

ANÁLISE DE MODELOS DE DIMENSIONAMENTO PARA O REFORÇO À FLEXÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM SISTEMAS DE CFRP

PEDRO FILIPE MONTEIRO DE ALMEIDA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Luís Filipe Pereira Juvandes

JUNHO 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901



m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A todos os que me querem bem

*Mostra-me um homem cem por cento satisfeito
e eu mostrar-te-ei um homem fracassado.*

Thomas Edison

AGRADECIMENTOS

A concretização desta dissertação representa o culminar de uma etapa particularmente importante do meu percurso académico e pessoal. Como tal, não poderia deixar de expressar o meu sincero agradecimento a todos aqueles que, de diferentes formas, contribuíram para a sua realização.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Luís Filipe Pereira Juvandes, pela disponibilidade demonstrada ao longo deste trabalho, pelas sugestões, pelo rigor científico e pelo acompanhamento prestado durante o desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus Pais, deixo um agradecimento especial. Pelo apoio incondicional, pelos valores transmitidos, pela confiança depositada em mim e por todos os sacrifícios realizados ao longo destes anos. Sem o vosso esforço, incentivo e presença constante, este percurso não teria sido possível. Ao meu Irmão e à Ana, pelo apoio, amizade e motivação ao longo desta etapa, bem como por todos os momentos de partilha que contribuíram para tornar este percurso mais leve e gratificante.

Aos meus amigos de sempre, que me acompanham desde antes da entrada na faculdade, agradeço a amizade, a lealdade e a presença constante ao longo dos anos. Um agradecimento especial aos amigos que a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto me proporcionou conhecer pelos momentos vividos, pelo apoio mútuo e pelas memórias construídas, levo convosco uma parte muito significativa desta caminhada.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, agradeço a oportunidade de crescimento académico e pessoal proporcionada ao longo destes anos. Estendo igualmente este agradecimento a todos os docentes e colaboradores que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação e para o percurso que agora se conclui.

Um agradecimento muito especial à IACES – LC Porto, associação da qual tive o privilégio de fazer parte ao longo de vários anos. A experiência vivida nesta associação teve um impacto profundo no meu percurso académico, pessoal e humano.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, fizeram parte desta etapa e contribuíram para que este objetivo fosse alcançado.

A todos, o meu mais sincero obrigado.

RESUMO

A crescente utilização de materiais compósitos reforçados com fibras de carbono (CFRP) no reforço e reabilitação de estruturas de betão armado tem motivado o desenvolvimento de diversas metodologias de dimensionamento destinadas a garantir níveis adequados de segurança e desempenho estrutural. Entre as técnicas de reforço mais utilizadas destacam-se a Externally Bonded Reinforcement (EBR) e Near Surface Mounted (NSM), cuja aplicação tem vindo a aumentar em intervenções de reforço à flexão.

Com o objetivo de analisar as diferentes abordagens regulamentares atualmente disponíveis para o dimensionamento de elementos de betão armado reforçados com FRP, foi realizado um estudo comparativo dos principais documentos normativos aplicáveis a este domínio. Para a técnica EBR foram considerados os documentos *Bulletin 14* e *Bulletin 90* da fib, *ACI 440.2R-17* e *CNR-DT 200 R1/2013*, enquanto para a técnica NSM foram analisadas as metodologias propostas pelo *Bulletin 90* e *ACI 440.2R-17*.

A partir da análise das diferentes recomendações de cálculo apresentadas por cada documento, foram desenvolvidas ferramentas de cálculo destinadas à aplicação sistemática das metodologias consideradas. A avaliação dos modelos foi efetuada através da sua aplicação a uma base de dados experimental constituída por vigas e lajes de betão armado reforçadas com CFRP, recorrendo à comparação entre os resultados teóricos e os valores observados experimentalmente.

A análise incidiu sobre a deformação mobilizada no CFRP, a capacidade resistente à flexão e os modos de rotura previstos pelos diferentes regulamentos. Com base nos resultados obtidos, procedeu-se à avaliação da consistência das metodologias analisadas e à identificação das principais diferenças entre as abordagens adotadas pelos diversos documentos normativos.

