequentes e devem ser analisados com cuidado e ser evitados sempre que possível. O documento *Bulletin 14* da *fib* faz três recomendações relativas a estas verificações.

A primeira verificação de segurança está relacionada com o destacamento do reforço na zona de ancoragem [modo a) da figura 2.3], envolvendo o cálculo do respetivo comprimento de amarração (l_b) e o valor máximo da força resistente na zona da ancoragem ($T_{fa,máx}$), que é alcançada quando o comprimento de amarração é igual ou superior ao máximo ($l_{b,máx}$). Na figura 2.6 representa-se as variáveis descritas. Estes parâmetros são determinados através das expressões (2.11) e (2.12),

$$T_{fa,máx} = \alpha\ 0{,}64\ b_f\ k_b\ k_c \sqrt{E_f\ t_f\ f_{ctm}} \tag{2.11}$$

$$l_{b,máx} = \sqrt{\frac{E_f\ t_f}{2\ f_{ctm}}} \tag{2.12}$$

em que α corresponde ao coeficiente de monolitismo, tomando o valor de 0,9 para ter em conta as fendas inclinadas na ligação ou 1 para vigas com armadura para o esforço transverso interna e externa suficiente e para lajes, f_{ctm} trata-se do valor médio da tensão de rotura à tração do betão, k_c trata-se do fator que tem em conta o estado de compacidade do betão, e que, geralmente, toma o valor unitário, exceto quando o reforço adere a superfícies de baixa compacidade, situação em que se considera $k_c = 0{,}67$ e k_b corresponde ao fator que tem em conta a geometria da ligação, dado pela expressão (2.13),

$$k_b = 1{,}06 \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/400}} \geq 1 \tag{2.13}$$

onde b_f e b são grandezas definidas anteriormente (figura 2.5), tendo que b_f/b ser maior ou igual a 0,33.

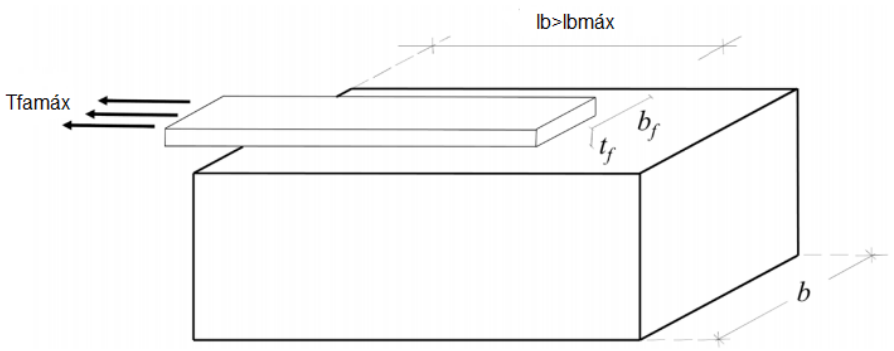


Figura 2.6 - Força máxima resistente na zona de ancoragem no caso em que o comprimento de amarração é superior ao máximo [2].

No entanto, caso se adote um comprimento de amarração (l_b) inferior a $l_{b,máx}$, a força resistente de aderência é dada pela seguinte expressão,

$$T_{fa} = T_{fa,máx} \frac{l_b}{l_{b,máx}} \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,máx}}\right) \tag{2.14}$$

Na segunda verificação de segurança assume-se que o fenómeno de arrancamento do laminado pode ocorrer a partir de fendas de flexão [modo d) da figura 2.3]. Este método é possivelmente o que melhor simula/prevê o fenómeno do arrancamento, no entanto tem uma complexidade considerável, que torna difícil a sua aplicação em situações correntes de projeto, não sendo, por isso, apresentada com pormenor nesta dissertação. São três os passos principais a realizar neste método:

- determinação do espaçamento entre fendas mais desfavorável;
- determinação das forças de tração existentes entre duas fendas subsequentes;
- determinação do acréscimo máximo de tensões de tração na ligação.

A terceira verificação está relacionada com o destacamento do reforço numa zona afastada da extremidade devido a elevadas tensões de corte na ligação betão-CFRP [modo b) da figura 2.3]. Assim, para verificar a segurança a este modo de rotura, é necessário verificar as seguintes condições,

$$\begin{cases} \dfrac{V}{0{,}95\, d\, b_f \left(1 + \dfrac{A_{s1}\, E_s}{A_f\, E_f}\right)} \leq f_{cbd} \quad para\ \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{syd} \\ \dfrac{V}{0{,}95\, d\, b_f} \leq f_{cbd} \quad para\ \varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{syd} \end{cases} \tag{2.15}$$

em que V corresponde ao esforço transverso na secção em causa, ε_{syd} trata-se da extensão de cedência das armaduras e f_{cbd} corresponde à tensão de corte resistente entre o reforço e o betão, dada pela expressão (2.16),

$$f_{cbd} = 1{,}8 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} \tag{2.16}$$

em que f_{ctk} corresponde ao valor característico da resistência do betão à tração e γ_c corresponde ao coeficiente minorativo da resistência do betão, de valor 1,5.

A verificação das condições apresentadas na expressão (2.15) é possível após a determinação da secção do elemento a partir da qual as armaduras se encontram em cedência, quando esta é sujeita à carga de dimensionamento.

2.5.2.3 Recomendações em situações de serviço

Em relação às verificações em situação de serviço, nomeadamente abertura de fendas e deslocamentos máximos dos elementos reforçados com sistemas CFRP, o documento *Bulletin 14 da fib* apenas recomenda que sejam respeitadas as exigências relativas a estruturas de betão armado não reforçadas. As recomendações relativas às limitações para as tensões no betão e no aço, para prevenir danos ou deformações excessivas no betão e cedência da armadura, devem seguir as diretrizes do Eurocódigo 2. No entanto, para os sistemas CFRP recomenda a seguinte limitação de tensão de tração para a combinação de cargas quase permanentes, de modo a evitar a rotura por fluência do laminado:

$$\sigma_f = E_f \left(\varepsilon_c \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \right) \leq \eta f_{fk} \tag{2.17}$$

em que f_{fk} trata-se do valor característico da tensão máxima resistente do CFRP e η<1 é o coeficiente limite de tensão no CFRP. Este coeficiente depende do tipo de FRP, devendo ser obtido experimentalmente, no entanto, o documento sugere o valor de 0,8 para CFRP's.

2.5.3 Análise do documento *Bulletin 90 da fib*

O documento *Bulletin 90 da fib* (publicado em 2019) apresenta algumas evoluções em relação ao documento apresentado na secção anterior e passa a contemplar recomendações relativas ao sistema NSM, sendo a sua principal diferença a recomendação do valor da extensão de dimensionamento do sistema CFRP, passando a ser utilizada uma expressão para o seu cálculo explícito tanto para o sistema EBR como para o sistema NSM. Nesta análise serão apenas apresentadas as diferenças significativas em relação ao *Bulletin* 14 da *fib*.

2.5.3.1 Estado limite último de flexão

Para o cálculo do momento resistente após o reforço, as expressões são semelhantes às apresentadas na secção anterior, apenas com algumas diferenças. Os parâmetros ψ e δ_G passam a designar-se por k_1 e k_2, e são obtidos com as expressões (2.8) e (2.9), respetivamente, para todos os modos de rotura, não apresentando nenhum valor fixo como no documento anterior. A posição da linha neutra determina-se com a expressão (2.1), em que passam a ser utilizadas as tensões das armaduras nos cálculos e não as extensões multiplicadas pelo módulo de elasticidade. O valor de cálculo do momento resistente obtém-se através da expressão (2.4), mas, uma vez mais, em função das tensões cujas expressões se apresentam de seguida [(2.18) e (2.19)]. As restantes variáveis estão definidas na figura 2.7.

$$\sigma_{s1} = min\left(\varepsilon_c \frac{d_{s1}-x}{x}, \frac{f_{yd}}{E_s} \right) E_s \tag{2.18}$$

$$\sigma_{s2} = min\left(\varepsilon_c \frac{x-d_{s2}}{x}, \frac{f_{yd}}{E_s} \right) E_s \tag{2.19}$$

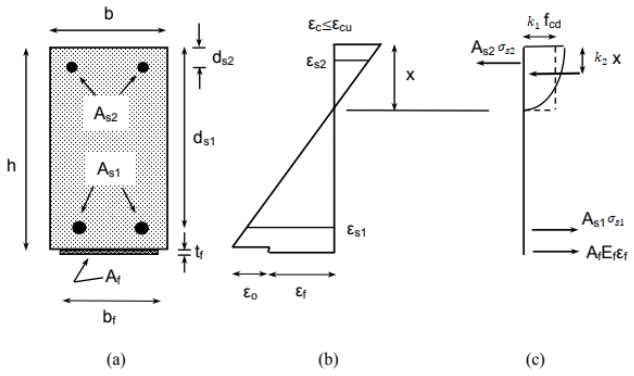


Figura 2.7 - Análise da secção para o estado limite último de flexão: (a) geometria; (b) distribuição de extensões e (c) distribuição de forças [2].

A extensão no CFRP é obtida através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \tag{2.20}$$

Em relação à extensão máxima do CFRP para o sistema EBR, o documento apresenta duas recomendações, no entanto, nesta dissertação apresenta-se apenas a recomendação mais simplificada e de cálculo expedito. Trata-se de uma abordagem simplificada da tensão limite do CFRP, em que no estado limite último considera-se que o máximo momento fletor num elemento reforçado à flexão pode ser calculado assumindo que no sistema CFRP a tensão não excede o valor da tensão resistente de aderência ($f_{fbd,IC}$), que se obtém através das seguintes equações:

$$f_{fbd,IC} = \beta_l \frac{k_{cr}\, k\, k_b \sqrt{\frac{2\, E_f}{t_f} f_{cm}^{2/3}}}{\gamma_{fb}} \tag{2.21}$$

em que β_l corresponde ao fator que depende do comprimento de aderência definido na expressão (2.28) apresentada na secção seguinte, k_{cr} toma o valor de 1,8 para o valor característico e 2,1 para o valor médio, k toma o valor de 0,17 para o valor característico e 0,25 para o valor médio, k_b corresponde à equação (2.27) apresentada na secção seguinte, f_{cm} trata-se do valor médio de resistência à compressão do betão e $\gamma_{fb} = 1{,}5$.

O correspondente valor da extensão de dimensionamento máxima do CFRP para sistemas EBR (ε_{fbd}) obtém-se através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_{fbd} = \frac{f_{fbd,IC}}{E_f} \tag{2.22}$$

O valor dado pela expressão anterior deve ser adotado nas zonas críticas do elemento reforçado, isto é, nas secções onde o momento fletor é máximo e onde se assume a formação de fendas por flexão ou corte.

Para o sistema NSM, a extensão máxima de dimensionamento do sistema CFRP é dada pela seguinte expressão,

$$\varepsilon_{fbd} = \eta \frac{f_{fk}}{\gamma_f \, E_f} \tag{2.23}$$

em que $\eta = 0{,}8$, $\gamma_f = 1{,}25$ e f_{fk} corresponde ao valor característico da resistência à tração.

Outra diferença relativamente ao sistema EBR é a profundidade efetiva do sistema (d_f), que é dada pela seguinte expressão,

$$d_f = h - \left(t_s - \frac{b_f}{2}\right) \tag{2.24}$$

em que as variáveis apresentadas se encontram definidas anteriormente e apresentam-se esquematicamente na figura 2.8.

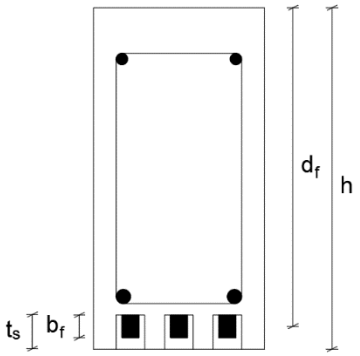


Figura 2.8 - Representação esquemática da profundidade efetiva do sistema CFRP para a técnica NSM (adaptado de [2]).

2.5.3.2 Verificações de destacamento do reforço CFRP

Em relação aos modos de rotura por destacamento do sistema de reforço ou perda de aderência para sistemas EBR, o documento *Bulletin 90 da fib* faz três recomendações semelhantes às apresentadas anteriormente no documento *Bulletin 14 da fib*. Para a primeira recomendação relativa à segurança contra a rotura por destacamento na zona de ancoragem, este documento apresenta, também, algumas diferenças. A força máxima resistente do CFRP, F_{fb}, depende do comprimento de amarração, l_b. F_{fb} aumenta com l_b até um valor máximo correspondente a um certo comprimento l_e, designado por comprimento efetivo de aderência e corresponde ao comprimento mínimo de aderência capaz de assegurar a transferência da força máxima (F_{fb}) entre o betão e o CFRP. As expressões relativas a estas variáveis apresentam-se de seguida,

$$l_e = \frac{\pi \, s_0}{k_b \, k} \sqrt{\frac{E_f \, t_f}{8 \, f_{cm}^{2/3}}} \tag{2.25}$$

$$F_{fb} = \beta_l \, b_f \sqrt{2 E_f \, t_f \, G_f} \tag{2.26}$$

em que assumindo $s_0 = 0{,}25 \, mm$, o valor do coeficiente k pode tomar os valores de 0,25 ou 0,17 para valor médio e para valor característico 5%, respetivamente, k_b corresponde à expressão (2.27), β_l corresponde ao fator que depende do comprimento de aderência definido na expressão (2.28), G_f

trata-se da energia de fratura definida na expressão (2.29) e as restantes variáveis definiram-se anteriormente.

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \geq 1 \tag{2.27}$$

$$\beta_l = \begin{cases} \frac{l_b}{l_e}\left(2 - \frac{l_b}{l_e}\right) < 1 \; se \; l_b < l_e \\ 1 \; se \; l_b \geq l_e \end{cases} \tag{2.28}$$

$$G_f = k^2 \, k_b^2 \, f_{cm}^{2/3} \tag{2.29}$$

Esta primeira recomendação é feita de igual forma no documento *Model Code 2010* (*ponto 6.2 - Ligação de reforços não metálicos*), por isso, não se considerou necessário que este documento fosse analisado separadamente, pois nada acrescenta à abordagem do *Bulletin 90 da fib.*

Para a segunda recomendação relativa ao destacamento do reforço numa zona entre fendas, o *Bulletin* 90 da *fib* apresenta vários métodos, sendo apenas considerado nesta dissertação o método de resolução mais simplificada. O documento apresenta uma análise simplificada da diferença de tensões do elemento entre fendas, considerando a extensão do aço existente aquando do reforço e assumindo que a extensão do sistema CFRP não deve exceder 0,01 e a extensão máxima definida anteriormente [equação (2.22)]. A zona do elemento entre fendas considera-se que começa no ponto de momento máximo e estende-se até à a zona onde o momento é zero. A diferença de tensões de ligação do elemento entre fendas obtém-se através da seguinte expressão,

$$\Delta F_{fRd} = \frac{2{,}3 \, \tau_{b1k} \sqrt{s_r} + 0{,}1 \, \tau_{bFk} \, s_r^{4/3} + \frac{\kappa_h}{h} \, s_r^{1/3}}{\gamma_{fb}} \, b_f \tag{2.30}$$

em que $\kappa_h = 2000$ para elementos reforçados, o espaçamento entre fendas s_r tem o limite máximo de 400 mm, τ_{b1k} corresponde ao valor característico da tensão de corte resistente determinado através da expressão (2.31), τ_{bFk} trata-se do valor característico da resistência da ligação por atrito, que se determina através da expressão (2.32) e γ_{fb} o fator de segurança com o valor de 1,5 e as restantes variáveis encontram-se definidas anteriormente.

$$\tau_{b1k} = 0{,}72 \sqrt{f_{cm} \, f_{ctm}} \tag{2.31}$$

$$\tau_{bFk} = 10{,}8 \, \alpha_{cc} \, f_{cm}^{-0{,}89} \tag{2.32}$$

Na expressão anterior (2.32), α_{cc} tem em conta o efeito do carregamento a longo prazo e com valor entre 0,8 e 1.

Por simplificação, a tensão no sistema CFRP, $F_{fEd}(x)$, pode ser obtida com base na tensão do aço, como demonstrado de seguida,

$$F_{fEd}(x) = \begin{cases} \frac{\Delta M_{Ed}(x)}{z_m} \frac{d_f \, E_f \, A_f}{d_f \, E_f \, A_f + d_{s1} \, E_s \, A_s} & para \; \sigma_s(x) < f_{yd} \\ \frac{\Delta M_{Ed}(x)}{z_m} - A_s \, f_{yd} & para \; \sigma_s(x) = f_{yd} \end{cases} \tag{2.33}$$

em que $\Delta M_{Ed}(x)$ corresponde à diferença de momentos fletores de acordo com a seguinte expressão: $\Delta M_{Ed}(x) = M_{Ed}(x) - M_{E,0}(x)$, sendo $M_{Ed}(x)$ o momento fletor atuante depois do reforço e $M_{E,0}(x)$ o momento fletor atuante na altura da aplicação do reforço, $\sigma_s(x)$ corresponde à tensão do aço obtida através da expressão (2.35) e z_m corresponde a uma altura média obtida através da expressão (2.34).

$$z_m = 0{,}8\ \frac{d_f\ E_f\ A_f + d_{s1}\ E_s\ A_s}{E_f\ A_f + E_s\ A_s} \tag{2.34}$$

$$\sigma_s(x) = \sigma_{s0}(x) + \frac{\Delta M_{Ed}(x)}{z_m}\ \frac{d_{s1}\ E_s}{d_f\ E_f\ A_f + d_{s1}\ E_s\ A_s} \leq f_{yd} \tag{2.35}$$

Na expressão (2.35), $\sigma_{s0}(x)$ corresponde à tensão do aço durante o reforço, obtida aproximadamente através da expressão seguinte,

$$\sigma_{s0}(x) = \frac{M_{E,0}(x)}{0{,}85\ d_{s1}\ A_s} \leq f_{yd} \tag{2.36}$$

Para a terceira recomendação relacionada com o destacamento do reforço numa zona afastada da extremidade, a condição é igual à apresentada anteriormente (2.15), apenas com uma diferença: a tensão de corte resistente passa a ser definida por τ_{Rd} em vez de f_{cbd}. A tensão resistente de aderência obtém-se através da seguinte expressão,

$$\tau_{Rd} = \frac{0{,}23\ \tau_{b1k} + 0{,}45\ \tau_{bFk} + \frac{92{,}8}{h}}{\gamma_{fb}} \tag{2.37}$$

em que as variáveis se encontram definidas anteriormente.

Para sistemas NSM, o documento recomenda uma expressão geral, independente da zona de destacamento no elemento, para a tensão de aderência máxima do reforço, apresentada de seguida:

$$f_{fb} = \sqrt{\frac{2\ E_f\ G_f\ p_f}{A_f}} \tag{2.38}$$

em que G_f trata-se da energia de fratura definida na expressão (2.29) e p_f e A_f correspondem ao perímetro e área da secção do reforço de CFRP, respetivamente.

No entanto, apresenta outra recomendação mais complexa para a resistência máxima por cada laminado de sistema NSM:

$$F_{fbd} = 0{,}95\ b_f\ \tau_{b1d}\ \sqrt[4]{a_r}\ l_b\ (0{,}4 - 0{,}0015\ l_b) \text{ para } l_b \leq 115\ mm \tag{2.39}$$

$$F_{fbd} = 0{,}95\ b_f\ \tau_{b1d}\ \sqrt[4]{a_r}\ \left(26{,}2 + 0.065 \tanh\left(\frac{a_r}{70}\right)(l_b - 115)\right) \text{ para } l_b > 115\ mm \tag{2.40}$$

em que a_r corresponde à distância livre entre o fim do elemento e o CFRP representada esquematicamente na figura 2.9 e deve respeitar a condição (2.41), τ_{b1d} corresponde à resistência de ligação dada pela expressão (2.42).

$$a_r = max\{100\ mm, a_r\} \tag{2.41}$$

$$\tau_{b1d} = \frac{1}{\gamma_{fb}} min \begin{cases} \tau_{bak}\ a_{ba} \\ \tau_{bck}\ a_{bc} \end{cases} \tag{2.42}$$

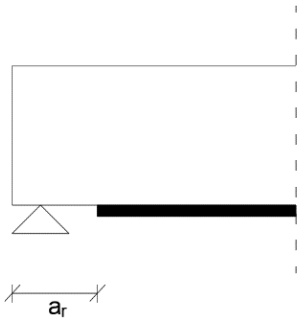


Figura 2.9 - Representação esquemática da distância a_r (adaptado de [2]).