Por fim, foi efetuada uma apreciação global do desempenho dos modelos de dimensionamento considerados, discutindo-se as suas potencialidades, limitações e aplicabilidade no contexto do reforço estrutural de elementos de betão armado com sistemas CFRP.

PALAVRAS-CHAVE: CFRP, Betão armado, Reforço à flexão, EBR, NSM.

ABSTRACT

The increasing use of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) materials in the strengthening and rehabilitation of reinforced concrete structures has led to the development of several design methodologies aimed at ensuring adequate levels of structural safety and performance. Among the most widely adopted strengthening techniques are Externally Bonded Reinforcement (EBR) and Near Surface Mounted (NSM), whose application in flexural strengthening has grown significantly in recent years.

With the objective of analyzing the different regulatory approaches currently available for the flexural strengthening of reinforced concrete elements using CFRP, a comparative study was carried out on the main design guidelines applicable to this field. For the EBR technique, the documents fib *Bulletin 14*, fib *Bulletin 90*, ACI 440.2R-17 and CNR-DT 200 R1/2013 were considered, while for the NSM technique the methodologies proposed by fib *Bulletin 90* and ACI 440.2R-17 were analyzed.

Based on the analysis of the design recommendations presented in each document, calculation tools were developed to allow the systematic application of the selected methodologies. The assessment of the models was performed through their application to an experimental database consisting of reinforced concrete beams and slabs strengthened with CFRP, by comparing theoretical predictions with experimentally observed results.

The analysis focused on the CFRP strain, the flexural resistance and the failure modes predicted by the different design guidelines. Based on the results obtained, the consistency of the analyzed methodologies was assessed and the main differences between the approaches adopted by the various standards were identified.

Finally, a comprehensive evaluation was conducted of the performance of the design models considered, outlining their potential, limitations, and applicability to the structural strengthening of reinforced-concrete elements using CFRP systems.

KEYWORDS: CFRP, Reinforced Concrete, Flexural Strengthening, EBR, NSM.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	4
2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO E MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO À FLEXÃO COM FRP.....	7
2.1 INTRODUÇÃO	7
2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS FRP.....	8
2.3 TÉCNICAS DE REFORÇO: EBR E NSM.....	10
2.4 MODOS DE ROTURA EM ELEMENTOS REFORÇADOS COM FRP.....	12
2.5 MODELOS DE DIMENSIONAMENTO PARA REFORÇO À FLEXÃO DE SISTEMAS COM FRP	15
2.5.1 HIPÓTESES DE CÁLCULO	15
2.5.2 DOCUMENTO BULLETIN 14 DA FIB	17
2.5.3 DOCUMENTO BULLETIN 90 DA FIB	20
2.5.4 DOCUMENTO ACI-440.2R-17	24
2.5.5 DOCUMENTO CNR-DT 200 R1/2013.....	28
2.5.6 DOCUMENTO ANNEX J DO EC2 – PARTE 1	32

2.5.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES DOCUMENTOS DE DIMENSIONAMENTO	32
3 APLICAÇÃO DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO À TÉCNICA EBR.....	35
3.1 INTRODUÇÃO	35
3.2 BASE DE DADOS EXPERIMENTAL.....	36
3.2.1 VIGAS DE BETÃO ARMADO	37
3.2.2 LAJES DE BETÃO ARMADO	40
3.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS ÀS VIGAS.....	42
3.3.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS VIGAS	43
3.3.2 RESULTADOS OBTIDOS PELOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO	44
3.3.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS	45
3.3.3.1 <i>Extensão máxima do CFRP</i>	46
3.3.3.2 <i>Momento Resistente Máximo</i>	47
3.4 APLICAÇÃO DOS MODELOS ÀS LAJES	49
3.4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES	50
3.4.2 RESULTADOS OBTIDOS PELOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO	50
3.4.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS	53
3.4.3.1 <i>Extensão máxima do CFRP</i>	53
3.4.3.2 <i>Momento Resistente Máximo</i>	55
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS RELATIVAS À TÉCNICA EBR	57
4 APLICAÇÃO DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO À TÉCNICA NSM	61
4.1 INTRODUÇÃO	61
4.2 BASE DE DADOS EXPERIMENTAL.....	62