Na expressão (2.42), τ_{bak} corresponde à resistência característica de ligação do adesivo dada pela expressão (2.43), a_{ba} corresponde ao fator específico do produto para o comportamento a longo prazo do adesivo com valor de 0,5, a_{bc} corresponde ao fator específico do produto para o comportamento a longo prazo do betão com valor de 0,9 e τ_{bck} corresponde à resistência ao corte/de aderência do betão dada pela expressão (2.44).

$$\tau_{bak} = k_{sys} \sqrt{\left(2\, f_{atk} - 2\sqrt{f_{atk}^2 + f_{ack} + f_{atk}} + f_{ack}\right) f_{atk}} \tag{2.43}$$

$$\tau_{bck} = k_{bck}\, {f_{cm}}^{0,5} \tag{2.44}$$

Na expressão (2.43), f_{ack} corresponde à resistência à compressão característica do adesivo em MPa, f_{atk} corresponde à resistência à tração característica do adesivo em MPa e k_{sys} corresponde ao fator específico do produto para a rotura por destacamento do adesivo que pode ser calibrado experimentalmente, ou para efeitos de pré dimensionamento o documento sugere o valor de 0,6. Na expressão (2.44), k_{bck} corresponde ao fator específico do produto para a rotura por destacamento do betão que pode ser calibrado experimentalmente, ou para efeitos de pré dimensionamento o documento sugere o valor de 4,5.

2.5.3.3 Recomendações em situações de serviço

Relativamente às recomendações para o estado limite de serviço, estas são iguais às analisadas anteriormente no ponto 2.5.2.3 (para o documento *Bulletin 14 da fib)* tanto para sistemas EBR como NSM.

2.5.3.4 Perda acidental do sistema CFRP – Reservas de segurança

O documento *Bulletin 90 da fib* apresenta algumas reservas de segurança tendo em conta que quando se reforça uma estrutura de betão armado com laminados de CFRP através da técnica EBR ou NSM, estes podem ficar sujeitos a atos de vandalismo, impactos ou outras causas que provoquem a perda total do compósito (ex: incêndio). Assim, o documento sugere que se considere o reforço com CFRP como um reforço secundário, de modo que, caso haja perda do reforço, seja assegurado pelo elemento de betão não reforçado, o nível de resistência necessário para a estrutura não colapsar. Esta verificação de segurança deve ser feita para o estado limite último considerando os fatores de

segurança relativos aos materiais com valor de 1 e os coeficientes parciais de segurança relativos às ações devem ser reduzidos considerando-se a combinação frequente de ações. No entanto, definir o reforço de CFRP como reforço secundário pode restringir a utilização de taxas de reforço muito elevadas, o que não é de todo vantajoso, dada a elevada capacidade resistente que este tipo de técnica pode alcançar. Por isso, o documento recomenda a consideração dos seguintes aspetos para que se possa tirar total partido do reforço:

- proteção adequada contra vandalismo ou danos acidentais do sistema CFRP;
- o colapso local do elemento não deve provocar colapso progressivo da estrutura;
- destacamento na zona final do elemento deve ser evitado através da utilização de ancoragens;
- deve ser feita proteção contra incêndio de todo o elemento reforçado com CFRP.

2.5.4 Análise do documento ACI-440.2R-17

Segundo o documento normativo americano ACI-440.2R-17, o dimensionamento de sistemas de reforço com laminados de CFRP dos elementos de betão armado pela técnica EBR e NSM deve respeitar os requisitos de estado limite último, limitação de tensões em serviço e verificação da ductilidade. Nessas verificações admite-se todas as hipóteses assumidas inicialmente na secção 2.5.1, acrescentando que a extensão máxima admissível de compressão no betão é de 3‰ (em vez de 3,5‰ como nos documentos anteriores) e este documento não tem em conta a contribuição das armaduras comprimidas.

2.5.4.1 Estado limite último de flexão

Relativamente à verificação de segurança ao estado limite último de flexão baseia-se na expressão:

$$Ø\, M_n \geq M_u \tag{2.45}$$

em que M_n corresponde ao momento fletor resistente nominal e M_u ao momento fletor atuante de cálculo que resulta da aplicação de um carregamento majorado segundo a expressão (2.46).

$$w_u = 1{,}4\, w_{DL} + 1{,}7\, w_{LL} \tag{2.46}$$

Nesta expressão, w_u corresponde ao valor da carga de dimensionamento, w_{DL} ao valor da carga permanente e w_{LL} ao valor de carga variável.

O momento resistente nominal é determinado com base no método do diagrama retangular simplificado. Na figura 2.10 apresenta-se uma secção retangular genérica reforçada à flexão com um laminado de CFRP e os diagramas de extensões e tensões em estado limite último de flexão.

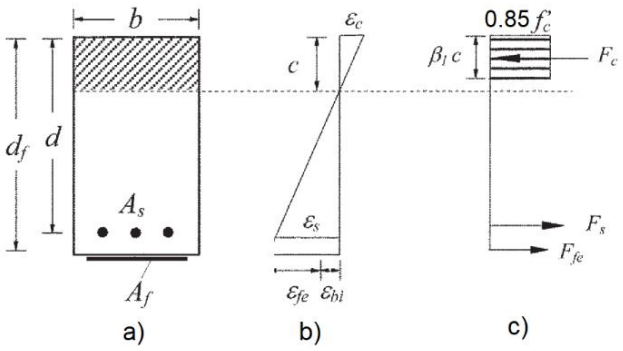


Figura 2.10 - Análise da secção para o estado limite último de flexão: (a) geometria; (b) distribuição de extensões e (c) distribuição de tensões [3].

O parâmetro β_1 representado na figura 2.10 toma o valor de 0,85 para betões com valor característico da resistência à compressão até 35 MPa. Caso essa resistência seja superior, o valor de β_1 deverá ser reduzido linearmente em 0,05 por cada 7 MPa que excedam 35 MPa, até ao valor mínimo de 0,65.

As forças resultantes das tensões de compressão no betão e das tensões de tração nas armaduras e no laminado podem ser obtidas, respetivamente, através das expressões:

$$F_c = 0{,}85\, f_c{}'\, \beta_1\, c\, b \tag{2.47}$$

$$F_s = A_s\, f_s \tag{2.48}$$

$$F_f = A_f\, E_f\, \varepsilon_f \tag{2.49}$$

em que f_s corresponde à tensão de tração das armaduras e as restantes variáveis estão definidas na figura 2.10 e já foram explicadas anteriormente.

Devido ao fenómeno do destacamento do laminado pelo sistema EBR, a extensão do reforço é limitada pela seguinte condição,

$$\varepsilon_f \leq \varepsilon_{fd} = 0{,}41 \sqrt{\frac{f_c{}'}{E_f\, t_f}} \leq 0{,}9\varepsilon_{fu} \tag{2.50}$$

em que ε_{fd} corresponde ao valor limite (de dimensionamento) da extensão do laminado.

Para o sistema NSM, a extensão de dimensionamento do reforço deve ser a seguinte,

$$\varepsilon_{fd} = 0{,}7\, \varepsilon_{fu} \tag{2.51}$$

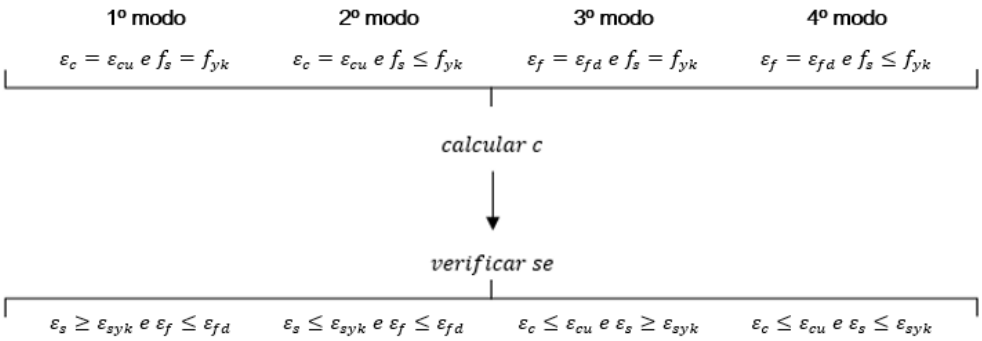
em que ε_{fu} corresponde à extensão última do sistema CFRP à tração.

Para calcular o valor de M_n é necessário calcular a posição da linha neutra (c). Esta é determinada por equilíbrio das forças resultantes F_c, F_s e F_f. No entanto, para que esse cálculo seja possível, deve-se analisar qual dos seguintes quatro modos de rotura é válido:

- 1º modo: rotura por esmagamento do betão após a cedência das armaduras;

- 2º modo: rotura por esmagamento do betão anterior à cedência das armaduras;
- 3º modo: rotura pelo reforço após a cedência das armaduras;
- 4º modo: rotura pelo reforço anterior à cedência das armaduras.

No 1º modo de rotura a tensão nas armaduras tracionadas (f_s) adquire o valor da respetiva tensão de cedência (f_{yk}) enquanto a extensão no betão é 3‰ (ε_{cu}). Tal como se observa na figura anterior, de acordo com a hipótese assumida, o diagrama de extensões no instante da rotura apresenta um andamento linear, pelo que o valor da extensão no reforço pode ser calculado a partir da extensão no betão. Desta forma, é possível determinar a posição da linha neutra. Finalmente, deve-se avaliar a validade deste mecanismo de rotura. Recorrendo à posição calculada da linha neutra, verifica-se se a extensão nas armaduras é superior à que provoca a sua cedência (ε_{syk}) e se a extensão no laminado é inferior ao seu valor limite (ε_{fd}). O procedimento de cálculo anterior e os restantes modos de rotura resumem-se no seguinte esquema:



Após averiguar qual dos modos de rotura caracteriza a secção reforçada em estudo, é possível proceder ao cálculo do momento fletor resistente nominal, dado pela seguinte expressão,

$$M_n = A_s\, f_{yk}\left(d - \frac{\beta_1\, c}{2}\right) + \psi_f\, A_f\, E_f\, \varepsilon_f\left(d_f - \frac{\beta_1\, c}{2}\right) \tag{2.52}$$

em que ψ_f corresponde ao fator de redução da capacidade mecânica do CFRP, tomando o valor recomendado de 0,85.

O fator de redução da resistência (Ø) pode ser determinado através da expressão:

$$Ø = \begin{cases} 0{,}9 \quad para\ \varepsilon_s > 0{,}5\% \\ 0{,}65 \quad para\ \varepsilon_s < \varepsilon_{syk} \\ 0{,}65 + \dfrac{0{,}25(\varepsilon_s - \varepsilon_{syk})}{0{,}005 - \varepsilon_{syk}}\ para\ 0{,}5\% > \varepsilon_s > \varepsilon_{syk} \end{cases} \tag{2.53}$$

2.5.4.2 Recomendações em situações de serviço

Quanto às verificações para o estado limite de serviço, o documento americano recomenda que sejam respeitadas as exigências relativas a estruturas de betão armado não reforçadas e limita a tensão no CFRP para o carregamento de serviço ($f_{f,s}$), a qual também deve incluir a tensão referente

a ações cíclicas (se existentes), de modo a evitar rotura por fadiga, de acordo com a seguinte expressão,

$$f_{f,s} \leq 0{,}55\, f_{fu} \tag{2.54}$$

em que f_{fu} corresponde à tensão resistente à tração do CFRP.

2.5.4.3 Perda acidental do sistema CFRP – Reservas de segurança

Relativamente à perda acidental do sistema CFRP, como explicado na secção 2.5.3.4, o documento americano sugere que um elemento de betão armado inicialmente reforçado com CFRP, após ter perdido o reforço por causas acidentais, deve possuir capacidade resistente suficiente (sem contribuição do reforço) para resistir à seguinte combinação de ações:

$$(\emptyset\, R_n)_{existente} \geq (1{,}1\, S_{DL} + 0{,}75\, S_{LL})_{reforçada} \tag{2.55}$$

em que Ø é o fator de redução de resistência apresentado na secção 2.5.4.1, R_n é a resistência nominal do elemento e S_{DL} e S_{LL} representam as ações permanentes e variáveis consideradas no dimensionamento do elemento reforçado, respetivamente.

O documento, recomenda, também, que nas verificações de segurança para a situação de incêndio não seja considerada a contribuição conferida pelo reforço para a resistência do elemento, a não ser que seja demonstrado que este permanece a uma temperatura inferior a um dado valor crítico (geralmente assumido igual à temperatura de transição vítrea do adesivo de colagem) através da utilização de materiais que o protejam da ação do fogo durante um determinado período (definido de acordo com os requisitos de segurança ao fogo que têm em conta, a altura do edifício, a sua tipologia e classe de risco). Assim, a capacidade resistente do elemento não reforçado, considerando a deterioração das propriedades mecânicas devido às temperaturas elevadas, deverá ser superior aos esforços causados pelo carregamento em situação de incêndio.

2.5.5 Análise do documento CNR-DT 200 R1/2012

O documento da CNR não tem recomendações relativas ao sistema NSM, todas as suas verificações e recomendações são aplicáveis a sistemas de reforço instalados de acordo com a técnica EBR.

2.5.5.1 Estado limite último de flexão

Relativamente ao documento da CNR este considera dois modos de rotura possíveis, assim como os documentos Bulletin 14 da *fib* e Bulletin 90 da *fib*. Os métodos de cálculo são bastantes semelhantes aos destes dois documentos, sendo a sua principal diferença o cálculo da extensão máxima de tração do sistema CFRP, demonstrado de seguida.

A verificação de segurança ao estado limite último de flexão baseia-se na expressão,

$$M_{sd} \leq M_{rd} \tag{2.56}$$

em que M_{sd} corresponde ao momento atuante e M_{rd} ao momento resistente do elemento.

Para as verificações de segurança relativas ao estado limite último de flexão este documento assume as hipóteses referidas anteriormente na secção 2.5.1.

Considera-se que a rotura por flexão ocorre quando a extensão máxima de tração do sistema CFRP ε_{fd} é alcançada (modo 1 da figura 2.11) ou quando ocorre a extensão máxima no betão à compressão ε_{cu} (modo 2 da figura 2.11). A extensão máxima de tração do sistema CFRP é obtida através da seguinte expressão,

$$\varepsilon_{fd} = min\left\{\eta\ \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{ffd}\right\} \tag{2.57}$$

em que ε_{fk} corresponde ao valor característico da extensão de rotura à tração do sistema FRP, γ_f corresponde ao fator parcial de materiais CFRP com valor de 1,1, ε_{ffd} corresponde à extensão máxima do sistema CFRP associada à ocorrência do destacamento determinada através da expressão (2.58), η é o coeficiente limite de tensão no CFRP com valores recomendados de 0,95 para ambientes internos, 0,85 para ambientes externos ou agressivos e as restantes variáveis encontram-se definidas anteriormente.

$$\varepsilon_{ffd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} \geq \varepsilon_{sy} - \varepsilon_0 \tag{2.58}$$

Na expressão (2.58), ε_{sy} corresponde à extensão de cedência do aço, $f_{fdd,2}$ trata-se da tensão máxima do sistema CFRP calculada através da expressão (2.59) e as restantes variáveis encontram-se definidas anteriormente.

$$f_{fdd,2} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{E_f}{t_f}\ \frac{2\ k_b\ k_{G,2}}{FC}\ \sqrt{f_{cm}\ f_{ctm}}} \tag{2.59}$$

Na expressão anterior $k_{G,2}$ corresponde a um fator corretivo com valor 0,10 mm, k_q trata-se de um coeficiente que tem em conta a distribuição do carregamento com valor 1,25 para cargas distribuídas e 1 para as restantes, $\gamma_{f,d}$ corresponde ao fator parcial de materiais CFRP com valor compreendido entre 1,2 e 1,5 dependendo da maior ou menor probabilidade de destacamento, isto é, com a qualidade de execução do reforço, k_b encontra-se definido na equação (2.27), f_{cm} e f_{ctm} correspondem aos valores médios de resistência à compressão e à tração do betão, respetivamente, e FC corresponde ao fator de confiança (usualmente com valor de 1).

Para a análise à flexão dos elementos reforçados com CFRP a rotura da secção crítica pode ocorrer por um dos dois modos de rotura mencionados anteriormente, representados na figura 2.11.

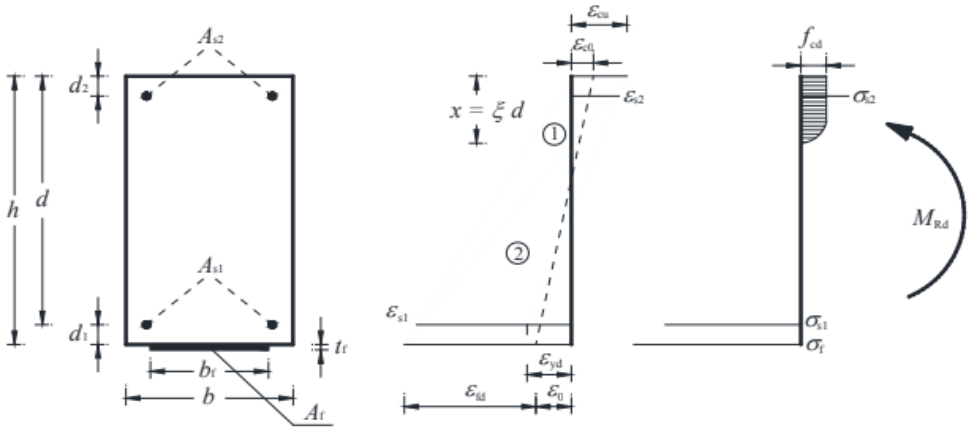


Figura 2.11 - Modos de rotura de um elemento reforçado com sistema FRP (modo1 - extensão máxima no betão à compressão e modo 2 - extensão máxima de tração do sistema FRP [4].

As extensões dos diferentes elementos são obtidas conforme o seu modo de rotura, demonstrado na tabela 2.4:

Tabela 2.4 - Extensões dos elementos para os dois modos de rotura (adaptado de [4]).

	Modo 1	**Modo 2**
FRP	$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x}(h-x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd}$	$\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$
Betão à compressão	$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$	$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0)\frac{x}{(h-x)} \leq \varepsilon_{cu}$
Aço à compressão	$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu}\frac{x-d_2}{x}$	$\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0)\frac{x-d_2}{(h-x)}$
Aço à tração	$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu}\frac{d-x}{x}$	$\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0)\frac{d-x}{(h-x)}$

Para ambos os modos de rotura, a distribuição de extensões ao longo da profundidade do elemento deve ser linear de modo a satisfazer as hipóteses enunciadas anteriormente.

A posição da linha neutra x e a capacidade de flexão M_{rd} do elemento reforçado são obtidos através das expressões (2.60) e (2.61), respetivamente,

$$0 = \psi\, b\, x\, f_{cd} + A_{s2}\, \sigma_{s2} - A_{s1}\, \sigma_{s1} - A_f\, \sigma_f \tag{2.60}$$

$$M_{rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}}\left[\psi\, b\, x\, f_{cd}\, (d - \lambda\, x) + A_{s2}\, \sigma_{s2}\, (d - d_2) + A_f\, \sigma_f\, d_1\right] \tag{2.61}$$

em que os coeficientes adimensionais ψ e λ têm valores aproximados de 0,8 e 0,4, respetivamente, γ_{Rd} é igual a 1 e as restantes variáveis definem-se na figura 2.11.

Como o sistema CFRP é um material com comportamento linear elástico até à rotura, a tensão deve ser tida em conta como o produto do módulo de elasticidade e pela extensão calculada anteriormente.

2.5.5.2 Verificações de destacamento do reforço CFRP

Em relação aos modos de rotura por destacamento do sistema de reforço ou perda de aderência, o documento da CNR faz algumas recomendações. Primeiramente, define-se o comprimento ótimo de amarração l_{ed} através da seguinte expressão,

$$l_{ed} = min\left\{\frac{1}{\gamma_{Rd}\, f_{bd}}\sqrt{\frac{\pi^2\, E_f\, t_f\, \Gamma_{Fd}}{2}}, 200\, mm\right\} \tag{2.62}$$

em que $\gamma_{Rd} = 1{,}25$, as variáveis f_{bd} e Γ_{Fd} correspondem à tensão de aderência entre o sistema FRP e o betão e à energia de fratura, respetivamente, encontrando-se definidos nas expressões seguintes (em que as restantes variáveis foram definidas anteriormente):

$$f_{bd} = \frac{2\, \Gamma_{Fd}}{s_u} \tag{2.63}$$

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b\, k_g}{FC}\sqrt{f_{cm}\, f_{ctm}} \tag{2.64}$$

Nas expressões anteriores assume-se $s_u = 0{,}25\, mm$ e k_g corresponde ao fator corretivo adicional com valores 0,023 ou 0,037 mm para sistemas pré curados (laminados) ou curados *in situ* (mantas), respetivamente.

Para evitar o modo de rotura por destacamento do sistema CFRP na zona de ancoragem, o comprimento de amarração l_b deve ser igual ou superior a l_{ed} e a tensão máxima permitida nessa zona f_{fdd} é dada pela expressão (2.65),

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}}\sqrt{\frac{2\, E_f\, \Gamma_{Fd}}{t_f}} \tag{2.65}$$

com as suas variáveis definidas anteriormente.

Quando o comprimento de amarração l_b é inferior a l_{ed}, a tensão máxima permitida nessa zona deve ser reduzida de acordo com a seguinte expressão:

$$f_{fdd,rid} = f_{fdd}\frac{l_b}{l_{ed}}\left(2 - \frac{l_b}{l_{ed}}\right) \tag{2.66}$$

Finalmente, para prevenir o modo de rotura por destacamento do sistema CFRP na zona intermédia do elemento devido à fendilhação, a tensão máxima para o estado limite último do sistema CFRP é dada pela expressão (2.59), $f_{fdd,2}$.

2.5.5.3 Recomendações em situações de serviço

Para as verificações ao estado limite de serviço, o documento recomenda tanto para a abertura de fendas como para os deslocamentos máximos dos elementos reforçados com sistemas CFRP que sejam respeitadas as exigências relativas a estruturas de betão armado não reforçadas. A limitação das tensões é semelhante à do documento Bulletin 14 da *fib*, enunciada no ponto 2.5.2.3.

2.5.5.4 Perda acidental do sistema CFRP – Reservas de segurança

Relativamente às reservas de segurança consideradas pelo documento da CNR para a perda acidental do sistema CFRP, este sugere que em caso de vandalismo deve ser feita a verificação de segurança para o estado limite último no elemento sem reforço com CFRP, considerando a ação atuante como carga quase permanente e a utilização dos coeficientes de segurança para os materiais da combinação de carga acidental (com valor unitário).

As verificações de segurança em caso de incêndio são semelhantes à do documento americano ACI, enunciadas na secção 2.5.4.3.

2.5.6 Análise do documento *Annex J* do EC2 – parte 1

2.5.6.1 Estado limite último de flexão

Para o dimensionamento de sistemas de reforço à flexão com laminados de CFRP colados exteriormente a elementos de betão armado, este documento assume as hipóteses referidas anteriormente na secção 2.5.1 e acrescenta que esta análise não deve ser utilizada em betões com $f_{ck} \leq 12\ MPa$ ou $f_{ck} > 50\ MPa$ (f_{ck} corresponde ao valor característico da resistência à compressão do betão).

A extensão máxima de dimensionamento do reforço CFRP de sistemas EBR e NSM determina-se através da seguinte expressão geral,

$$\varepsilon_{fud} = \frac{f_{bfRd}}{E_f} \tag{2.67}$$

em que f_{bfRd}, para sistemas EBR corresponde à tensão resistente máxima da ancoragem (mínimos dos valores obtidos pelas expressões (2.68) e (2.70), tal como se apresenta na secção 2.5.6.2), enquanto que para sistemas NSM, a tensão máxima no reforço de CFRP é obtida através das mesmas expressões do *Bulletin* 90 da *fib* [expressões (2.39) ou (2.40)].

2.5.6.2 Verificações de destacamento do reforço CFRP

Em relação ao destacamento do reforço CFRP na zona de ancoragem para sistemas EBR [modo a) da figura 2.3], a tensão máxima da ancoragem obtém-se através da seguinte expressão,

$$f_{bfRd} = \frac{0{,}17}{\gamma_{BA}}\ k_b\ \beta_1 \sqrt{\frac{2\ E_f}{t_f} f_{cm}^{2/3}} \tag{2.68}$$

em que $\gamma_{BA} = 1{,}5$, k_b encontra-se definido na expressão (2.27), β_1 corresponde à expressão (2.28) e as restantes variáveis encontram-se definidas e explicadas anteriormente.

O comprimento de amarração máximo determina-se através da expressão (2.69),

$$l_{b,máx} = \frac{1{,}5\ \pi}{k_b} \sqrt{\frac{E_f\ t_f}{8\ f_{cm}^{2/3}}} \tag{2.69}$$

Para prevenir o modo de rotura de destacamento do reforço CFRP numa zona afastada da extremidade para sistemas EBR, a tensão máxima no reforço CFRP deve ser limitada a,

$$f_{bfRd} = \frac{\sqrt{\eta_{cc}\, k_{tc}\, k_{tt}}}{\gamma_{BA}} \begin{cases} f_{bfk,máx}\ \dfrac{l_b}{l_{b,máx}}\left(2 - \dfrac{l_b}{l_{b,máx}}\right) & se\ l_b < l_{b,máx} \\ f_{bfk,máx} & se\ l_b \geq l_{b,máx} \end{cases} \tag{2.70}$$

em que η_{cc} corresponde ao fator que tem em conta a diferença entre a resistência à compressão dos provetes cilíndricos e a resistência efetiva da estrutura, obtida através da expressão (2.71), k_{tc} corresponde ao coeficiente que considera o efeito na resistência à compressão do betão de cargas com duração prolongada com valor recomendado de 1, k_{tt} trata-se do coeficiente que considera o efeito na resistência à tração do betão de cargas com duração prolongada com valor recomendado de 0,8, $l_{b,máx}$ e $f_{bfk,máx}$ correspondem às expressões (2.72) e (2.73), respetivamente.

$$\eta_{cc} = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{\frac{1}{3}} \leq 1 \tag{2.71}$$

$$l_{b,máx} = \frac{2}{k_{sys,b3}} \sqrt{\frac{E_f\ t_f\ s_{f0k}}{\tau_{f1k}}} \tag{2.72}$$

$$f_{bfk,máx} = \sqrt{\frac{E_f\ \tau_{f1k}\ s_{f0k}}{t_f}} \tag{2.73}$$

Nas equações (2.72) e (2.73), $k_{sys,b3}$ tem valor recomendado de 1, τ_{f1k} e s_{f0k} correspondem às seguintes expressões,

$$\tau_{f1k} = 0{,}37\ k_{sys,b1}\ (f_{cm}\ f_{ctm,surf})^{0,5} \tag{2.74}$$

$$s_{f0k} = 0{,}2\ k_{sys,b2} \tag{2.75}$$

em que $k_{sys,b2}$ e $k_{sys,b1}$ têm valores recomendados de 1 e $f_{ctm,surf}$ determina-se através da expressão (2.76), em que k se obtém através da expressão (2.77).

$$f_{ctm,surf} = k\ f_{ctm} \tag{2.76}$$

$$k = 0{,}6 + 0{,}3\left(\frac{f_{ck}}{60} - 0{,}2\right) \tag{2.77}$$

A tensão definida na expressão (2.70) é suficiente para resistir à diferença de tensões no sistema de reforço que ocorre entre as fendas no betão. Poderá, também, realizar-se a verificação da aderência entre fendas consecutivas para sistemas EBR de acordo com a seguinte condição,

$$\Delta f_{fEd} \leq \Delta f_{fRd} \tag{2.78}$$

em que Δf_{fEd} corresponde à diferença de tensões no CFRP entre fendas que se obtém através da expressão (2.79) e Δf_{fRd} corresponde à tensão resistente de ligação entre fendas adjacentes que é obtida através da expressão (2.80).

$$\Delta f_{fEd} = \frac{F_{fEd,b} - F_{fEd,a}}{b_f\ t_f} \tag{2.79}$$

Na expressão (2.79) as variáveis estão definidas na figura 2.12 e as restantes foram explicadas anteriormente.

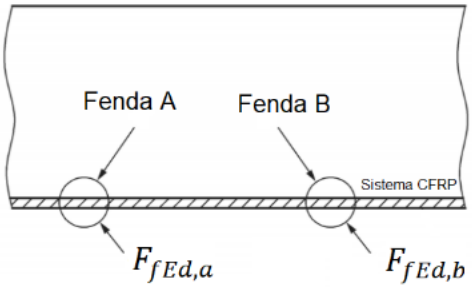


Figura 2.12 - Elemento reforçado com sistema CFRP com fendas de flexão adjacentes (adaptado de [6]).

$$\Delta f_{fRd} = \frac{1}{\gamma_{BA}} \left((\eta_{cc}\, k_{tc}\, k_{tt})^{0,5}\, \Delta f_{fk,B} + \Delta f_{fk,F} + \Delta f_{fk,C}\right) \tag{2.80}$$

Relativamente à expressão (2.80), $\Delta f_{fk,B}$ corresponde à resistência da ligação por adesão entre fendas, $\Delta f_{fk,F}$ trata-se da resistência da ligação por atrito e $\Delta f_{fk,C}$ corresponde à resistência de ligação devido à curvatura da viga. Todas estas variáveis definem-se de seguida em que κ_h toma o valor de 2000 para elementos de betão reforçados (as restantes variáveis foram definidas anteriormente):

- $\Delta f_{fk,B} = 0{,}84 \sqrt{f_{cm}\, f_{ctm,surf}}\, \frac{\sqrt{s_{cr,min}}}{t_f}$ (2.81)
- $\Delta f_{fk,F} = 0{,}1\, {f_{cm}}^{0,9}\, \frac{{s_{cr,min}}^{4/3}}{t_f}$ (2.82)
- $\Delta f_{fk,C} = \frac{\kappa_h}{h_f}\, \frac{{s_{cr,min}}^{1/3}}{t_f}$ (2.83)
- $h_f = min\{100\ mm, h\}$ (2.84)
- $s_{cr,min} = 0{,}75\, s_{cr,máx}$ (2.85)

Para sistemas NSM, tal como referido anteriormente, a recomendação relativa à resistência máxima do reforço é dada pelas expressões (2.39) ou (2.40) definidas igualmente no documento *Bulletin* 90 da *fib*.

Este documento apresenta, também, uma recomendação relativa ao máximo esforço transverso na zona do apoio, V_{ED}, sendo que este deve ser menor do que a resistência máxima para não ocorrer separação entre o laminado e o betão, $V_{Rd,cfE}$. Esta condição apresenta-se de seguida,

$$V_{ED} \leq V_{Rd,cfE} = \left(0{,}11 + 2{,}2\, \frac{(100\, \rho_1)^{0,15}}{{a_{fE}}^{0,36}}\right) (100\, \rho_1\, f_{ck})^{\frac{1}{3}}\, b_w\, z \tag{2.86}$$

em que ρ_1 corresponde ao rácio entre a armadura de aço à tração e a área da secção de betão resistente ao esforço transverso ($\rho_1 = {A_{s1}}/{d\, b_w}$), a_{fE} corresponde à distância entre o apoio e o fim do laminado, b_w corresponde à largura da "alma" da secção de betão e $z = 0{,}9\, d$.

2.5.6.3 Recomendações em situações de serviço

Para as verificações ao estado limite de serviço, o documento recomenda para os deslocamentos máximos dos elementos reforçados com sistemas CFRP EBR ou NSM que sejam respeitadas as

exigências relativas a estruturas de betão armado não reforçadas. A limitação das tensões é semelhante à do documento Bulletin 14 da *fib*, enunciada no ponto 2.5.2.3.

2.5.7 Comparação das abordagens de dimensionamento

Após a análise das principais recomendações para o dimensionamento à flexão e verificação da segurança do destacamento do reforço em elementos de betão armado reforçados com sistemas CFRP dos diferentes documentos, torna-se importante fazer uma comparação entre estes.

Em relação ao estado limite último de flexão, todos os documentos apresentam o mesmo princípio de cálculo, utilizando expressões semelhantes para o cálculo da posição da linha neutra e do momento fletor resistente da secção reforçada. Os documentos Bulletin 14 e Bulletin 90 da *fib* apresentam o método de cálculo mais semelhante entre si, apresentando apenas algumas diferenças em relação aos modos de rotura, pois o Bulletin 14 da *fib* considera dois modos de rotura distintos e o cálculo dos parâmetros ψ e δ_G é diferente conforme o modo de rotura da secção crítica do elemento. Por outro lado, o documento Bulletin 90 da *fib* não apresenta esta distinção e, portanto, os parâmetros obtêm-se da mesma forma qualquer que seja o modo de rotura. O documento americano ACI considera quatro modos de rotura possíveis da secção crítica e o cálculo da linha neutra difere conforme o modo de rotura do elemento. Outra diferença é que nesta abordagem multiplica-se o momento fletor resistente por um fator de redução da resistência. No documento da CNR as extensões dos materiais são calculadas conforme dois modos de rotura distintos. Por último, o *Annex J* do EC2 apresenta a recomendação da utilização da menor das tensões de aderência do reforço para obter o momento fletor resistente para sistemas EBR [expressões (2.68) e (2.70)], enquanto para sistemas NSM adota a mesma abordagem (e expressão) do *Bulletin* 90 da *fib*.

De seguida, apresenta-se na tabela 2.5 a recomendação de cada documento para os valores limite da extensão de cálculo do sistema CFRP para a técnica EBR e na tabela 2.6 para a técnica NSM. As diferentes recomendações dos documentos para a extensão do CFRP é o que mais condiciona o resultado final do momento fletor resistente pois, de uma forma geral, o método de cálculo é bastante semelhante entre os vários documentos, sendo a principal diferença as expressões apresentadas nas tabelas seguintes. Esta diferença será visível aquando da utilização das mesmas nos capítulos seguintes, recorrendo a um exemplo prático e à comparação com ensaios experimentais.

Tabela 2.5 - Diferentes valores limite da extensão do CFRP para a técnica EBR conforme o documento (adaptado de [1], [2], [3], [4] e [6]).

Documento	Valor limite da extensão do CFRP para a técnica EBR
Bulletin 14 da *fib*	$\varepsilon_{f,lim} = 6{,}5\ a\ 8{,}5\ ‰$
Bulletin 90 da *fib*	$\varepsilon_{f,lim} = \dfrac{\beta_l \dfrac{k_{cr,k}\ k_k\ k_b \sqrt{\dfrac{2\ E_f}{t_f} f_{cm}^{2/3}}}{\gamma_{fb}}}{E_f}$
ACI-440.2R-17	$\varepsilon_{f,lim} = 0{,}41 \sqrt{\dfrac{f_c{}'}{E_f\ t_f}} \leq 0{,}9\varepsilon_{fu}$
CNR-DT 200 R1/2012	$\varepsilon_{f,lim} = \dfrac{\dfrac{k_q}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\dfrac{E_f}{t_f}\ \dfrac{2\ k_b\ k_{G,2}}{FC}\ \sqrt{f_{cm}\ f_{ctm}}}}{E_f}$
Annex J do EC2	$\varepsilon_{f,lim} = \dfrac{\dfrac{0{,}17}{\gamma_{BA}}\ k_b\ \beta_1 \sqrt{\dfrac{2\ E_f}{t_f} f_{cm}^{2/3}}}{E_f}$

Tabela 2.6 - Diferentes valores limite da extensão do CFRP para a técnica NSM conforme o documento (adaptado de [2], [3] e [6]).

Documento	Valor limite da extensão do CFRP para a técnica NSM
Bulletin 90 da *fib*	$\varepsilon_{f,lim} = \eta \dfrac{f_{fk}}{\gamma_f\ E_f}$
ACI-440.2R-17	$\varepsilon_{f,lim} = \varepsilon_{fd} = 0{,}7\ \varepsilon_{fu}$
Annex J do EC2	$\varepsilon_{f,lim} = 0{,}95\ b_f\ \tau_{b1d}\ \sqrt[4]{a_r}\ l_b\ (0{,}4 - 0{,}0015\ l_b)/E_f$ para $l_b \leq 115\ mm$
	$\varepsilon_{f,lim} = 0{,}95\ b_f\ \tau_{b1d}\ \sqrt[4]{a_r}\ \left(26{,}2 + 0.065 \tanh\left(\frac{a_r}{70}\right)(l_b - 115)\right)/E_f$ para $l_b > 115\ mm$

Analisando as verificações de segurança de destacamento do reforço CFRP para a técnica EBR, percebe-se que a abordagem é bastante semelhante entre todos os documentos, exceto no documento americano ACI que não tem qualquer verificação explícita para este aspeto. Os restantes documentos recomendam a verificação da segurança ao destacamento na zona de ancoragem, indicando expressões para o cálculo do comprimento de amarração ótimo e para o cálculo da força máxima resistente na zona de ancoragem, bem como verificações da segurança numa zona afastada da extremidade fornecendo expressões para o cálculo da tensão máxima do sistema CFRP. As expressões de cálculo do comprimento de amarração e da força máxima resistente na zona de ancoragem são bastante semelhantes entre todos os documentos, apresentando apenas algumas diferenças pouco significativas. Para a verificação das tensões de aderência do sistema CFRP as expressões são iguais nos documentos Bulletin 14 da *fib* e Bulletin 90 da *fib*, a única diferença é que

no primeiro a tensão de aderência atuante deve ser menor que a tensão resistente ao corte do betão e no segundo deve ser inferior à tensão de aderência resistente (determinada com uma expressão específica). Os documentos da CNR e do *Annex J* fornecem expressões de cálculo para a tensão máxima do sistema CFRP. Finalmente, os documentos Bulletin 14 da *fib*, Bulletin 90 da *fib* e *Annex J* fazem, também, recomendações relativas ao destacamento do sistema CFRP em zonas com fendas de flexão adjacentes.

Para a técnica NSM as verificações de segurança de destacamento do reforço CFRP são iguais nos documentos Bulletin 90 da *fib* e *Annex J,* enquanto que o documento americano ACI não tem qualquer verificação explícita para este aspeto (apenas limita a extensão no CFRP ao seu valor de dimensionamento).

Em relação às recomendações em situações de serviço são praticamente iguais em todos os documentos em relação ao controlo de abertura de fendas, deslocamentos máximos dos elementos reforçados com sistemas CFRP e tensões consideradas para o betão e para o aço. A diferença apresentada entre os documentos relaciona-se com a limitação de tensão de tração para a combinação de cargas quase permanentes para evitar rotura por fluência dos sistemas CFRP, apresentada de seguida na tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Diferença entre os documentos relativamente à limitação de tensão de tração do sistema CFRP em serviço ([1], [2], [3], [4] e [6]).

Documento	**Limitação da tensão de tração do sistema CFRP**
Fib 14, *Fib* 90, CNR-DT 200 R1/2012, *Annex J* do EC2	$\sigma_f \leq 0{,}8\ f_{fk}$
ACI-440.2R-17	$\sigma_f \leq 0{,}55\ f_{fu}$

Finalmente, as reservas de segurança consideradas por alguns dos documentos analisados (Bulletin 90 da *fib*, ACI-440.2R-17 e CNR-DT 200 R1/2012) são semelhantes entre si, tendo estes em conta certas recomendações para quando uma estrutura de betão armado reforçada com laminados de CFRP aplicados através do sistema EBR e NSM fique sujeita a atos de vandalismo, impactos ou outras causas que provoquem a perda total do compósito como por exemplo em caso de incêndio.