4.2.1 VIGAS DE BETÃO ARMADO.....	62
4.2.2 LAJES DE BETÃO ARMADO.....	65
4.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS ÀS VIGAS	66
4.3.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS VIGAS.....	67
4.3.2 RESULTADOS OBTIDOS PELOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO.....	68
4.3.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS	69
4.3.3.1 Extensão Máxima do CFRP.....	69
4.3.3.2 Momento Resistente Máximo	71
4.4 APLICAÇÃO DOS MODELOS ÀS LAJES.....	72
4.4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES.....	72
4.4.2 RESULTADOS OBTIDOS PELOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO.....	73
4.4.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS	74
4.4.3.1 Extensão Máxima do CFRP.....	74
4.4.3.2 Momento Resistente Máximo	76
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS RELATIVAS À TÉCNICA NSM	78
5 CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	81
5.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	81
5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	83
5.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
ANEXOS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Técnica EBR: reforço de lajes à flexão com sistemas unidireccionais, o Laminado e a Manta.	10
Fig. 2.2 - Técnica EBR: reforço de viga à flexão (Laminado) e ao corte (Manta).	11
Fig. 2.3 - Técnica NSM: Reforço de laje à flexão aplicando o Laminado.	11
Fig. 2.4 - Modos de destacamento do FRP em vigas de betão armado reforçadas através da técnica EBR (adaptado de [7]).	13
Fig. 2.5 - Modos de rotura na interface na técnica NSM (adaptado de [7]).	14
Fig. 2.6 - Secção para estado limite último de flexão: (a) geometria; (b) distribuição de extensões e (c) distribuição de tensões [2].	18
Fig. 2.7 - Secção para o estado limite último de flexão: (a) geometria; (b) distribuição de extensões e (c) distribuição de forças [3].	21
Fig. 2.8 - Representação esquemática da profundidade efetiva do sistema CFRP para a técnica NSM [7].	23
Fig. 2.9 - Secção em estado limite último de flexão: (a) geometria, (b) extensões e (c) tensões [4].	25
Fig. 2.10 - Procedimento de cálculo e verificação dos modos de rotura segundo o <i>ACI 440.2R-17</i> [7].	26
Fig. 2.11 - Modos de rotura de um elemento reforçado com sistema FRP (modo 1 e modo 2) [5].	30
Fig. 3.1 - Geometria da secção transversal e definição dos parâmetros geométricos, das armaduras longitudinais e do reforço CFRP adotados na caracterização das vigas reforçadas segundo a técnica EBR.	38
Fig. 3.2 - Geometria da secção transversal e definição dos parâmetros geométricos, das armaduras longitudinais e do reforço CFRP adotados na caracterização das lajes reforçadas segundo a técnica EBR.	40
Fig. 3.3 - Comparação entre as extensões máximas experimentais e teóricas para as vigas analisadas.	47
Fig. 3.4 - Comparação entre os momentos resistentes experimentais e os valores previstos pelos diferentes regulamentos para as vigas analisadas.	49
Fig. 3.5 - Comparação entre as extensões máximas experimentais e teóricas para as lajes analisadas.	54
Fig. 3.6 - Comparação entre os momentos resistentes experimentais e os valores previstos pelos diferentes regulamentos para as lajes analisadas.	56
Fig. 4.1 - Geometria da secção transversal e definição dos parâmetros geométricos, das armaduras longitudinais e do reforço CFRP adotados na caracterização das vigas reforçadas segundo a técnica NSM.	63
Fig. 4.2 - Geometria da secção transversal e definição dos parâmetros geométricos, das armaduras longitudinais e do reforço CFRP adotados na caracterização das lajes reforçadas segundo a técnica NSM.	65