No capítulo seguinte, as metodologias de dimensionamento à flexão de elementos de betão armado reforçados com laminados de CFRP dos diferentes documentos serão comparadas recorrendo a um exemplo prático, de modo a obter as áreas necessárias de reforço para cada documento, e utilizando resultados de ensaios experimentais, de modo a comparar os resultados das resistências previstas pelas expressões dos diversos documentos com as reais.

3 Aplicação dos documentos selecionados para a técnica EBR

3.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo principal comparar os métodos de cálculo expostos nos documentos apresentados no capítulo anterior para a verificação da segurança à flexão de lajes e vigas de betão armado reforçadas com laminados de fibras de carbono instalado de acordo com a técnica EBR. Para tal, as diferentes metodologias serão aplicadas num exemplo prático real, nomeadamente no reforço de um piso de um edifício, para perceber as implicações das recomendações dos diferentes documentos nas áreas de reforço necessárias. Além desse exemplo prático de dimensionamento, as metodologias dos diferentes documentos serão utilizadas para prever e comparar cargas de rotura obtidas experimentalmente em ensaios de flexão de vigas e lajes de betão armado reforçadas com sistemas CFRP disponíveis na literatura.

Numa primeira fase, apresenta-se a estrutura que se pretende reforçar (secção 3.2.1), seguida do dimensionamento do reforço à flexão necessário (secção 3.2.2). Numa segunda fase, apresentam-se os ensaios experimentais utilizados para comparar com as previsões de carga resistente obtidas com os diferentes documentos de referência (secção 3.3.1), de seguida, apresentam-se os resultados obtidos com os diferentes regulamentos, assim como, uma comparação entre estes e os valores experimentais (secção 3.3.2 e 3.3.3). Por último, apresentam-se as considerações finais (secção 3.4).

3.2 Aplicação dos documentos selecionados num exemplo prático

Na sequência das metodologias de dimensionamento à flexão de laminados de CFRP dos documentos normativos selecionados apresentadas no capítulo anterior, apresenta-se o exemplo prático de dimensionamento do reforço de um piso de um edifício. O edifício de habitação considerado corresponde a um edifício corrente construído em 1956 com estrutura em betão armado. Esta análise tem como objetivo obter as áreas de reforço necessárias de acordo com as várias metodologias e analisar as suas diferenças.

3.2.1 Descrição e análise da estrutura existente

O edifício considerado, como já referido, consiste num edifício de habitação construído em 1956 com estrutura em betão armado. No âmbito de uma reabilitação pretende-se alterar a sua funcionalidade passando a ser utilizado como edifício de serviços. Num dos pisos do edifício pretende-se instalar uma zona de arquivo a que corresponde uma sobrecarga atuante de 6 kN/m^2.

A análise da estrutura existente é uma fase primordial de qualquer projeto de reforço, em que se procura avaliar a capacidade resistente atual/inicial. Neste caso, acedeu-se a peças desenhadas do projeto original, o que pode não acontecer em muitos casos de estruturas com algumas dezenas de anos. De seguida, apresenta-se uma breve explicação do modo como se obteve as cargas

resistentes das lajes e vigas do piso. Uma vez que o objetivo deste exemplo prático é compreender as diferenças entre as áreas de reforço do sistema CFRP obtidas de acordo com cada documento, a avaliação da estrutura existente/inicial não será alvo de uma análise detalhada na presente dissertação.

3.2.1.1 Estrutura existente

Torna-se, assim, importante definir geometricamente a laje e viga que serão reforçadas. Na figura 3.1 representa-se a planta da laje do edifício e a localização da viga que, após a avaliação estrutural tem necessidade de ser reforçada (viga V2). Na figura 3.2 e na figura 3.3 representam-se as secções transversais da laje e viga, com as respetivas armaduras, que necessitam de ser reforçadas, respetivamente.

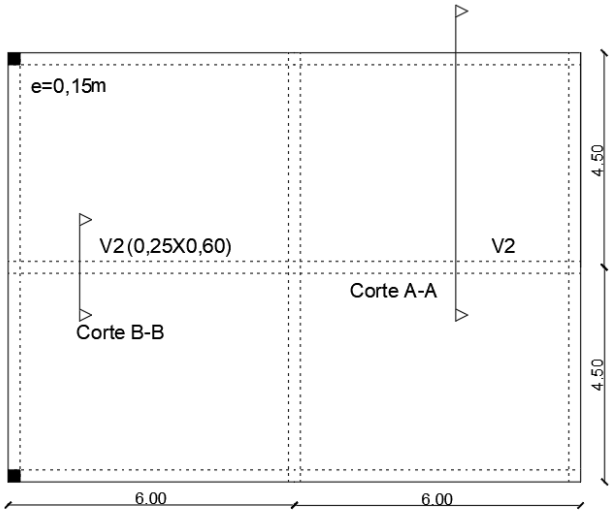


Figura 3.1 - Planta da laje do edifício.

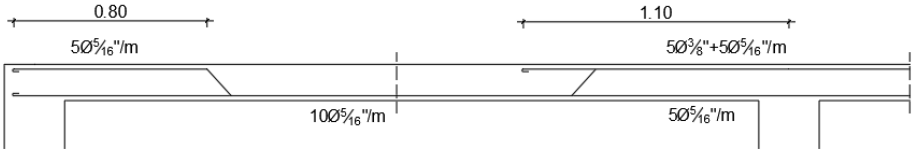


Figura 3.2 – Corte A-A da laje na direção mais condicionante com a representação das armaduras.

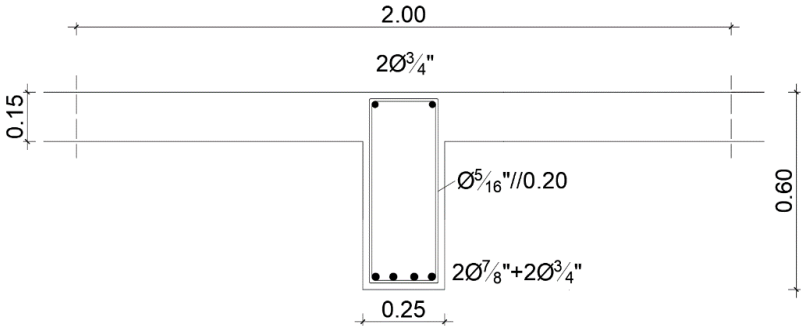


Figura 3.3 - Secção da viga que necessita de reforço (Corte B-B).

3.2.1.2 Propriedades mecânicas dos materiais e resistência dos elementos

A quantificação das propriedades mecânicas dos materiais, que compõe a estrutura existente, é necessária para que se possa determinar a capacidade resistente atual dos elementos de betão armado. Assim, para o betão é necessário quantificar grandezas como a resistência à tração e à compressão e o módulo de elasticidade. Para o aço de armadura ordinária, devem também ser determinadas as tensões de cedência e rotura.

Neste caso, acedeu-se a estas informações no projeto, mas em muitos casos de edifícios antigos é necessário extrair amostras dos materiais e realizar ensaios de caracterização pois não há qualquer informação relativa aos materiais utilizados, e/ou estes podem ter sofrido degradação das suas propriedades mecânicas. Na tabela 3.1 apresenta-se as propriedades mecânicas dos materiais constituintes dos elementos de betão armado em análise.

Tabela 3.1 - Resumo das propriedades mecânicas dos materiais da estrutura a reforçar.

Propriedades mecânicas dos materiais (MPa)	
E_c	30000
f_{cd}	13,30
f_{ctm}	2,20
f_{syd}	204
E_s	210000

3.2.2 Dimensionamento do reforço à flexão com sistema CFRP

Para proceder à avaliação da capacidade resistente inicial da estrutura (i.e. antes do reforço), fez-se uma análise plástica das lajes, explorando-se a capacidade de redistribuição de esforços e ductilidade destes elementos. Através das armaduras fornecidas no projeto, foi possível determinar as áreas das mesmas em cada painel de laje, e, assim, avaliar os momentos fletores resistentes e a capacidade de carga. Para obter a carga resistente das vigas, à semelhança do que se fez para as lajes, através do projeto fornecido, analisou-se as armaduras de cada viga para obter o valor dos momentos resistentes e a respetiva capacidade de carga. Após esta análise, verificou-se que as vigas e as lajes necessitavam de reforço para garantir a segurança face às novas ações.

A intervenção consiste no reforço da laje para momentos positivos em uma direção e no reforço da viga V2 também para momentos positivos. Esta solução é viável por exploração da redistribuição de esforços dado a elevada ductilidade dos elementos em causa. Neste caso a ductilidade dos elementos em causa foi verificada através do rácio x/d que deve ser inferior a 0,25, situação que se confirmou para ambos os casos.

De seguida, apresenta-se na tabela 3.2, os momentos resistentes positivos iniciais da laje e viga a reforçar (das secções ilustradas na figura 3.2 e na figura 3.3), assim como os momentos (positivos) atuantes após o acréscimo de carga, assumindo redistribuição de esforços.

Tabela 3.2 - Momento resistente da laje e viga V2 a reforçar.

Caso de estudo	Momento resistente positivo da secção inicial	Momento atuante após acréscimo de carga (assumindo redistribuição de esforços)
Laje (kNm/m)	11,68	25,38
Viga (kNm)	140,70	237,45

A largura efetiva do banzo (b_{eff}) considerada na figura 3.3 foi obtida através da seguinte expressão, presente no EC2 parte 1.1 [14],

$$b_{eff} = \Sigma b_{eff,i} + b_w \leq b \tag{3.1}$$

em que $b_{eff,i}$ corresponde à expressão (3.2), b_w corresponde à largura da alma e b corresponde à largura do banzo.

$$b_{eff,i} = 0{,}2\, b_i + 0{,}1\, l_0 \leq 0{,}2\, l_0 \tag{3.2}$$

Na expressão (3.2), b_i trata-se da largura representada na figura 3.4 e l_0 corresponde à expressão (3.3).

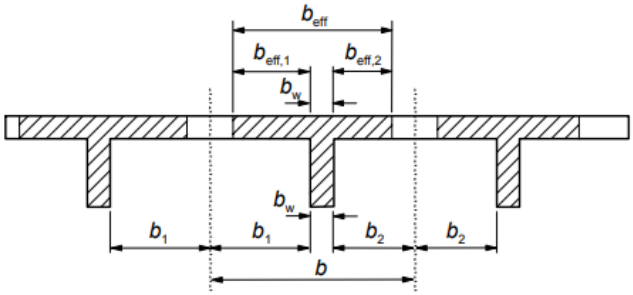


Figura 3.4 - Parâmetros para a determinação da largura efetiva do banzo [14].

$$l_0 = 0{,}85\, L \tag{3.3}$$

Na expressão (3.3), L corresponde ao vão da viga com valor de 6 m.

Após a definição de todas as características da secção e dos seus materiais, aplicou-se os métodos de cálculo relativos à flexão apresentados na secção 2.5, para obter a extensão de dimensionamento do sistema CFRP, assim como, a área de laminado necessária para se garantir a segurança face aos novos esforços atuantes à flexão.

Primeiramente, determinou-se o valor da extensão máxima de dimensionamento do sistema CFRP através dos diferentes métodos e recomendações dos documentos, para que de seguida, com este valor, fosse possível determinar a posição da linha neutra na secção e a área necessária de laminado CFRP para o modo de rotura válido. Os documentos Bulletin 90 da *fib*, ACI, CNR e Anexo J para determinar a extensão máxima do sistema CFRP necessitam logo à partida da definição da espessura e largura do laminado, por isso, assumiu-se estas características e após a determinação

da área de laminado, acertou-se possíveis alterações (i.e. num processo iterativo). A espessura e largura iniciais utilizadas foram de 1,4 mm e 120 mm, respetivamente.

É importante referir, que no cálculo da posição da linha neutra da secção nos diferentes documentos assumiu-se a participação das armaduras de aço à compressão e de forma simplificada considerou-se uma distribuição retangular das compressões do betão. O documento ACI não considera a participação das armaduras de aço à compressão, no entanto, de forma a uniformizar os cálculos e para tentar que estes fossem o mais próximo possível do valor real, considerou-se a participação das armaduras de aço à compressão também nas verificações de acordo com o ACI.

Para obter a posição da linha neutra e a área de laminado necessária procedeu-se de forma semelhante em todos os documentos, sendo estas obtidas através de um sistema de equações por equilíbrio de forças em relação à posição da linha neutra e assumindo o valor do momento fletor resistente apresentado anteriormente. De seguida, verificou-se se o modo de rotura válido seria por esmagamento do betão ou por destacamento do CFRP. A hipótese que verificasse todas as condições impostas seria a considerada válida e, em ambos os casos, laje e viga, o modo de rotura para todos os documentos foi por destacamento do sistema CFRP. Os cálculos encontram-se com maior detalhe em anexo.

De seguida, apresenta-se os resultados obtidos para a laje e viga.

3.2.2.1 Resultados obtidos para a laje e viga

Conforme descrito anteriormente, começou-se por determinar a extensão de dimensionamento do CFRP de acordo com as propostas de cada documento. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Extensão do sistema CFRP obtida através dos diferentes documentos.

Extensão do laminado obtida		
Caso de estudo	Documento	Extensão
Laje	Bulletin 14 da *fib*	0,0065
	Bulletin 90 da *fib*	0,0017
	ACI-440.2R-17	0,0028
	CNR-DT 200 R1/2012	0,0017
	Annex J do EC2	0,0009
Viga	Bulletin 14 da *fib*	0,0065
	Bulletin 90 da *fib*	0,0017
	ACI-440.2R-17	0,0028
	CNR-DT 200 R1/2012	0,0018
	Annex J do EC2	0,0009

De seguida, determinou-se a área de sistema CFRP necessária para reforçar as secções em causa. Para que fosse possível defini-la, foi necessário assumir logo à partida um módulo de elasticidade do laminado de CFRP. Decidiu-se utilizar módulos de elasticidade de laminados comercializados em Portugal pelas principais empresas *Sika* e *S&P.* Tendo em conta que utilizando um maior módulo de elasticidade a área de laminado necessária é menor, decidiu-se utilizar um módulo de elasticidade maior para ambos os casos (210 GPa), que corresponde ao laminado do Tipo M da empresa *Sika*. No

entanto, chama-se a atenção que quanto maior o módulo de elasticidade do laminado de CFRP, maior o seu custo. Os resultados obtidos para os diferentes documentos apresentam-se na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Área de laminado obtida através dos diferentes documentos.

Área de laminado obtida				
Caso de estudo	Documento	Módulo de elasticidade (MPa)	Tensão de cálculo do laminado (MPa)	Área
Laje	Bulletin 14 da *fib*	210000	910,00	0,875 cm²/m
	Bulletin 90 da *fib*		350,44	3,703 cm²/m
	ACI-440.2R-17		579,10	2,391 cm²/m
	CNR-DT 200 R1/2012		367,11	2,539 cm²/m
	Annex J do EC2		186,54	8,237 cm²/m
Viga	Bulletin 14 da *fib*	210000	910,00	1,115 cm²
	Bulletin 90 da *fib*		358,14	4,571 cm²
	ACI-440.2R-17		579,10	2,948 cm²
	CNR-DT 200 R1/2012		377,89	3,835 cm²
	Annex J do EC2		198,97	9,955 cm²

3.2.2.2 Análise dos resultados obtidos para a laje e viga

Observando os valores das áreas de laminado obtidas, percebe-se que estas estão diretamente relacionadas com o valor previsto por cada documento para a extensão de dimensionamento do sistema CFRP. Dado que o modo de rotura obtido para todos os documentos para a laje e viga foi por destacamento do sistema CFRP, esta relação seria previsível.

É importante referir que para o Bulletin 90 da *fib* os valores considerados para o cálculo da extensão do laminado de acordo com a expressão (2.21), foram os valores característicos, isto é, k_{cr} toma o valor de 1,8 e k toma o valor de 0,17.

Conclui-se, que as áreas têm diferentes valores conforme as diferentes abordagens dos documentos em análise em prever a extensão de destacamento do sistema CFRP. Estes resultados demonstram que em termos práticos, chega-se a soluções muito diferentes de acordo com o documento que se adota para o dimensionamento destes sistemas.

Assim, torna-se importante comparar os resultados obtidos com os diferentes documentos com resultados obtidos experimentalmente, para ser possível analisar com maior detalhe as diferentes metodologias, e perceber qual delas prevê com maior exatidão o comportamento real dos elementos reforçados, e em particular do valor máximo da extensão no reforço associado à sua rotura por destacamento. Essa análise será apresentada na secção seguinte.

3.3 Aplicação dos documentos selecionados comparando com resultados obtidos experimentalmente

O objetivo principal desta análise consiste em perceber se os valores obtidos para a resistência à flexão de elementos de betão armado reforçados com CFRP pelos métodos de cálculo dos

documentos apresentados anteriormente se aproximam de valores reais de ensaios experimentais. Para isso, foram escolhidos três casos de estudo para que através das características das secções das vigas e laje, do betão, do aço e dos laminados, se aplicassem as expressões de cálculo para obter uma previsão da carga de rotura dos elementos, de modo a fazer uma comparação com o valor obtido experimentalmente. Foram assim escolhidos dois ensaios experimentais de vigas e um de uma faixa de laje. Chama-se à atenção que os resultados relativos à faixa de laje podem ter pouca representatividade por esta ser de escala reduzida.

3.3.1 Descrição dos ensaios experimentais

3.3.1.1 Considerações iniciais

As vigas e a laje dos casos de estudo foram sujeitas a um carregamento com recurso a macacos hidráulicos e foram utilizadas células de carga para medir as cargas aplicadas nos elementos. O carregamento foi aplicado perpendicularmente ao desenvolvimento longitudinal das vigas e da laje com duas cargas pontuais (ver esquema de ensaio nas secções seguintes). É importante referir que os valores médios de resistência à compressão do betão (f_{cm}) utilizados nos casos de estudo relativos às vigas foram 80% do resultado obtido nos ensaios de compressão nos provetes cúbicos aos 28 dias. Considerou-se a utilização desta aproximação adequada, pois esta seria a resistência aproximada caso os ensaios tivessem sido efetuados em provetes cilíndricos. No entanto, para a faixa de laje optou-se por utilizar o valor médio de resistência à compressão do betão obtido nos ensaios de compressão nos provetes cúbicos aos 337 dias (idade representativa do betão no dia do ensaio à laje), devido ao facto da faixa de laje estar fortemente armada (estribos) e, por isso, o betão estar bastante confinado fazendo com que o valor da resistência à compressão na laje se aproxime mais do valor dado pelos ensaios em provetes cúbicos.

De seguida, apresentam-se as propriedades e características de cada caso de estudo.

3.3.1.2 Caso de estudo 1

O caso de estudo 1 consiste na análise de uma viga de betão armado reforçada com dois laminados de secção 100x1,4 mm^2 do tipo S&P Laminates CFK 200/2000. Na figura 3.5 representa-se a secção da viga e na tabela 3.5 apresentam-se as características necessárias para a definição do betão, aço e laminados utilizados no ensaio.

Tabela 3.5 - Características do aço, betão e laminados do caso de estudo 1 (adaptado de [13]).

Caso de estudo 1					
Características das armaduras (aço)		**Características do betão**		**Características do reforço (CFRP)**	
A_{s1} (cm²)	16,10	recobrimento (m)	0,02	A_f (cm²)	2,8
A_{s2} (cm²)	2,36	E_c (MPa)	30000	E_f (MPa)	208000
f_{sym} (MPa)	580	f_{cm} (MPa)	26,97	L (m)	5,6
E_s (MPa)	210000	f_{ctm} (MPa)	2,70		
ε_{sym} (-)	0,00276				

Dado que no ensaio não era referido o valor médio das tensões máximas de tração do betão, utilizou-se a seguinte expressão para obter a resistência à tração com base na resistência média à compressão do betão:

$$f_{ctm} = 0{,}3\, {f_{ck}}^{2/3} \tag{3.4}$$

Esta expressão foi retirada do EC2 parte 1.1 [14].

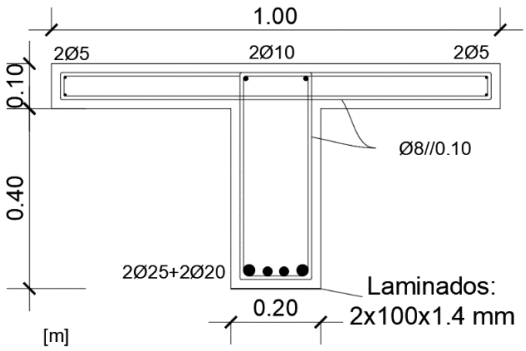


Figura 3.5 - Características da secção da viga do caso de estudo 1 (adaptado de [13]).

O esquema de ensaio utilizado, assim como os diagramas de momentos fletores e de esforço transverso, apresentam-se na figura 3.6.

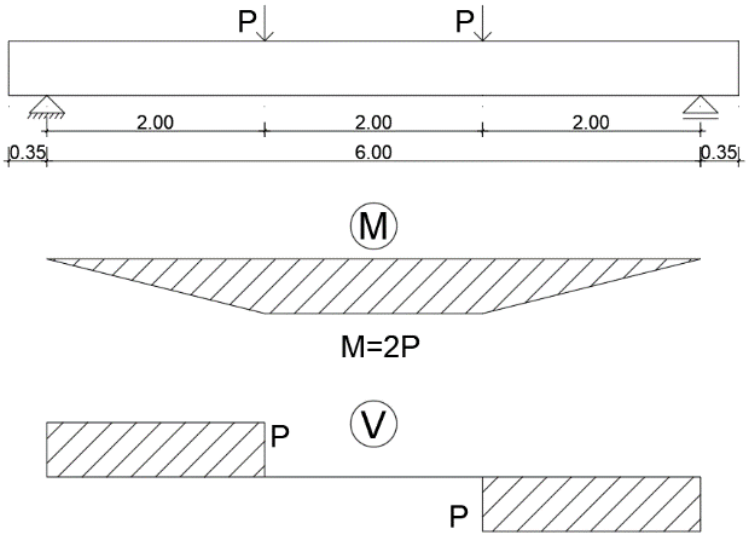


Figura 3.6 - Modelo de cálculo da viga do caso de estudo 1 (adaptado de [13]).

Finalmente, o valor da carga última resultante deste ensaio experimental foi de $P = 291{,}7\ kN$ e o valor da extensão máxima do laminado CFRP foi de 0,0074. O modo de rotura observado no ensaio foi destacamento do laminado de CFRP, ocorrendo fendilhação nas zonas de extremidade do laminado [13].

3.3.1.3 Caso de estudo 2

O caso de estudo 2 consiste na análise de uma viga de betão armado reforçada com um laminado de secção 80x1,4 mm² do tipo S&P Laminates CFK 150/2000. Na figura 3.7 representa-se a secção da viga e na tabela 3.6 apresentam-se as características necessárias para a definição do betão, aço e laminados utilizados no ensaio.

Tabela 3.6 - Características do aço, betão e laminados do caso de estudo 2 (adaptado de [12]).

Caso de estudo 2					
Características das armaduras (aço)		**Características do betão**		**Características do reforço (CFRP)**	
A_{s1} (cm²)	3,02	recobrimento superior (m)	0,02	A_f (cm²)	1,12
A_{s2} (cm²)	3,39	recobrimento inferior (m)	0,04	E_f (MPa)	165000
f_{sym} (-) (MPa)	535	E_c (MPa)	30000	L (m)	2,5
f_{sym} (+) (MPa)	583	f_{cm} (MPa)	24,80		
E_s (MPa)	210000	f_{ctm} (MPa)	2,60		
ε_{sym} (-)	0,00255				

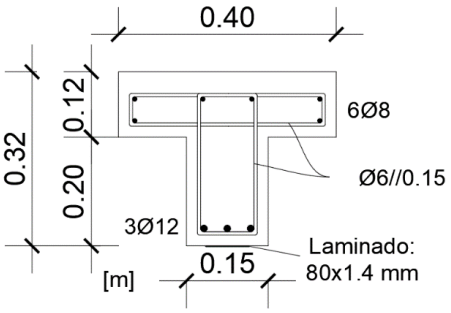


Figura 3.7 - Características da secção da viga do caso de estudo 2 (adaptado de [12]).

O esquema de ensaio utilizado, assim como os diagramas de momentos fletores e de esforço transverso, apresentam-se na figura 3.8.

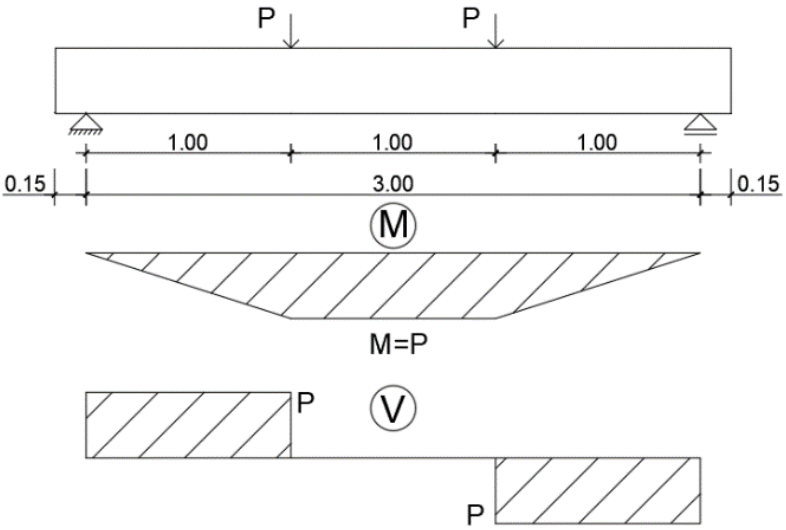


Figura 3.8 - Modelo de cálculo da viga do caso de estudo 2 (adaptado de [12]).

Finalmente, o valor da carga última resultante deste ensaio experimental foi de $P = 158{,}9\ kN$ e o valor da extensão máxima do laminado CFRP não foi lido no ensaio. O modo de rotura da viga foi por destacamento do laminado de CFRP, ocorrendo arrancamento do betão de recobrimento na zona de ancoragem do laminado, como ilustrado na figura 3.9 [12].

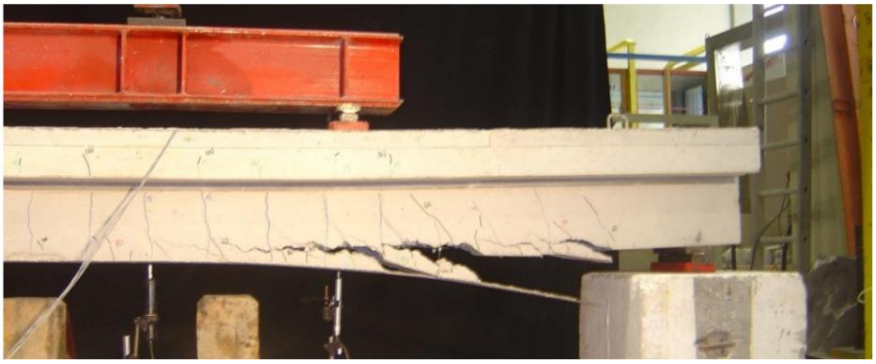


Figura 3.9 - Rotura da viga por destacamento do laminado CFRP com arranque do betão de recobrimento [12].

3.3.1.4 Caso de estudo 3

O caso de estudo 3 consiste na análise de uma faixa de laje de betão armado reforçada com dois laminados de secção 20x1,4 mm^2 do tipo S&P Laminates CFK 150/2000. Na figura 3.10 representa-se a secção da faixa de laje e na tabela 3.7 apresentam-se as características necessárias para a definição do betão, aço e laminados utilizados no ensaio.

Tabela 3.7 - Características do aço, betão e laminado do caso de estudo 3 (adaptado de [16]).

Caso de estudo 3					
Características das armaduras (aço)		**Características do betão**		**Características do reforço (CFRP)**	
A_{s1} (cm²)	0,85	recobrimento (m)	0,02	A_f (cm²)	0,56
A_{s2} (cm²)	0,85	E_c (MPa)	30000	E_f (MPa)	189000
f_{sym} (MPa)	594	f_{cm} (MPa)	29,50	L (m)	1,1
E_s (MPa)	201900	f_{ctm} (MPa)	1,70		
ε_{sym} (-)	0,00294				

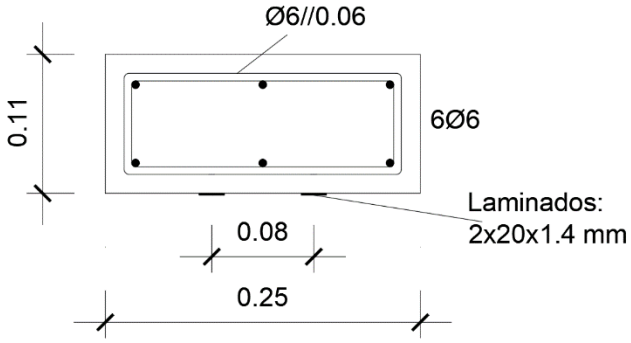


Figura 3.10 - Características da secção da laje do caso de estudo 3 (adaptado de [16]).

O esquema de ensaio utilizado, assim como os diagramas de momentos fletores e de esforço transverso, apresentam-se na figura 3.11.

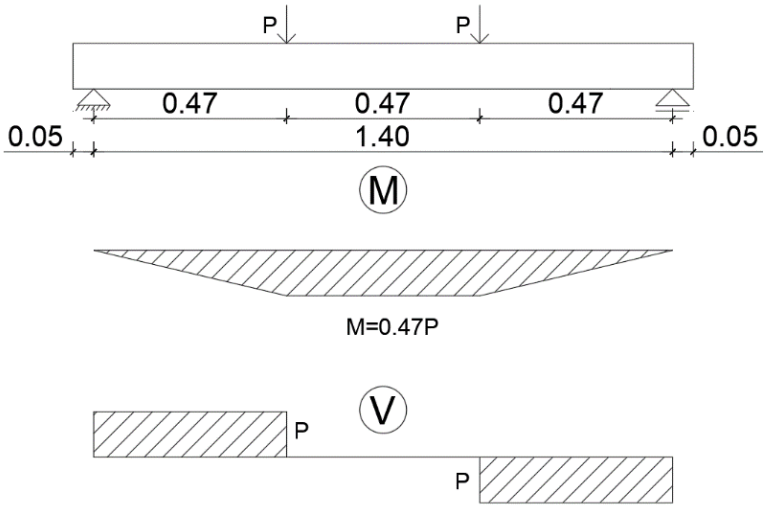


Figura 3.11 - Modelo de cálculo da laje do caso de estudo 3 (adaptado de [16]).

Finalmente, o valor da carga última resultante deste ensaio experimental foi de $P = 14{,}95\ kN$ e o valor da extensão máxima do laminado CFRP foi de 0,00315. O modo de rotura da faixa de laje foi por destacamento do laminado de CFRP na zona de ancoragem como ilustrado na figura 3.12 [16].

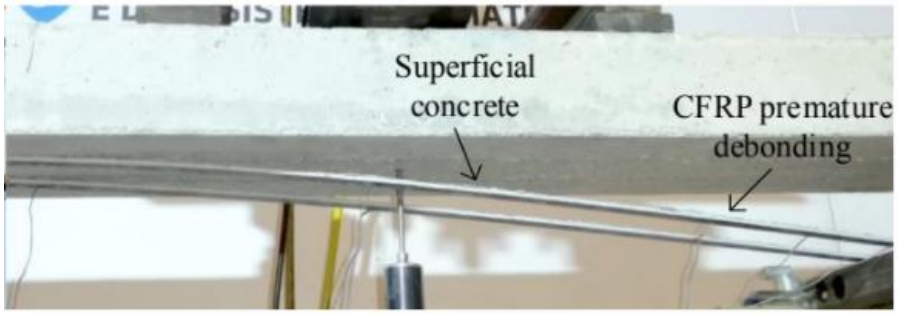


Figura 3.12 - Rotura da faixa de laje por destacamento do laminado CFRP na zona de ancoragem [16].

3.3.2 Apresentação dos resultados obtidos com a utilização dos documentos selecionados

Com base nos dados dos ensaios apresentados na secção 3.3.1, foram utilizados os métodos de cálculo para obter a carga máxima resistente, assim como, a extensão máxima do sistema CFRP. Todos os cálculos foram efetuados com os coeficientes de segurança com valor de 1 para que os resultados obtidos fossem diretamente comparáveis com os valores experimentais.

À semelhança do processo descrito na secção 3.2.2, determinou-se o valor da extensão máxima do sistema CFRP através dos diferentes métodos e recomendações dos documentos.

Para obter a posição da linha neutra procedeu-se de forma semelhante em todos os documentos, sendo esta obtida por equilíbrio de forças e verificando qual o modo de rotura válido. Nesta análise, o modo de rotura em todos os casos de estudo utilizando os diferentes documentos foi, também, por destacamento do laminado de CFRP.

Seguidamente, através da posição da linha neutra e do modo de rotura válido, determinou-se o momento fletor resistente com base nas expressões dos vários documentos apresentados na secção 2.5. Com o valor do momento fletor resistente, é possível determinar a máxima carga resistente para cada metodologia através da relação demonstrada na figura 3.6, figura 3.8 e figura 3.11.

Por último, verificou-se para os documentos *fib* 14, *fib* 90 e anexo J algumas recomendações relativas ao destacamento do sistema CFRP na zona de ancoragem, de modo a obter o esforço transverso máximo resistente e, consequentemente, a máxima carga resistente a este tipo de solicitação (novamente através da relação demonstrada na figura 3.6, figura 3.8 e figura 3.11).

De seguida, apresentam-se os valores obtidos para cada documento, assim como, de algumas variáveis necessárias no método de cálculo de cada documento (variáveis essas todas explicadas e enunciadas no capítulo anterior, na secção 2.5).

Tabela 3.8 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento fib 14.

	ε_f	ψ	x (m)	δG	M (kNm)	P (kN)
Caso 1	0,0065	0,535	0,088	0,359	576,81	288,41
Caso 2		0,524	0,055	0,358	80,07	80,07
Caso 3		0,647	0,025	0,372	10,81	22,99

Tabela 3.9 - Carga máxima resistente obtida através de métodos de verificação de segurança complementares relativos a fenómenos de destacamento do sistema CFRP utilizando o documento fib 14 [expressão (2.15)].

	γ_c	f_{cbd} (MPa)	P (kN)
Caso 1	1	4,86	423,97
Caso 2		4,68	103,15
Caso 3		3,06	10,00

Tabela 3.10 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento fib 90.

	γ_{fb}	k_b	$f_{f,IC}$ (MPa)	ε_f	k_1	x (m)	k_2	M (kNm)	P (kN)
Caso 1	1	1,314	1127,90	0,0054	0,488	0,092	0,355	545,82	272,91
Caso 2		1,225	910,36	0,0055	0,476	0,057	0,354	74,23	74,23
Caso 3		1,33	1123,88	0,0059	0,620	0,025	0,368	10,20	21,69

Tabela 3.11 Carga máxima resistente obtida através de métodos de verificação de segurança complementares relativos a fenómenos de destacamento do sistema CFRP utilizando o documento fib 90 [expressão (2.15) com alterações referidas na secção 2.5.3.2].

	γ_{fb}	τ_{bfk} (MPa)	α_{cc}	τ_{b1k} (MPa)	τ_{Rd} (MPa)	P (kN)
Caso 1	1	6,14	1	0,58	3,08	269,04
Caso 2		5,78		0,62	3,03	66,88
Caso 3		5,10		0,53	3,26	10,65

Tabela 3.12 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento americano ACI.

	ε_f	β_1	x (m)	ψ_f	M (kNm)	P (kN)
Caso 1	0,0039	0,85	0,051	1	518,98	259,49
Caso 2	0,0042		0,032		69,10	69,10
Caso 3	0,0043		0,016		8,71	18,53

Tabela 3.13 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento da CNR.

	k_q	γ_{fd}	k_b	k_{g2} (mm)	FC	η_f	γ_f	f_{fdd2} (MPa)	ε_f	ψ	x (m)	λ	M (kNm)	P (kN)
Caso 1	1	1	1,31	0,1	1	1	1	864,20	0,0042	0,8	0,054	0,4	524,47	262,24
Caso 2			1,22					675,25	0,0041		0,034		76,45	76,45
Caso 3			1,33					693,86	0,0037		0,015		8,58	18,25

Tabela 3.14 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento Anexo J.

	f_{bfRd}	ε_{fbd}	x (m)	M (kNm)	P (kN)
Caso 1	365,23	0,00176	0,106	0,00	136,47
Caso 2	294,78	0,00179	0,061	32,48	32,48
Caso 3	363,92	0,00193	0,024	3,92	8,33

Tabela 3.15 - Carga máxima resistente obtida através de métodos de verificação de segurança complementares relativos a fenómenos de destacamento do sistema CFRP utilizando o documento Anexo J [expressão (2.86)].

	ρ_l	a_{fE} (mm)	P (kN)
Caso 1	0,0175	200	154,58
Caso 2	0,0003	250	44,38
Caso 3	0,0049	150	18,30

Para que a compreensão dos resultados obtidos seja mais percetível, apresenta-se de seguida uma síntese de comparação dos valores, assim como uma possível explicação para as diferenças.

3.3.3 Análise comparativa dos resultados obtidos com os resultados experimentais

Nesta subsecção, compararam-se os resultados obtidos com base nos documentos com os valores obtidos experimentalmente. De seguida, apresenta-se a comparação da extensão máxima do sistema CFRP e da carga de rotura, obtida através da verificação da capacidade resistente à flexão na secção de esforço máximo e através de métodos de verificação de segurança complementares relativos a fenómenos de destacamento do sistema CFRP.

3.3.3.1 Comparação dos valores da extensão máxima do sistema CFRP

Na tabela 3.16 apresenta-se a comparação entre a previsão da extensão máxima do sistema CFRP obtida através dos vários documentos com a obtida experimentalmente. Como referido anteriormente, no caso de estudo 2 não houve medição deste parâmetro.

Tabela 3.16 - Comparação da extensão máxima do sistema CFRP obtida através dos documentos e experimentalmente.

Caso de estudo	Extensão máxima sistema CFRP		Extensão máxima sistema CFRP obtida experimentalmente
1	Bulletin 14 da *fib*	0,00650	0,0074
	Bulletin 90 da *fib*	0,00542	
	ACI-440.2R-17	0,00395	
	CNR-DT 200 R1/2012	0,00415	
	Annex J do EC2	0,00176	
2	Bulletin 14 da *fib*	0,00650	
	Bulletin 90 da *fib*	0,00552	
	ACI-440.2R-17	0,00425	
	CNR-DT 200 R1/2012	0,00409	
	Annex J do EC2	0,00179	
3	Bulletin 14 da *fib*	0,00650	0,00315
	Bulletin 90 da *fib*	0,00595	
	ACI-440.2R-17	0,00433	
	CNR-DT 200 R1/2012	0,00367	
	Annex J do EC2	0,00193	

Primeiramente, é necessário perceber que a análise de resultados deve ser feita separadamente para a faixa de laje, pois esta, como referido anteriormente, tem uma representatividade menor por ser de escala reduzida. Assim, analisa-se de seguida os resultados obtidos para as vigas (caso de estudo 1 e 2).

Observando os resultados obtidos para as vigas e comparando com os valores obtidos experimentalmente percebe-se que aqueles são bastante conservativos.

Em relação ao Bulletin 14 da *fib*, este recomenda um valor fixo para a extensão máxima do CFRP e não clarifica se este valor está afetado por coeficientes de segurança. Assim, decidiu-se assumir como valor médio, no entanto, este pode ser superior e apesar desta condição, é o valor mais próximo da realidade para o caso 1.