Fig. 4.3 - Comparação entre as extensões máximas experimentais e teóricas para as vigas analisadas.	70
Fig. 4.4 - Comparação entre os momentos resistentes experimentais e os valores previstos pelos diferentes regulamentos para as vigas analisadas.	72
Fig. 4.5 - Comparação entre as extensões máximas experimentais e teóricas para as lajes analisadas.	76
Fig. 4.6 - Comparação entre os momentos resistentes experimentais e os valores previstos pelos diferentes regulamentos para as lajes analisadas.	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais características de resinas epóxicas (adaptado de [7]).	8
Tabela 2.2 - Deformações nos elementos para os dois modos de rotura (adaptado de [7]).	30
Tabela 2.3 - Diferentes valores limite da extensão do CFRP para a técnica EBR conforme os regulamentos (adaptado de [7]).	34
Tabela 2.4 - Diferentes valores limite da extensão do CFRP para a técnica NSM conforme os regulamentos (adaptado de [7]).	34
Tabela 3.1 - Valores recomendados para os coeficientes pelos regulamentos e valores adotados na presente análise para a técnica EBR.	36
Tabela 3.2 - Distribuição dos casos de estudo considerados na base de dados experimental da técnica EBR.	37
Tabela 3.3 - Identificação dos casos de estudo considerados na análise das vigas reforçadas segundo a técnica EBR.	38
Tabela 3.4 - Características geométricas e propriedades mecânicas do betão das vigas consideradas (adaptado de [9][10]).	39
Tabela 3.5 - Características mecânicas das armaduras longitudinais das vigas consideradas (adaptado de [9][10]).	39
Tabela 3.6 - Propriedades geométricas e mecânicas dos sistemas CFRP utilizados nas vigas consideradas (adaptado de [9][10]).	39
Tabela 3.7 - Identificação dos casos de estudo considerados na análise das lajes reforçadas segundo a técnica EBR.	41
Tabela 3.8 - Características geométricas e propriedades mecânicas do betão das lajes consideradas (adaptado de [9][10]).	41
Tabela 3.9 - Características mecânicas das armaduras longitudinais das lajes consideradas (adaptado de [9][10]).	42
Tabela 3.10 - Propriedades geométricas e mecânicas dos sistemas CFRP utilizados nas lajes consideradas (adaptado de [9][10]).	42
Tabela 3.11 - Resultados experimentais para os casos de Vigas (adaptado de [9][10]).	43
Tabela 3.12 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>Bulletin 14</i> .	44
Tabela 3.13 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>Bulletin 90</i> .	44
Tabela 3.14 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>ACI-440.2R-17</i> .	44
Tabela 3.15 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>CNR-DT 200 R1/2012</i> .	45
Tabela 3.16 - Resultados experimentais para os casos de Lajes (adaptado de [9][10]).	50

Tabela 3.17 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>Bulletin 14</i> .	51
Tabela 3.18 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>Bulletin 90</i> .	51
Tabela 3.19 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>ACI-440.2R-17</i> .	52
Tabela 3.20 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>CNR-DT 200 R1/2012</i> .	52
Tabela 4.1 - Valores recomendados para os coeficientes pelos regulamentos e valores adotados na presente análise para a técnica NSM.	62
Tabela 4.2 - Identificação dos casos de estudo considerados na análise das vigas reforçadas segundo a técnica NSM.	63
Tabela 4.3 - Características geométricas e propriedades mecânicas do betão das vigas consideradas (adaptado de [7][11][13]).	64
Tabela 4.4 - Características mecânicas das armaduras longitudinais das vigas consideradas (adaptado de [7][11][13]).	64
Tabela 4.5 - Propriedades geométricas e mecânicas dos sistemas CFRP utilizados nas vigas consideradas (adaptado de [7][11][13]).	64
Tabela 4.6 - Identificação dos casos de estudo considerados na análise das lajes reforçadas segundo a técnica NSM.	65
Tabela 4.7 - Características geométricas e propriedades mecânicas do betão das lajes consideradas (adaptado de [7][12]).	66
Tabela 4.8 - Características mecânicas das armaduras longitudinais das lajes consideradas (adaptado de [7][12]).	66
Tabela 4.9 - Propriedades geométricas e mecânicas dos sistemas CFRP utilizados nas lajes consideradas (adaptado de [7][12]).	66
Tabela 4.10 - Resultados experimentais para os casos de Vigas (adaptado de [7][11][13]).	67
Tabela 4.11 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>Bulletin 90</i> .	68
Tabela 4.12 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>ACI-440.2R-17</i> .	68
Tabela 4.13 - Resultados experimentais para os casos de Lajes (adaptado de [7][12]).	73
Tabela 4.14 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>Bulletin 90</i> .	73
Tabela 4.15 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento <i>ACI-440.2R-17</i> .	73