É importante referir que para o Bulletin 90 da *fib* os valores considerados para o cálculo da extensão do laminado de acordo com a expressão (2.21), foram os valores médios por serem os que melhor se ajustam ao comportamento real, isto é, k_{cr} toma o valor de 2,1 e k toma o valor de 0,25.

O valor da extensão máxima do sistema CFRP dos restantes documentos é obtido através das diferentes expressões apresentadas na secção 2.5, com base nas características do sistema CFRP e do betão apresentadas anteriormente (usando os valores médios das propriedades dos materiais). Uma das explicações possíveis para os valores previstos serem inferiores aos experimentais, deve-se

ao facto das propriedades do betão utilizadas, nomeadamente a resistência média à compressão e à tração do betão, serem valores resultantes de ensaios realizados aos 28 dias. Sabe-se, no entanto, que o ensaios à viga foi realizado algum tempo depois dos 28 dias de vida do betão, como tal, a sua resistência à tração e compressão aquando da realização do ensaio pode ter sido superior aos valores utilizados nos cálculos. Com valores de resistência superiores, os valores da extensão máxima no sistema CFRP também seriam superiores.

É importante referir, também, que as expressões apresentam certos fatores corretivos calibrados experimentalmente que são bastante conservativos e, como tal, condicionam bastante o valor previsto para a extensão máxima do CFRP. É exemplo disso o fator $k_{G,2}$ presente na expressão (2.59), referente ao documento da CNR, que sugere o valor de 0,2 mm, que condiciona fortemente a extensão máxima de tração do sistema. Isto, consequentemente, resulta numa extensão máxima bastante inferior à verificada experimentalmente.

Relativamente aos valores obtidos para a faixa de laje, apenas a extensão dada pelo Anexo J é inferior à obtida experimentalmente. Chama-se à atenção, no entanto, que a extensão máxima do CFRP medida no ensaio é bastante baixa e apenas foi realizado um ensaio experimental (i.e. sem repetições). Este tipo de ensaios, e em particular o fenómeno de descolamento do reforço de CFRP, apresentam uma variabilidade intrínseca elevada, tornando este resultado menos fiável. Outro aspeto importante, referido anteriormente, é o facto da laje ser de escala reduzida, deixando dúvidas relativas à sua representatividade. No entanto, as diferenças relativas entre os resultados obtidos pelos vários documentos são semelhantes às obtidas, nos casos das vigas. A análise de um elemento com dimensões inferiores, conclui que o facto do documento Bulletin 14 da *fib* recomendar um valor fixo para a extensão máxima poderá não ser adequado dada a influência que as propriedades dos materiais e geometria dos elementos e do sistema de reforço têm no seu desempenho mecânico.

Em relação ao documento Anexo J, este apresenta dois métodos distintos para obter a tensão resistente do CFRP, um método simplificado e outro mais complexo. Contrariamente ao que seria de esperar, fazendo os cálculos através do método mais complexo, o valor da extensão máxima no CFRP obtida foi inferior à do método simplificado. Este facto deve-se à razão descrita anteriormente, pois o método mais complexo envolve fatores corretivos que, apesar de terem sido calibrados com base em ensaios experimentais, são muito conservativos, dando origem a uma extensão bastante inferior à que se obteve nos ensaios de flexão descritos no presente capítulo. Os resultados obtidos pelo método mais complexo, utilizando a expressão para obter tensão máxima no reforço CFRP (2.70), apresentam-se na tabela 3.17.

Tabela 3.17 - Valores obtidos para a extensão máxima do sistema CFRP utilizando o método mais complexo do documento Anexo J.

	η_{cc}	k_{tc}	k_{t_t}	τ_{f1k} (MPa)	k_{sys,b_1}	k	$f_{ctmsurf}$ (MPa)	k_{sys,b_2}	s_{f0k} (mm)	$f_{bfk,máx}$ (MPa)	f_{bfRd} (MPa)	ε_f
Caso 1	1	1	1	2,59	1	0,67	1,82	1	0,2	277,56	277,56	0,00133
Caso 2				2,42		0,66	1,73			238,89	238,89	0,00145
Caso 3				2,17		0,69	1,17			242,20	242,20	0,00128

Assim, comparando estes valores com os valores apresentados na tabela 3.16, optou-se por utilizar na secção seguinte para estimar a carga de rotura, os valores dados pelo método simplificado por serem mais próximos dos obtidos nos ensaios experimentais.

3.3.3.2 Comparação dos valores da carga resistente obtida

Na Tabela 3.18, apresenta-se a comparação dos valores obtidos da carga resistente com os valores observados nos ensaios experimentais de referência. Os valores da carga resistente foram obtidos considerando a verificação da capacidade resistente à flexão na secção de esforço máximo pelos diferentes métodos de cálculo recomendados pelos documentos referidos na secção 2.5.

Tabela 3.18 - Comparação da carga resistente considerando a verificação da capacidade resistente à flexão com a carga obtida experimentalmente.

Caso de estudo	**Carga resistente (kN)**		**Carga obtida experimentalmente (kN)**
1	Bulletin 14 da *fib*	288,41	291,7
	Bulletin 90 da *fib*	272,91	
	ACI-440.2R-17	259,49	
	CNR-DT 200 R1/2012	262,24	
	Annex J do EC2	136,47	
2	Bulletin 14 da *fib*	80,07	79,45
	Bulletin 90 da *fib*	74,23	
	ACI-440.2R-17	69,10	
	CNR-DT 200 R1/2012	76,45	
	Annex J do EC2	32,48	
3	Bulletin 14 da *fib*	22,99	14,95
	Bulletin 90 da *fib*	21,69	
	ACI-440.2R-17	18,53	
	CNR-DT 200 R1/2012	18,25	
	Annex J do EC2	8,33	

Ao observar os valores percebe-se, novamente, que alguns dos resultados são bastante conservativos e inferiores ao valor obtido experimentalmente, à exceção da faixa de laje. Deste modo, deve-se analisar novamente os resultados relativos às vigas em separado.

Dado que o modo de rotura obtido para todos os documentos foi por destacamento do CFRP, o cálculo da posição da linha neutra e do momento fletor resistente foi feito com base no valor da extensão máxima do sistema CFRP. Assim, o valor da extensão máxima dada por cada documento é o principal fator condicionante para o valor final da carga resistente. Isto é, quanto maior for o valor da extensão máxima, ou seja, mais próximo do valor obtido experimentalmente, maior será a carga resistente obtida, e, consequentemente, mais próxima da real. Assim, conclui-se desde logo que o valor mais próximo do experimental relativo às vigas é o obtido pelo método de cálculo do documento Bulletin 14 da *fib* e o mais afastado o valor dado pelo Anexo J.

Por outro lado, o facto dos valores relativos às resistências médias à compressão e tração do betão considerados nos cálculos serem inferiores aos reais na altura da realização dos ensaios das vigas, condicionaram a obtenção de previsões de resistência mais acertadas.

Relativamente à faixa de laje, os resultados obtidos para o valor da carga resistente são coerentes com a análise feita dos valores da extensão máxima do sistema CFRP. Mais uma vez, apenas o valor dado pelo Anexo J é significativamente inferior ao obtido experimentalmente. Dado que o modo de rotura obtido, à semelhança das vigas, foi por destacamento do laminado, os valores das extensões obtidas são o principal fator condicionante e, portanto, os resultados são os expectáveis.

Na tabela 3.19 apresenta-se a comparação entre os valores obtidos da carga resistente, através dos métodos de cálculo de verificação de segurança do destacamento do sistema CFRP presente nos documentos que propõem esta abordagem (Bulletin 14 da *fib*, Bulletin 90 da *fib* e Anexo J), com os valores observados nos ensaios experimentais. Os métodos de cálculo de verificação de segurança do destacamento do sistema CFRP utilizados foram a expressão (2.15) para o documento Bulletin 14 da *fib*, para o Bulletin 90 da *fib* foi utilizada a mesma expressão (2.15) com as alterações enunciadas na secção 2.5.3.2 e para o Anexo J foi utilizada a recomendação enunciada na expressão (2.86).

Tabela 3.19 - Comparação da carga resistente obtida pelos métodos de verificação de segurança complementares relativos a fenómenos de destacamento.

Caso de estudo	**Carga resistente - Destacamento (kN)**		**Carga obtida experimentalmente (kN)**
1	Bulletin 14 da *fib*	423,97	291,7
	Bulletin 90 da *fib*	269,04	
	Annex J do EC2	154,58	
2	Bulletin 14 da *fib*	103,15	79,45
	Bulletin 90 da *fib*	66,88	
	Annex J do EC2	44,38	
3	Bulletin 14 da *fib*	10,00	14,95
	Bulletin 90 da *fib*	10,65	
	Annex J do EC2	18,30	

Primeiramente, ao observar os valores apresentados relativos às vigas (caso de estudo 1 e 2), conclui-se que apenas os resultados para o documento da Bulletin 14 da *fib* não são condicionantes em relação aos resultados obtidos considerando a verificação da capacidade resistente à flexão na secção de esforço máximo. Isto é, os valores relativos aos métodos de cálculo de verificação de segurança do destacamento do sistema CFRP do documento da Bulletin 14 da *fib* são superiores aos valores da tabela 3.18.

Seguidamente, por outro lado, o facto dos documentos utilizarem nos seus métodos de cálculo os valores relativos à resistência média de compressão e tração do betão, pode provocar, mais uma vez, resultados inferiores à realidade, tendo em conta que estes valores não foram obtidos no dia dos ensaios das vigas (foram utilizadas nos cálculos os valores aos 28 dias por serem os únicos disponíveis).

Relativamente aos resultados obtidos para a faixa de laje, apenas o resultado dado pelo Anexo J não é condicionante em relação ao resultado obtido considerando a verificação da capacidade resistente à flexão na secção de esforço máximo. As expressões utilizadas são maioritariamente condicionadas pela resistência média de compressão e tração do betão, sendo que neste caso da faixa de laje, a

resistência média à compressão é bastante elevada, o que consequentemente, provoca uma carga superior pelo documento Anexo J do EC2. No entanto, os valores dados pelo Bulletin 14 da *fib* e Bulletin 90 da *fib* são inferiores, pois estes dependem da resistência média à tração, que neste caso é bastante inferior às resistências obtidas para as vigas. Por estas razões, os resultados previstos para o caso de estudo 3 apresentam diferenças relativamente aos restantes.

3.4 Considerações finais

O desenvolvimento de uma solução de reforço com sistema CFRP deve garantir um nível de segurança aceitável. Este aspeto relaciona-se, em certa medida, com o grau de confiança que existe nas atuais propostas feitas pelos documentos apresentados. Ao longo deste capítulo procurou-se avaliar as metodologias definidas nos vários documentos, relativas à verificação de segurança à flexão e ao destacamento do laminado CFRP.

Tendo em conta a análise feita aos valores da extensão máxima dos sistemas CFRP's e às correspondentes resistências à flexão dos elementos reforçados, conclui-se que os valores são de uma forma geral muito conservativos e abaixo dos resultados que se obtêm experimentalmente, e variam bastante conforme a recomendação do documento escolhido.

Conclui-se assim, que os valores sugeridos pelos documentos para cálculo da extensão máxima do sistema CFRP, limitam substancialmente a capacidade deste tipo de reforço no aumento da capacidade resistente dos elementos estruturais e explora apenas uma pequena parcela da resistência real destes sistemas.

No capítulo seguinte será feita a mesma avaliação das recomendações dos diferentes documentos para o sistema NSM, recorrendo ao mesmo exemplo prático e a diferentes casos de estudo experimentais.

4 Aplicação dos documentos selecionados para a técnica NSM

4.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivos principais a avaliação dos métodos de cálculo expostos nos documentos apresentados anteriormente, mais especificamente para a verificação da segurança à flexão de lajes e vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP instalados de acordo com a técnica NSM.

De modo a avaliar os métodos de cálculo referidos, assim como feito para o sistema EBR, estes serão aplicados num exemplo prático real (no reforço de um piso de um edifício), de modo a comparar os resultados obtidos com a aplicação das diferentes metodologias de dimensionamento; além disso, as previsões de resistência à flexão obtidas com recurso a essas metodologias serão também comparadas com resultados obtidos experimentalmente, disponíveis na literatura.

Numa primeira fase, apresenta-se o dimensionamento do reforço à flexão do sistema NSM necessário para o piso apresentado no capítulo anterior (secção 4.2). Numa segunda fase, apresentam-se os ensaios experimentais utilizados para comparar com os documentos analisados (secção 4.3.1), de seguida, apresentam-se os resultados obtidos com as metodologias preconizadas nos diferentes documentos, assim como uma comparação entre estes e os valores experimentais (secção 4.3.2 e 4.3.3). Por fim, apresentam-se as considerações finais (secção 4.4).

4.2 Aplicação dos documentos selecionados num exemplo prático

À semelhança do que foi feito no capítulo anterior para o sistema EBR, realiza-se o reforço em CFRP com o sistema NSM de um piso de um edifício. O edifício de habitação considerado é o apresentado na secção 3.2.1. Esta análise tem como objetivo obter as áreas de reforço necessárias de acordo com as várias metodologias e analisar a diferença entre si e entre os dois sistemas de reforço.

Aplicaram-se os métodos de cálculo relativos à flexão de sistemas NSM apresentados na secção 2.5, para obter a extensão de dimensionamento do sistema CFRP e da área de laminados necessária para garantir a segurança à flexão. De uma forma geral, o método de cálculo é semelhante ao feito para o sistema EBR, sendo a sua principal diferença a forma de cálculo da extensão de dimensionamento do sistema CFRP (NSM). Nos documentos Bulletin 90 da *fib* e ACI para se determinar a extensão de dimensionamento do CFRP é necessário logo à partida definir a resistência à tração e o módulo de elasticidade do laminado, por esse motivo, assumiram-se os valores apresentados na tabela 4.1. Para o documento Annex *J* do EC2, foi necessário para além do valor do módulo de elasticidade, assumir, também, a área de cada laminado, considerando-se, numa primeira iteração, uma área utilizada recorrentemente de 0,28 cm^2, isto é, correspondendo a laminados com largura de 20 mm e espessura de 1,4 mm (e comercialização corrente no mercado nacional).

Tal como nos cálculos relativos ao sistema EBR, considerou-se a participação das armaduras de aço à compressão e de forma simplificada assumiu-se uma distribuição retangular das tensões de compressão no betão.

Para obter a posição da linha neutra e a área de laminado necessária procedeu-se de forma semelhante ao apresentado para o sistema EBR (com as naturais diferenças em relação à geometria e às extensões máximas de reforço). Os cálculos encontram-se com maior detalhe em anexo.

De seguida, apresenta-se os resultados obtidos para a laje e viga.

4.2.1 Resultados obtidos para a laje e viga

Conforme descrito anteriormente, começou-se por determinar a extensão máxima de dimensionamento do laminado dada por cada documento. Para os materiais e geometrias em causa, o modo de rotura condicionante foi por destacamento do CFRP. As expressões utilizadas para obter as extensões indicadas na tabela 4.1, foram para os documentos Bulletin 90 da fib, ACI-440.2R-17 e Annex J do EC2, (2.23), (2.51) e (2.67), respetivamente. Os resultados obtidos apresentam-se de seguida.

Tabela 4.1 - Extensão do laminado obtida através dos diferentes documentos.

Extensão do laminado obtida				
Caso de estudo	Documento	Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Extensão
Laje	Bulletin 90 da *fib*	168000	2850	0,0109
	ACI-440.2R-17			0,0119
	Annex J do EC2			0,0064
Viga	Bulletin 90 da *fib*	168000	2850	0,0109
	ACI-440.2R-17			0,0119
	Annex J do EC2			0,0063

De seguida, determinou-se a área mínima de laminado necessária para reforçar a secção em causa. As áreas obtidas correspondem ao momento fletor resistente indicado na tabela 3.2 (25,38 kNm/m para a laje e 237,49 kNm para a viga). Os resultados obtidos para os diferentes documentos apresentam-se na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Área de laminado obtida através dos diferentes documentos.

Área de laminado obtida		
Caso de estudo	Documento	Área
Laje	Bulletin 90 da *fib*	0,695 cm²/m
	ACI-440.2R-17	0,832 cm²/m
	Annex J do EC2	1,148 cm²/m
Viga	Bulletin 90 da *fib*	0,823 cm²
	ACI-440.2R-17	0,889 cm²
	Annex J do EC2	1,435 cm²

4.2.2 Análise dos resultados obtidos para a laje e viga

Observando os valores das áreas de laminado obtidas, à semelhança do que se concluiu relativamente ao sistema EBR, percebe-se que estas estão diretamente relacionadas com o valor previsto por cada documento para a extensão de dimensionamento do sistema CFRP; como o modo de rotura obtido para todos os documentos para a laje e viga foi por destacamento do laminado, esta relação seria previsível.

As conclusões retiradas ao analisar os resultados apresentados são as mesmas que para o sistema EBR, assim, mais uma vez, as áreas têm diferentes valores conforme as diferentes abordagens dos documentos em prever a extensão de destacamento do sistema CFRP e assim, torna-se importante comparar os resultados obtidos com os diferentes documentos com resultados obtidos experimentalmente, para ser possível analisar com maior detalhe a precisão das diferentes metodologias em prever a resistência real de estruturas de betão armado reforçadas com sistemas CFRP instalados de acordo com a técnica NSM. Esta análise apresenta-se na secção 4.3.

4.2.3 Comparação dos resultados obtidos para o sistema EBR e NSM

Após a análise das diferentes metodologias de dimensionamento à flexão do reforço CFRP com sistema EBR e NSM, é importante analisar a diferença das áreas de reforço obtidas para cada sistema. Na tabela 4.3 apresenta-se a comparação dos valores das áreas de reforço obtidas para as duas técnicas, EBR e NSM.

Tabela 4.3 - Comparação das áreas obtidas pelos diferentes sistemas de reforço.

Comparação das áreas obtidas pelos sistemas EBR e NSM			
Caso de estudo	Documento	Área obtida pelo sistema EBR	Área obtida pelo sistema NSM
Laje	Bulletin 90 da *fib*	2,322 cm²/m	0,695 cm²/m
	ACI-440.2R-17	2,700 cm²/m	0,832 cm²/m
	Annex J do EC2	5,223 cm²/m	1,148 cm²/m
Viga	Bulletin 90 da *fib*	2,739 cm²	0,823 cm²
	ACI-440.2R-17	3,033 cm²	0,889 cm²
	Annex J do EC2	6,077 cm²	1,435 cm²

Ao comparar os valores entre sistemas percebe-se, como seria de esperar, que as áreas de reforço de CFRP pelo sistema EBR são bastante superiores às áreas necessárias para sistema NSM (para o mesmo momento fletor resistente). Isto pode ser explicado pelo facto dos sistemas NSM terem melhores propriedades de aderência ao betão, o modo de rotura por destacamento ocorre para extensões no CFRP superiores e de forma mais controlada/progressiva, sendo por isso necessária menos área de reforço para as mesmas cargas aplicadas.

4.3 Aplicação dos documentos selecionados comparando com resultados obtidos experimentalmente

À semelhança do estudado para o sistema EBR, o objetivo principal desta análise consiste em perceber se os valores obtidos pelos métodos de cálculo dos documentos apresentados anteriormente se aproximam de valores reais de ensaios experimentais. Para isso, foram escolhidos três casos de estudo para que através das características das secções das vigas e laje, do betão, do aço e dos laminados, se aplicassem as expressões de cálculo para obter a carga resistente à flexão dos elementos reforçados, de modo a fazer uma comparação com o valor obtido experimentalmente. Foram assim escolhidos dois ensaios experimentais de vigas e um de uma faixa de laje. Chama-se à atenção que os resultados relativos à faixa de laje podem ter pouca representatividade por esta ser de escala reduzida (à semelhança do que foi referido no capítulo anterior).

4.3.1 Descrição dos ensaios experimentais

Nos casos de estudo selecionados as vigas e a laje foram sujeitas a um carregamento aplicado com recurso a macacos hidráulicos, enquanto as cargas aplicadas nos elementos foram medidas por células de carga. O carregamento foi aplicado perpendicularmente ao desenvolvimento longitudinal das vigas e da laje sobre a forma de duas cargas pontuais.

Relativamente aos valores médios de resistência à compressão do betão (f_{cm}) utilizados nos casos de estudo relativos às vigas, estes foram obtidos nos ensaios de compressão de provetes cilíndricos à data dos ensaios das vigas. O caso de estudo relativo à faixa de laje é o mesmo apresentado no capítulo relativo ao sistema EBR, sendo a sua única diferença o tipo de sistema de reforço.

De seguida, apresentam-se as propriedades e características de cada caso de estudo.

4.3.1.1 Caso de estudo 1

O caso de estudo 1 consiste na análise de uma viga de betão armado reforçada com dois laminados de secção 10x1,4 mm^2 do tipo S&P Laminates CFK 150/2000. Na figura 4.1 representa-se a secção da viga e na tabela 4.4 apresentam-se as características necessárias para a definição do betão, aço e laminados utilizados no ensaio.

Tabela 4.4 - Características do aço, betão e laminados do caso de estudo 1 (adaptado de [17]).

Caso de estudo 1					
Características das armaduras (aço)		**Características do betão**		**Características do reforço (CFRP)**	
A_{s1} (cm²)	1,57	recobrimento (m)	0,02	A_f (cm²)	0,28
A_{s2} (cm²)	1,01	E_c (MPa)	30000	E_f (MPa)	175000
f_{sym} (MPa)	534,5	f_{cm} (MPa)	50,2	L (m)	2,3
E_s (MPa)	210000	f_{ctm} (MPa)	4,08		
ε_{sym} (-)	0,00255				

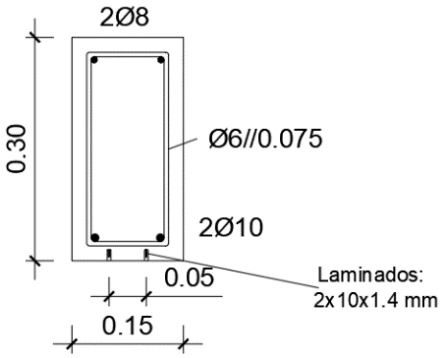


Figura 4.1 - Características da secção da viga do caso de estudo 1 (adaptado de [17]).

Dado que no ensaio não era referido o valor médio da resistência à tração do betão, utilizou-se a expressão (3.4) para obter esta propriedade com base na resistência média à compressão do betão.

O esquema de ensaio utilizado, assim como os diagramas de momentos fletores e de esforço transverso, apresentam-se na figura 4.2.

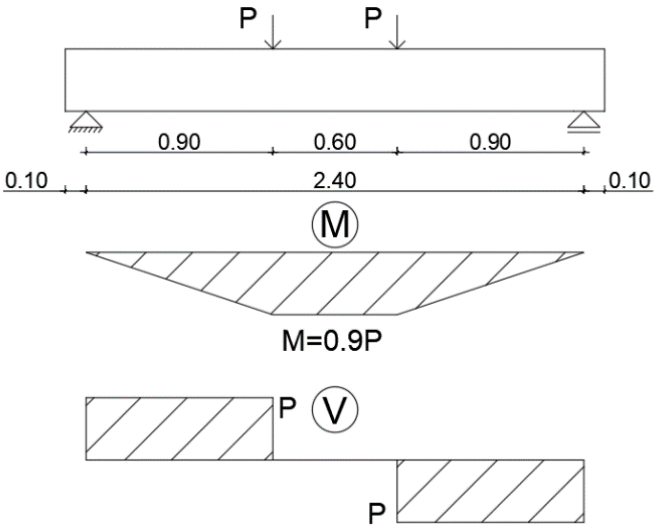


Figura 4.2 - Modelo de cálculo da viga do caso de estudo 1 (adaptado de [17]).

Finalmente, o valor da carga última resultante deste ensaio experimental foi de $P = 55{,}95\ kN$ e o valor da extensão do laminado CFRP foi de 0,0174. O modo de rotura da viga foi por destacamento do laminado de CFRP na zona de ancoragem com fendilhação na zona de flexão pura como ilustrado na figura 4.3 [17].

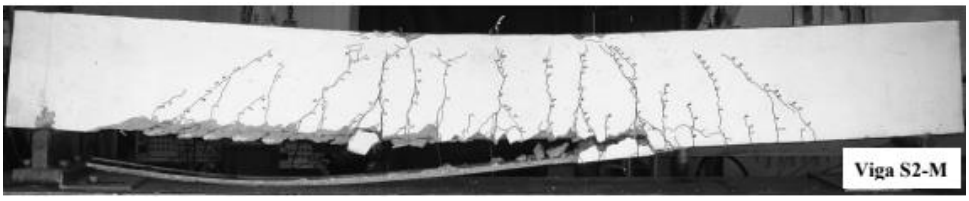


Figura 4.3 - Rotura da viga por destacamento do laminado CFRP com fendilhação expressiva [17].

4.3.1.2 Caso de estudo 2

O caso de estudo 2 consiste numa viga de betão armado reforçada com quatro laminados de secção 15x1,4 mm^2 do tipo S&P Laminates CFK 150/2000. Na figura 4.4 representa-se a secção da viga e na tabela 4.5 apresentam-se as características necessárias para a definição do betão, aço e laminados utilizados no ensaio.

Tabela 4.5 - Características do aço, betão e laminados do caso de estudo 2 (adaptado de [18]).

Caso de estudo 2					
Características das armaduras (aço)		**Características do betão**		**Características do reforço (CFRP)**	
A_{s1} (cm²)	2,356	recobrimento (m)	0,02	A_f (cm²)	0,846
A_{s2} (cm²)	2,356	E_c (MPa)	31170	E_f (MPa)	158000
f_{sym} (MPa)	465,75	f_{cm} (MPa)	53,1	L (m)	1,4
E_s (MPa)	200318	f_{ctm} (MPa)	4,24		
ε_{sym} (-)	0,00233				

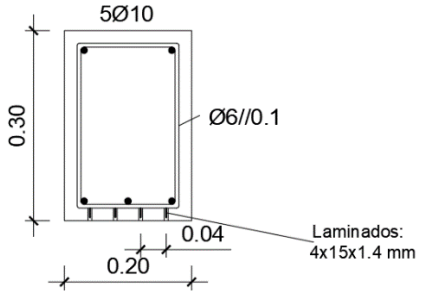


Figura 4.4 - Características da secção da viga do caso de estudo 2 (adaptado de [18]).

Neste caso de estudo, à semelhança do caso de estudo 1, não é referido o valor da resistência à tração do betão, por isso, utilizou-se novamente a expressão (3.4) apresentada anteriormente.

O esquema de ensaio utilizado, assim os diagramas de momentos fletores e de esforço transverso, apresentam-se na figura 4.5.

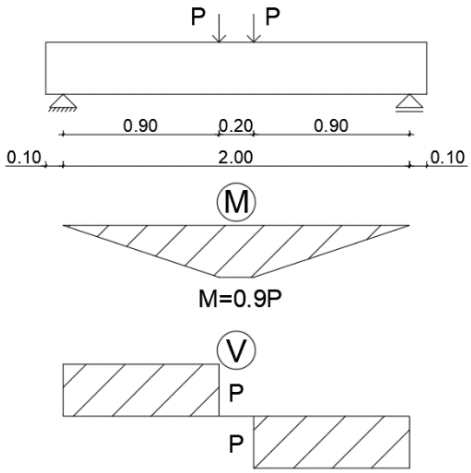


Figura 4.5 - Modelo de cálculo da viga do caso de estudo 2 (adaptado de [18]).

Finalmente, o valor da carga última resultante deste ensaio experimental foi de $P = 73{,}65\ kN$ e o valor da extensão máxima do laminado CFRP foi de 0,00976. O modo de rotura da viga foi por destacamento da camada de betão de recobrimento que inclui os laminados de CFRP [18].

Figura 4.6 - Rotura da viga por destacamento da camada de betão de recobrimento que inclui os laminados de CFRP [18].

4.3.1.3 Caso de estudo 3

O caso de estudo 3 consiste numa faixa de laje de betão armado reforçada com dois laminados de secção 10x1,4 mm^2 do tipo S&P Laminates CFK 150/2000. Na figura 4.7 representa-se a secção deste elemento e na tabela 4.4 apresentam-se as características necessárias para a definição dos laminados utilizados no ensaio. As restantes características são as mesmas apresentadas para a análise do sistema EBR (secção 3.3.1.4).

Tabela 4.6 - Características do reforço do caso de estudo 3 (adaptado de [16]).

Caso de estudo 3	
Características do reforço (CFRP)	
A_f (cm²)	0,28
E_f (MPa)	168000
L (m)	1,1

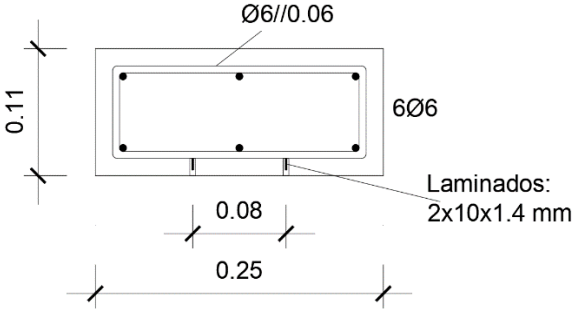


Figura 4.7 - Características da secção da laje do caso de estudo 3 (adaptado de [16]).

Finalmente, o valor da carga última resultante deste ensaio experimental foi de $P = 22{,}9\ kN$ e o valor da extensão máxima do laminado CFRP foi de 0,0116. O modo de rotura da faixa de laje foi por destacamento do laminado de CFRP pela extremidade, associado a fendas por corte expressivas como ilustrado na figura 4.8 [16].

Figura 4.8 - Rotura da faixa de laje por destacamento do laminado CFRP pela extremidade associado a fendas por corte [16].

4.3.2 Apresentação dos resultados obtidos com a utilização dos documentos selecionados

Com base nos dados dos ensaios apresentados na secção 4.3.1,à semelhança do que foi feito para o sistema EBR, foram utilizados os métodos de cálculo para obter a extensão máxima do sistema CFRP, assim como a carga resistente à flexão dos elementos. Todos os cálculos foram efetuados com os coeficientes de segurança com valor unitário para que os resultados obtidos fossem o mais próximo da realidade.

À semelhança do processo descrito para o sistema EBR na secção 3.3.2, determinou-se o valor da extensão máxima do sistema CFRP através dos diferentes métodos e recomendações dos documentos.

De seguida, apresentam-se os valores obtidos para cada documento, assim como, de algumas variáveis necessárias no método de cálculo de cada documento (variáveis essas todas explicadas e enunciadas na secção 2.5).

Tabela 4.7 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento Bulletin 90 da fib.

	η	γ_f	f_{fk}	ε_f	k_1	x (m)	k_2	M (kNm)	P (kN)
Caso 1	0,8	1	3165	0,0145	0,637	0,033	0,370	41,24	45,82
Caso 2			2435	0,0123	0,644	0,038	0,371	80,86	80,86
Caso 3			2850	0,0136	0,750	0,018	0,414	18,62	20,46

Tabela 4.8 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento ACI.

	ε_{fu}	ε_f	β_1	x (m)	ψ_f	M (kNm)	P (kN)
Caso 1	0,0181	0,0127	0,85	0,024	1	39,09	43,44
Caso 2	0,0154	0,0108		0,029		67,89	75,43
Caso 3	0,0170	0,0119		0,019		9,07	19,30

Tabela 4.9 - Extensão máxima do sistema CFRP e carga máxima resistente pelo estado último de flexão utilizando o documento Anexo J.

	τ_{b1d} (MPa)	γ_{BA}	τ_{bak} (MPa)	a_{ba}	τ_{bck} (MPa)	a_{bc}	a_r (mm)	F_f (N)	ε_f	x (m)	M (kNm)	P (kN)
Caso 1	15,25	1	30,50	0,5	31,88	0,9	100	13357,50	0,0055	0,040	28,70	31,89
Caso 2					32,79		150	21913,72	0,0066	0,040	52,10	57,88
Caso 3					24,44		150	15702,96	0,0067	0,018	6,81	14,50

Para que a compreensão dos resultados obtidos seja mais percetível, apresenta-se de seguida uma síntese de comparação dos valores, assim como uma possível explicação para as diferenças.

4.3.3 Análise comparativa dos resultados obtidos com os resultados experimentais

4.3.3.1 Comparação dos valores da extensão última do sistema CFRP

Na tabela 4.10 apresenta-se a comparação entre a extensão máxima do sistema CFRP obtida através dos vários documentos com a obtida experimentalmente.

Tabela 4.10 - Comparação entre a extensão máxima do sistema CFRP obtida através dos documentos com os valores experimentais.

Caso de estudo	**Extensão máxima sistema CFRP**		**Extensão máxima do sistema CFRP obtida experimentalmente**
1	Bulletin 90 da *fib*	0,01447	0,0174
	ACI-440.2R-17	0,01266	
	Annex J do EC2	0,00545	
2	Bulletin 90 da *fib*	0,01233	0,00976
	ACI-440.2R-17	0,01079	
	Annex J do EC2	0,00656	
3	Bulletin 90 da *fib*	0,01357	0,0116
	ACI-440.2R-17	0,01188	
	Annex J do EC2	0,00668	

Ao analisar os valores obtidos pelos documentos percebe-se que os resultados para o caso de estudo 2 e 3 são superiores aos experimentais para os documentos Bulletin 90 da *fib* e ACI, e inferiores para o documento do Anexo J. Por outro lado, o caso de estudo 1 apresenta valores inferiores ao experimental para todos os documentos.

Relativamente ao método de cálculo da extensão máxima do sistema CFRP, os documentos do Bulletin 90 da *fib* e ACI, apresentam uma recomendação semelhante, mas com coeficientes multiplicativos diferentes [ver expressão (2.23) e (2.51), respetivamente]. O documento Bulletin 90 da *fib* multiplica o valor da extensão de rotura à tração do CFRP por 0,8 e o ACI por 0,7.

O método de cálculo recomendado pelo *Annex J* do EC2 utiliza a resistência máxima por laminado. Este é bastante mais complexo e envolve diferentes variáveis relativas ao tipo de betão e ao tipo de

adesivos utilizados. Relativamente ao adesivo, esta expressão tem em conta a sua resistência à tração e compressão média. Nos casos de estudo analisados, todos eles utilizaram o mesmo tipo de adesivo, Resina 220 S&P, que apresenta valores de resistência à tração e compressão de 30 MPa e 90 MPa, respetivamente [19]. Os valores obtidos para este documento são os mais conservativos.

De seguida, analisa-se as cargas máximas obtidas.

4.3.3.2 Comparação dos valores da carga resistente obtida

Na tabela 4.11, apresenta-se a comparação dos valores obtidos da carga resistente com os valores dos ensaios experimentais de referência. Os valores da carga resistente foram obtidos considerando a verificação da capacidade resistente à flexão na secção de esforço máximo pelos diferentes métodos de cálculo recomendados pelos documentos referidos na secção 2.5.

Tabela 4.11 - Comparação da carga resistente obtida pelos diferentes documentos com a carga obtida experimentalmente.

Caso de estudo	**Carga resistente (kN)**		**Carga obtida experimentalmente (kN)**
1	Bulletin 90 da *fib*	45,82	55,95
	ACI-440.2R-17	43,44	
	Annex J do EC2	31,89	
2	Bulletin 90 da *fib*	80,86	73,65
	ACI-440.2R-17	75,43	
	Annex J do EC2	57,88	
3	Bulletin 90 da *fib*	20,46	22,9
	ACI-440.2R-17	19,30	
	Annex J do EC2	14,50	

À semelhança do observado para a técnica EBR, dado que o modo de rotura obtido para todos os documentos foi por destacamento do laminado, o cálculo da posição da linha neutra e do momento fletor resistente foi feito com base no valor da extensão máxima do sistema CFRP.

Assim, o valor da extensão máxima dada por cada documento é o principal fator condicionante para o valor final da carga resistente. Isto é, quanto maior for o valor da extensão máxima, ou seja, mais próximo do valor obtido experimentalmente, maior será a carga resistente obtida, e, consequentemente, mais próxima da real.

No entanto, isto não se verifica para o caso de estudo 3 pois apesar das extensões máximas para os documentos do Bulletin 90 da *fib* e ACI serem superiores à extensão obtida experimentalmente, as cargas resistentes dadas pelos documentos são inferiores à obtida experimentalmente. Chama-se novamente à atenção o facto da laje ser de escala reduzida, deixando dúvidas relativas à sua representatividade, além disso, este resultado pode também estar relacionado com incertezas relativas às propriedades (reais) dos materiais, em particular do betão (que nestes elementos estava muito confinado pela armadura do esforço transverso).

Assim, mais uma vez, conclui-se que o documento escolhido para fazer o dimensionamento do reforço condiciona bastante o resultado final obtido.

4.4 Considerações finais

De uma forma geral, os resultados obtidos para a extensão máxima do sistema CFRP e, consequentemente, para a carga máxima são valores conservativos comparando com os valores obtidos experimentalmente.

Relativamente ao dimensionamento de reforço de CFRP com a técnica NSM comparando com a técnica EBR, conclui-se que é necessária menos área de CFRP com o sistema NSM para se obter o mesmo momento fletor resistente. Este resultado esperado confirma que com a técnica NSM é mais eficaz, permitindo que se explore uma fração superior (em relação ao EBR) da elevada resistência à tração dos materiais CFRP.

Assim como concluído para o sistema EBR, percebe-se que com os valores sugeridos pelos documentos para a extensão máxima do sistema CFRP, limita substancialmente a capacidade deste tipo de reforço no aumento da capacidade resistente dos elementos estruturais, explorando apenas uma fração da real capacidade destes sistemas para aumentar a resistência à flexão de estruturas de betão armado.

5 Conclusões e perspetivas de desenvolvimentos futuros

5.1 Conclusões

A utilização de materiais CFRP no reforço de estruturas de betão armado registou um aumento considerável nas últimas décadas, sobretudo devido às vantagens que apresentam em relação aos materiais tradicionais, nomeadamente face ao aço. Estas vantagens incluem a elevada resistência à tração, a reduzida massa volúmica, a elevada resistência à corrosão e à fadiga e a facilidade de transporte e aplicação. No entanto, apesar das vantagens enumeradas anteriormente, a utilização de CFRP's apresenta um custo relativamente elevado, uma relação constitutiva linear até à rotura, exibindo, por isso, um comportamento frágil e os mecanismos de rotura prematuros do sistema de reforço na ligação betão-CFRP são relativamente frequentes, impedindo que a capacidade resistente do CFRP seja completamente explorada. Ao longo dos últimos anos, o comportamento mecânico de elementos de betão armado reforçados com CFRP's foi alvo de estudos relativamente profundos, existindo, por isso, vários documentos internacionais que abordam recomendações relativas ao dimensionamento do reforço de estruturas de betão armado com sistemas CFRP. A presente dissertação teve como principal objetivo analisar e comparar as propostas de dimensionamento dos principais documentos internacionais sobre reforço à flexão de estruturas de betão armado com sistemas CFRP, permitindo avaliar o impacto (em termos de material CFRP necessário) das metodologias de dimensionamento disponíveis.

O estudo bibliográfico realizado permitiu analisar as recomendações feitas para o dimensionamento de elementos estruturais de betão armado reforçados com sistemas CFRP, instalados de acordo com a técnica de colagem exterior (EBR) ou a técnica de inserção no betão de recobrimento (NSM). Foi possível encontrar os pontos comuns e os de divergência entre as filosofias de dimensionamento de sistemas CFRP colados para o reforço de estruturas de betão armado. Percebeu-se, logo à partida, que a maior divergência nas recomendações dos documentos era relativa à extensão de dimensionamento do CFRP (associada ao fenómeno de destacamento/descolamento do reforço). Este aspeto é o que mais influencia a área de reforço CFRP necessária pois, de uma forma geral, o modo de rotura condicionante mais comum é por destacamento do sistema CFRP.