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A.1.1 – Folha de cálculo do documento <i>Bulletin 14</i> para a viga B03.	87
Anexo A.1.2 – Folha de cálculo do documento <i>Bulletin 90</i> para a viga B03.....	88
Anexo A.1.3 – Folha de cálculo do documento <i>ACI 440.2R-17</i> para a viga B03.	89
Anexo A.1.4 – Folha de cálculo do documento <i>CNR-DT 200R1/2013</i> para a viga B03.	90
Anexo A.1.5 – Tabela com resumo de resultados para as vigas analisadas.....	91
Anexo A.2.1 – Folha de cálculo do documento <i>Bulletin 14</i> para a laje LC3R.....	92
Anexo A.2.2 – Folha de cálculo do documento <i>Bulletin 90</i> para a laje LC3R.....	93
Anexo A.2.3 – Folha de cálculo do documento <i>ACI 440.2R-17</i> para a laje LC3R.	94
Anexo A.2.4 – Folha de cálculo do documento <i>CNR-DT 200R1/2013</i> para a laje LC3R.	95
Anexo A.2.5 – Tabela com resumo de resultados para as lajes analisadas.	96
Anexo B.1.1 – Folha de cálculo do documento <i>Bulletin 90</i> para a viga S1L.	97
Anexo B.1.2 – Folha de cálculo do documento <i>ACI 440.2R-17</i> para a viga S1L.	98
Anexo B.1.3 – Tabela com resumo de resultados para as vigas analisadas.....	99
Anexo B.2.1 – Folha de cálculo do documento <i>Bulletin 90</i> para a laje A-S0.	100
Anexo B.2.2 – Folha de cálculo do documento <i>ACI 440.2R-17</i> para a laje A-S0.	101
Anexo B.2.3 – Tabela com resumo de resultados para as lajes analisadas.	101

ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ACI - American Concrete Institute

AFRP - Aramid Fiber-Reinforced Polymer

CFRP - Carbon Fiber-Reinforced Polymer

CNR - Consiglio Nazionale delle Ricerche

DEC - Departamento de Engenharia Civil

E - Módulo de elasticidade [GPa]

EBR - Externally Bonded Reinforcement

EC2 - Eurocódigo 2

ELU - Estado Limite Último

fib - Fédération Internationale du Béton

FRP - Fiber Reinforced Polymer

GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymer

K - Coeficiente de Transmissão Térmica [W/m²K]

MPa – Megapascal

NSM - Near Surface Mounted

RC - Reinforced Concrete

Ref – Referência

SÍMBOLOS

A_f - Área do CFRP

A_{s1} - Área das armaduras tracionadas

A_{s2} - Área das armaduras comprimidas

b - Largura da secção de betão

b_f - Largura do laminado

c - Posição da linha neutra (Documento ACI)

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 reforço

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

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 (Documento ACI)

f_{cd} - Valor de cálculo da tensão máxima de compressão no betão

f_{cm} - Valor médio de resistência à compressão do betão

f_{ctm} - Valor médio da tensão de rotura à tração do betão

f_{ck} - Valor característico da resistência à compressão do betão

F_f - Força resultante da tensão de tração nos laminados

$f_{fbd, IC}$ - Média do valor da tensão resistente de aderência

$f_{fdd,2}$ - Tensão máxima do sistema CFRP

f_{fk} - Valor característico da resistência 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 do aço ~

h - Altura da secção de betão

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_g - Fator corretivo adicional

$k_{G,2}$ - Fator corretivo

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

M_n - Momento fletor resistente nominal

M_{rd} - Momento resistente do elemento de cálculo

M_{sd} - Momento atuante de cálculo

M_u - Momento fletor atuante de cálculo

t_f - Espessura do laminado

x - Posição da linha neutra

w_{DL} - Valor da carga permanente

w_{LL} - Valor de carga variável

w_u - Valor da carga de dimensionamento

β_1 - Parâmetro que tem em conta o valor característico de resistência do betão

β_l - Fator que depende do comprimento de aderência

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 δG - 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 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

λ - Parâmetro que tem em conta o valor característico de resistência do betão

σ_f - Tensão de tração para a combinação de cargas quase permanentes para evitar rotura do sistema CFRP