De modo a comparar os métodos de cálculo expostos nos documentos apresentados, para a verificação da segurança à flexão de lajes e vigas de betão armado reforçadas com sistemas CFRP aplicados através das técnicas EBR e NSM, desenvolveram-se folhas de cálculo automático obedecendo às propostas normativas dos vários documentos selecionados. Com recurso a esta ferramenta de cálculo dimensionaram-se os reforços à flexão de uma laje e viga de um projeto real, tanto para a técnica EBR como NSM e fez-se um estudo comparativo de resultados experimentais com os previstos de acordo com as metodologias propostas nos vários documentos.

Na observação dos resultados obtidos no projeto real tanto para o sistema EBR como para o sistema NSM, os valores das áreas de sistema CFRP estão diretamente relacionadas com os valores de

extensão de dimensionamento do sistema CFRP. Dado que o modo de rotura obtido para todos os documentos para a laje e viga foi por destacamento do sistema CFRP, esta relação seria previsível. As áreas de CFRP obtidas têm valores significativamente diferentes conforme os documentos que se adotam para prever a extensão máxima do sistema CFRP (associada ao seu destacamento). Estes resultados demonstram que em termos práticos, chega-se a soluções muito diferentes de acordo com o documento que se adota para o dimensionamento destes sistemas.

Relativamente, à observação dos resultados obtidos para comparação com as campanhas experimentais selecionadas, conclui-se que os valores relativos à extensão máxima do sistema CFRP e à carga resistente são de uma forma geral muito conservativos e abaixo dos resultados que se obtêm experimentalmente, e variam bastante conforme a recomendação do documento escolhido, tanto para o sistema EBR como NSM.

Terminado o presente trabalho, pode concluir-se que, em geral, os valores sugeridos pelos documentos para cálculo da extensão máxima do sistema CFRP, limitam substancialmente a capacidade deste tipo de reforço no aumento da capacidade resistente dos elementos estruturais, permitindo que apenas uma parcela limitada da capacidade resistente destes sistemas seja explorada. Relativamente à próxima versão do Eurocódigo 2 (EC2) que incluirá um anexo (J) informativo sobre o dimensionamento deste tipo de sistemas, conclui-se que as abordagens adotadas neste documento, tanto para o sistema EBR como NSM, são significativamente mais conservativas do que as preconizadas nos outros documentos, conduzindo a soluções de reforço sobredimensionadas e pouco económicas.

5.2 Perspetivas de desenvolvimentos futuros

Apesar deste tipo de reforço com sistemas de CFRP ser cada vez mais utilizado e estudado, há ainda muito caminho a percorrer para que os métodos de cálculo tenham aceitação unânime e para que a técnica de reforço seja aplicada com maior confiança e que seja possível uma utilização mais racional dos materiais CFRP. Em seguida enumeram-se alguns aspetos que continuam a merecer maiores desenvolvimentos num futuro próximo.

- A análise comparativa entre os resultados experimentais e os previstos analiticamente demonstrou que os modelos de cálculo sugeridos nas propostas normativas analisadas precisam de ser melhoradas, pois são bastante conservativos relativamente à extensão real do sistema CFRP – é necessária uma melhor calibração dos coeficientes envolvidos nas expressões (empíricas) utilizadas para o cálculo da extensão de dimensionamento do CFRP;
- Como foi evidente ao longo da dissertação, o comportamento na interface betão-adesivo-CFRP é de uma importância vital para que a estrutura reforçada cumpra os objetivos para os quais foi dimensionada. A definição de uma lei constitutiva rigorosa, mas prática, do comportamento na interface que tenha em atenção o tipo de preparação da superfície é fundamental;

- Deve-se procurar definir expressões conciliadoras para o cálculo da força e comprimento de amarração, uma vez que as propostas de coeficientes que integram estas expressões não são unânimes e conduzem a valores muito distintos;
- Adaptar e simplificar as metodologias de cálculo existentes para o reforço com sistemas CFRP NSM) e EBR de modo que a sua utilização por projetistas seja mais fácil e inequívoca.

Bibliografia

[1] Fib bulletin 14, “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”, Fédération Internacionale du Béton (fib), Task Group 9.3 FRP, Lausanne, 2001.

[2] Fib bulletin 90, “Externally applied FRP reinforcement for concrete structures”, Fédération Internacionale du Béton (fib), Task Group 5.1 FRP, Lausanne, 2019.

[3] ACI 440.2R-17, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”, American Concrete Institute, 2017.

[4] CNR-DT 200 R1/2013, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures”, CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2014.

[5] Fib MC2010, “Model Code 2010, Final draft”, Fédération Internacionale du Béton (fib), Lausanne, 2010.

[6] EN 1992-1-1:2020 (E), “Annex J Strengthening of Existing Concrete Structures with CFRP”.

[7] Sociedad S&P Reinforcement France, “SISTEMA FRP S&P”, Ficha de produto, novembro 2014.

[8] SIKA, “Sika CarboDur® SikaWrap®”, Ficha de produto, janeiro 2011.

[9] Brito, J., Flores, I., “Diagnóstico, patologia e reabilitação de construções em betão armado, Apontamentos da cadeira de Patologia e Reabilitação da Construção”, Instituto Superior Técnico, 2005.

[10] ISO 10406-1 (2008), “Fibre reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test methods – Part 1: FRP bars and grids”, International Organisation for Standardization.

[11] Firmo, J., “Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP), Desenvolvimento de sistemas de proteção ao fogo”, Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, 2010.

[12] Duarte, P., “Estudo experimental do efeito da reparação de fendas no comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP”, Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, 2011.

[13] P. França, A. Costa, & J. Appleton, “Evaluation of the Performance of Anchoring Systems for the External Flexural Strengthening of RC Beams”, Instituto Superior Técnico, 2003.

[14] European Committee for Standardization (CEN), “EN1992-1-1 - Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”, CEN, Bruxelas, abril 2004.

[15] Câmara, J., Costa, A., Almeida, J., Júlio, E., Alfaiate, J., “Estruturas de Betão – Folhas de apoio às aulas”, Instituto Superior Técnico, setembro 2016.

[16] Azevedo, A., Firmo, J., Correia, J., Chastre, C., Biscaia, H., Franco, N., “Composites Part B -Fire behaviour of CFRP-strengthened RC slabs using different techniques – EBR, NSM and CREatE”, Artigo científico, Instituto Superior Técnico, Maio 2021.

[17] Dias, S., Barros, J., Azevedo, C., “Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos”, Dissertação de mestrado, FEUP, outubro 2012.

[18] Coelho, M., Silva, L., Sena-Cruz, J.M., Barros, J., “Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP’s sob acções monotónicas e de fadiga.” Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, 2011.

[19] Sociedad S&P Reinforcement France, “S&P Resin 220 HP”, Ficha de produto.

Anexos

Exemplo prático Técnica EBR

Laje

- Bulletin 14 da *fib*

Características do reforço (CFRP)		Momento resistente		Verificação das hipóteses	
εfd	0,0065	δG	0,362	εc	0,0015
Ef (MPa)	210000	εs+	0,0048	**εc < εcu ?**	SIM
Linha neutra		εs-	0,0002	**Incógnitas**	
0.85fc ou 1.0fc?	1	εf	0,0065	**x (m)**	0,029
ψ	0,572	σs+ (MPa)	204,00	**Af (cm2)**	0,875
Ts (kN)	80,76	σs- (MPa)	36,94		
Cs (kN)	17,84	**Mrd (kNm)**	25,38		
C (kN)	218,09	Ep. Equilíbrio	0,00		
Tf (kN)	119,50				
Ep. Equilíbrio	0,00				

- Bulletin 90 da *fib*

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Momento resistente		Verificação das hipóteses	
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	k2	0,345	εc	0,0007
bf (mm)	90	k1	0,316	σs+ (MPa)	204,00	**εc < εcu ?**	SIM
Ef (MPa)	210000	Ts (kN)	80,76	σs- (MPa)	43,83	**Incógnitas**	
ɣfb	1,5	Cs (kN)	21,167	εf	0,0017	**x (m)**	0,045
kb	1,32	C (kN)	189,35	**Mrd (kNm)**	25,38	**Af (cm2)**	3,703
km	0,17	Tf (kN)	129,76	Ep. Equilíbrio	0,00		
βl	1	Ep. Equilíbrio	0,00				
ffbk (MPa)	292,03						
kcr,m	1,8						
ffbk,IC (MPa)	525,66						
ffbd,IC (MPa)	350,44						
εfbd	0,00167						

- ACI-440.2R-17

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Momento resistente		Verificação das hipóteses		Verifica ?
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	β1	0,85	**εs > εsym ?**	0,0021	SIM
Ef (MPa)	210000	Ts (KN)	80,76	ψf	0,85	**εc < εcu ?**	0,0005	SIM
εfe (-)	0,00276	C (KN)	242,14	**Mrd (kNm)**	25,38	**Incógnitas**		
ffd (MPa)	579	Cs (kN)	22,95	Ep. Equilíbrio	0,00	**x (m)**	0,02	
		Tf (KN)	138,44			**Af (cm2)**	2,391	
		Ep. Equilíbrio	0,00					

- CNR-DT 200 R1/2012

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Tensões dos elementos		Verificação das hipóteses	
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	σf (MPa)	367,11	**εc < εcu ?**	SIM
bf (mm)	100	ψ	0,8	σc (MPa)	7	**Incógnitas**	
Ef (MPa)	210000	Ts (kN)	80,76	σs- (MPa)	26	**x (m)**	0,0175
εfk	0,017	Cs (kN)	12,62	σs+ (MPa)	204	**Af (cm2)**	2,539
kq	1	C (kN)	186,61	**Resistência**			
γfd	1,5	Tf (kN)	93,23	λ	0,40		
kb	1,31	Ep. Equilíbrio	0,00	**Mrd (kNm)**	25,38		
kg2 (mm)	0,10	**Extensões dos elementos**		Ep. Equilíbrio	0,00		
FC	1,00	εf	0,0017				
ηf	0,95	εc	0,0002				
γf	1,10	εs-	0,0001				
ffdd2 (MPa)	367,11	εs+	0,0014				
εffd	0,0017						
εfd	0,0017						

- Anexo J do EC2

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Momento resistente		Verificação das hipóteses	
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	k2	0,341	εc	0,0005
bf (mm)	150	k1	0,240	σs+ (MPa)	133,10	**εc < εcu ?**	SIM
Ef (MPa)	210000	Ts (kN)	52,69	σs- (MPa)	57,28	**Incógnitas**	
γBA	1,5	Cs (kN)	27,662	εf	0,0009	**x (m)**	0,056
kb	1,268	C (kN)	178,68	**Mrd (kNm)**	25,38	**Af (cm2)**	8,24
β1	1	Tf (kN)	153,65	Ep. Equilíbrio	0,00		
fbfRd	186,54	Ep. Equilíbrio	0,00				
εfbd	0,0009						

Viga

- Bulletin 14 da *fib*

Características do reforço (CFRP)		Momento resistente		Verificação das hipóteses	
εfd	0,0065	δG	0,343	εc	0,0006
Ef (MPa)	210000	εs+	0,0060	**εc < εcu ?**	SIM
Linha neutra		εs-	0,0002	**Incógnitas**	
0.85fc ou 1.0fc?	1	εf	0,0065	**x (m)**	0,054
ψ	0,285	σs+ (MPa)	204,00	**Af (cm2)**	1,115
Ts (kN)	274,57	σs- (MPa)	36,32		
Cs (kN)	20,70	**Mrd (kNm)**	237,50		
C (kN)	406,08	Ep. Equilíbrio	0,00		
Tf (kN)	152,22				
Ep. Equilíbrio	0,00				

- Bulletin 90 da *fib*

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Momento resistente		Verificação das hipóteses	
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	k2	0,338	εc	0,0003
bf (mm)	120	k1	0,158	σs+ (MPa)	204,00	**εc < εcu ?**	SIM
Ef (MPa)	210000	Ts (kN)	274,57	σs- (MPa)	42,43	**Incógnitas**	
L (m)	0	Cs (kN)	24,189	εf	0,0017	**x (m)**	0,098
ɣfb	1,5	C (kN)	414,08	**Mrd (kNm)**	237,50	**Af (cm2)**	4,571
kb	1,353	Tf (kN)	163,69	Ep. Equilíbrio	0,00		
km	0,17	Ep. Equilíbrio	0,00				
βl	1						
ffbk (MPa)	298,45						
kcr,m	1,8						
ffbk,IC (MPa)	537,21						
ffbd,IC (MPa)	358,14						
εfbd	0,00171						

- ACI-440.2R-17

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Momento resistente		Verificação das hipóteses		Verifica ?
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	β1	0,85	**εs > εsym ?**	0,0026	SIM
Ef (MPa)	210000	Ts (KN)	274,57	ψf	0,85	**εc < εcu ?**	0,0001	SIM
εfe (-)	0,00276	C (KN)	456,06	**Mrd (kNm)**	237,50	**Incógnitas**		
ffd (MPa)	579	Cs (kN)	10,75	Ep. Equilíbrio	0,00	**x (m)**	0,02	
		Tf (KN)	170,74			**Af (cm2)**	2,948	
		Ep. Equilíbrio	0,00					

- CNR-DT 200R1/2012

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Tensões dos elementos		Verificação das hipóteses	
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	σf (MPa)	377,89	**εc < εcu ?**	SIM
bf (mm)	120	ψ	0,8	σc (MPa)	2	**Incógnitas**	
Ef (MPa)	210000	Ts (kN)	274,57	σs- (MPa)	13	**x (m)**	0,0194
L (m)	0	Cs (kN)	7,30	σs+ (MPa)	204	**Af (cm2)**	3,835
εfk	0,017	C (kN)	412,20	**Resistência**			
kq	1	Tf (kN)	144,93	λ	0,40		
ɣfd	1,5	Ep. Equilíbrio	0,00	**Mrd (kNm)**	237,50		
kb	1,35	**Extensões dos elementos**		Ep. Equilíbrio	0,00		
kg2 (mm)	0,10	εf	0,0018				
FC	1,00	εc	0,00006				
ηf	0,95	εs-	0,00006				
ɣf	1,10	εs+	0,0017				
ffdd2 (MPa)	377,89						
εffd	0,0018						
εfd	0,0018						

- Anexo J do EC2

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Momento resistente		Verificação das hipóteses	
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	k2	0,337	εc	0,0003
bf (mm)	120	k1	0,124	σs+ (MPa)	182,49	**εc < εcu ?**	SIM
Ef (MPa)	210000	Ts (kN)	245,62	σs- (MPa)	37,74	**Incógnitas**	
ɣBA	1,5	Cs (kN)	21,512	εf	0,0009	**x (m)**	0,128
kb	1,353	C (kN)	422,18	**Mrd (kNm)**	237,50	**Af (cm2)**	9,95
β1	1	Tf (kN)	198,07	Ep. Equilíbrio	0,00		
fbfRd	198,97	Ep. Equilíbrio	0,00				
εfbd	0,0009						

Exemplo prático Técnica NSM

Laje

- Bulletin 90 da *fib*

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Momento resistente		Verificação das hipóteses	
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	k2	0,388	εc	0,0024
Ef (MPa)	168000	k1	0,719	σs+ (MPa)	204,00	**εc < εcu ?**	SIM
η	0,8	Ts (kN)	80,76	σs- (MPa)	98,01	**Incógnitas**	
γf	1,25	Cs (kN)	47,335	εf	0,0109	**x (m)**	0,027
ffk (Mpa)	2850,00	C (kN)	254,87	**Mrd (kNm)**	25,38	**Af (cm2)**	0,695
εfbd	0,01086	Tf (kN)	126,78	Ep. Equilíbrio	0,00		
		Ep. Equilíbrio	0,00				

- ACI-440.2R-17

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Momento resistente		Verificação das hipóteses		Verifica?
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	β1	0,85	**εs > εsym ?**	0,0105	SIM
Ef (MPa)	168000	Ts (KN)	80,76	ψf	0,85	**εc < εcu ?**	0,0030	NÃO
εfu	0,0170	C (KN)	299,87	**Mrd (kNm)**	25,38	**Incógnitas**		
εfe	0,01188	Cs (kN)	53,09	Ep. Equilíbrio	0,00	**x (m)**	0,03	
		Tf (KN)	166,03			**Af (cm2)**	0,832	
		Ep. Equilíbrio	0,00					

- Anexo J do EC2

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Verificação das hipóteses	
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	εc	0,0017
bf (mm)	20	k1	0,614	**εc < εcu ?**	SIM
Af (cm2)	0,280	Ts (kN)	80,76	**Incógnitas**	
Ef (MPa)	168000	Cs (kN)	22,580	**x (m)**	0,028
kb	1,39	C (kN)	226,03	**Af (cm2)**	1,148
lb (mm)	244,77	Tf (kN)	122,69		
τb1d (MPa)	14,77	Ep. Equilíbrio	0,00		
γBA	1	**Momento resistente**			
τbak (MPa)	30,50	k2	0,367		
fatk (MPa)	30	σs+ (MPa)	204,00		
fack (MPa)	90	σs- (MPa)	46,75		
aba	0,5	εf	0,0064		
τbck (MPa)	16,41	**Mrd (kNm)**	25,38		
abc	0,9	Ep. Equilíbrio	0,00		
ar	50				
ar (mm)	100,00				
Ffbd (N)	29923,28				
Ffbd (N/mm2)	1068,69				
εfbd	0,00636				

Viga

- Bulletin 90 da *fib*

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Momento resistente		Verificação das hipóteses	
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	k2	0,347	εc	0,0008
Ef (MPa)	168000	k1	0,363	σs+ (MPa)	204,00	**εc < εcu ?**	SIM
η	0,8	Ts (kN)	274,57	σs- (MPa)	16,15	**Incógnitas**	
ɣf	1,25	Cs (kN)	9,207	εf	0,0109	**x (m)**	0,043
ffk (Mpa)	2850,00	C (kN)	415,43	**Mrd (kNm)**	237,50	**Af (cm2)**	0,823
εfbd	0,01086	Tf (kN)	150,06	Ep. Equilíbrio	0,00		
		Ep. Equilíbrio	0,00				

- ACI-440.2R-17

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Momento resistente		Verificação das hipóteses		Verifica ?
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	β1	0,85	**εs > εsym ?**	0,0164	SIM
Ef (MPa)	168000	Ts (KN)	274,57	ψf	0,85	**εc < εcu ?**	0,0005	SIM
εfu	0,0170	C (KN)	494,19	**Mrd (kNm)**	237,50	**Incógnitas**		
εfe	0,01188	Cs (kN)	42,27	Ep. Equilíbrio	0,00	**x (m)**	0,02	
		Tf (KN)	177,34			**Af (cm2)**	0,889	
		Ep. Equilíbrio	0,00					

- Anexo J do EC2

Características do reforço (CFRP)		Linha neutra		Verificação das hipóteses	
tf (mm)	1,4	0.85fc ou 1.0fc?	1	εc	0,0006
bf (mm)	20	k1	0,287	**εc < εcu ?**	SIM
Af (cm2)	0,280	Ts (kN)	274,57	**Incógnitas**	
Ef (MPa)	168000	Cs (kN)	19,909	**x (m)**	0,053
kb	1,40	C (kN)	407,54	**Af (cm2)**	1,435
lb (mm)	242,96	Tf (kN)	152,88		
τb1d (MPa)	14,77	Ep. Equilíbrio	0,00		
ɣBA	1	**Momento resistente**			
τbak (MPa)	30,50	k2	0,343		
fatk (MPa)	30	σs+ (MPa)	204,00		
fack (MPa)	90	σs- (MPa)	34,92		
aba	0,5	εf	0,0063		
τbck (MPa)	16,41	**Mrd (kNm)**	237,50		
abc	0,9	Ep. Equilíbrio	0,00		
ar	50				
ar (mm)	100,00				
Ffbd (N)	29829,93				
Ffbd (N/mm2)	1065,35				
εfbd	0,00634				