σ_{s1} - Tensão das armaduras tracionadas

σ_{s2} - Tensão das armaduras comprimidas

ψ - Fator de redução da área de secção de betão comprimido

ψ_f - Fator de redução da capacidade mecânica do CFRP

δ_G - Fator de redução da distância ao centro de aplicação de esforços de compressão

$\emptyset$ - Fator de redução da resistência

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL

Nas últimas décadas, o setor da construção tem vindo a enfrentar desafios crescentes relacionados com a durabilidade das estruturas, a necessidade de reabilitação do edificado existente e a otimização do desempenho estrutural face a ações cada vez mais exigentes, como cargas sísmicas e ambientais. Neste contexto, os materiais compósitos reforçados com fibras, designados por Fiber Reinforced Polymers (FRP), têm emergido como uma solução inovadora e eficaz no domínio da engenharia civil.

Os sistemas FRP destacam-se pelas suas propriedades mecânicas superiores, nomeadamente elevada resistência à tração, baixo peso próprio e elevada resistência à corrosão, o que os torna particularmente adequados para aplicações de reforço estrutural. Entre as várias técnicas de aplicação, assumem especial relevância o reforço colado externamente (Externally Bonded Reinforcement – EBR) e o reforço por inserção em ranhuras (Near Surface Mounted – NSM), amplamente utilizados em elementos de betão armado para melhoria da capacidade resistente à flexão e ao esforço transversal [1].

A técnica EBR consiste na aplicação de sistemas pré-fabricados (laminados) ou sistemas curados “*in situ*” (mantas ou tecidos) de FRP na superfície externa dos elementos estruturais, sendo a transferência de esforços assegurada por aderência entre o compósito e o substrato de betão. Por sua vez, a técnica NSM baseia-se na inserção de varões ou laminados de FRP em ranhuras previamente executadas no betão de recobrimento, sendo posteriormente fixados com resinas adesivas. Esta última técnica apresenta, em geral, vantagens ao nível da proteção do material, da eficiência da ancoragem e da mobilização da capacidade resistente do FRP [1].

Apesar do crescente uso destas soluções, o dimensionamento de sistemas de reforço com FRP permanece um tema complexo, fortemente dependente do comportamento de aderência e dos mecanismos de rotura, frequentemente governados por fenómenos frágeis como o destacamento do compósito (debonding). Neste contexto, têm sido desenvolvidos diversos modelos de cálculo e recomendações normativas, com abordagens distintas na previsão da capacidade resistente e na consideração dos modos de rotura [1].

Atualmente, o enquadramento regulamentar para o dimensionamento de reforços com FRP não se encontra totalmente harmonizado, sendo comum o recurso a documentos técnicos internacionais, como o *Bulletin 90* [3] da fib (Fédération Internationale du Béton), o *ACI-440.2R-17* do American Concrete Institute [4] ou o *CNR-DT 200 R1/2013* [5], entre outros. Estes documentos apresentam metodologias diferenciadas no tratamento de aspetos fundamentais, como a definição da deformação eficaz do FRP, os critérios de verificação da aderência e os coeficientes de segurança adotados, o que pode conduzir a variações significativas nos resultados de dimensionamento.

Neste sentido, torna-se relevante proceder a uma análise crítica dos diferentes modelos de cálculo disponíveis, avaliando as suas bases teóricas, pressupostos e carácter conservador. A comparação entre abordagens regulamentares permite identificar convergências e divergências, contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento estrutural destes sistemas e para uma aplicação mais fundamentada em contexto de projeto.

Assim, a presente dissertação tem como principal objetivo analisar e comparar diferentes modelos de dimensionamento aplicáveis às técnicas EBR e NSM com FRP, incidindo sobre reforço à flexão, de forma a avaliar a sua consistência, fiabilidade e aplicabilidade prática no âmbito da engenharia estrutural.

1.2 OBJETIVOS

A utilização de sistemas de reforço com materiais compósitos do tipo FRP, aplicados segundo as técnicas EBR e NSM, tem originado o desenvolvimento de diferentes metodologias de dimensionamento, propostas por diversos documentos normativos internacionais. No entanto, estas metodologias apresentam diferenças relevantes, nomeadamente na definição da deformação de cálculo do FRP e na consideração dos mecanismos de destacamento, conduzindo a variações na capacidade resistente estimada e no modo de rotura previsto.

Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo principal analisar e comparar os modelos de dimensionamento à flexão em estado limite último (ELU) propostos pelos seguintes documentos:

- *Bulletin 14* da fib (2001) [2];
- *Bulletin 90* da fib (2019) [3];
- *ACI 440.2R-17*, American Concrete Institute (2017) [4];
- *CNR-DT 200R1/2013*, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures (2014) [5].

A análise incide sobre secções críticas de elementos de betão armado reforçados com FRP, correspondentes às zonas de momento fletor máximo, considerando técnicas EBR e NSM. De forma a atingir este objetivo, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar os modelos de dimensionamento à flexão em ELU de cada regulamento, com enfoque na definição da deformação eficaz do FRP e nos critérios de limitação associados ao destacamento (zona de flexão);
- b) Aplicar as diferentes metodologias de cálculo a secções de betão armado reforçadas com FRP, avaliando o comportamento na secção de momento máximo;
- c) Determinar, para cada regulamento, a capacidade resistente à flexão e a deformação mobilizada no FRP;
- d) Identificar o modo de rotura previsto, distinguindo entre destacamento do FRP ou esmagamento do betão na zona comprimida;
- e) Comparar diretamente os resultados obtidos, analisando diferenças na capacidade resistente, variação da deformação limite do FRP e influência dos critérios de destacamento;

- f) Avaliar o grau de conservadorismo dos modelos, com base na comparação com resultados experimentais de referência.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, organizados de forma a permitir uma abordagem progressiva ao estudo dos modelos de dimensionamento de sistemas de reforço com materiais compósitos do tipo FRP.

No Capítulo 1 é apresentado o enquadramento geral do tema, bem como os objetivos da dissertação e a respetiva organização.

O Capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica e ao enquadramento teórico do problema. Neste capítulo abordam-se os principais conceitos associados aos materiais FRP, às técnicas de reforço EBR e NSM, bem como os mecanismos de comportamento e modos de rotura relevantes no reforço de elementos de betão armado. Apresentam-se ainda os modelos de dimensionamento propostos pelos diferentes documentos regulamentares considerados no estudo, nomeadamente o *Bulletin 14* e o *Bulletin 90* da fib, *ACI 440.2R-17*, *CNR-DT 200R1/2013* e o *Annex J* do Eurocódigo 2.

O Capítulo 3 apresenta a aplicação dos modelos de dimensionamento à técnica EBR, através da análise de casos de estudo representativos de elementos de betão armado (vigas e lajes) reforçados à flexão selecionados a partir de trabalhos experimentais publicados. A avaliação incide sobre as secções críticas correspondentes às zonas de momento fletor máximo, sendo determinados os valores da capacidade resistente, as deformações mobilizadas no FRP e os modos de rotura previstos para cada regulamento. No final do capítulo é realizada uma análise comparativa dos resultados previstos com os obtidos experimentalmente, permitindo retirar conclusões específicas para a técnica EBR.

No Capítulo 4 apresenta a aplicação dos modelos de dimensionamento à técnica NSM, seguindo uma abordagem análoga à do capítulo anterior. São analisados casos de estudo representativos a partir de programas experimentais, sendo avaliadas a capacidade resistente, as deformações no FRP e os modos de rotura previstos para cada regulamento. Tal como no capítulo anterior, é incluída uma análise comparativa dos resultados previstos com os experimentais, da qual resultam conclusões específicas para a técnica NSM.

Por fim, o Capítulo 5 reúne a discussão dos resultados e as conclusões da dissertação. São analisadas as diferenças observadas entre os modelos regulamentares estudados, com particular destaque na previsão da deformação do CFRP, da capacidade resistente à flexão e dos modos de rotura. Avalia-se ainda a adequação de cada metodologia face aos resultados experimentais considerados. O capítulo termina com as principais conclusões do estudo e com recomendações para futuros trabalhos de investigação no domínio do reforço de estruturas de betão armado com sistemas FRP.

2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO E MODELOS DE DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO À FLEXÃO COM FRP

2.1 INTRODUÇÃO

Na sequência do enquadramento apresentado no capítulo anterior, torna-se necessário aprofundar os aspetos teóricos associados ao reforço de elementos de betão armado com sistemas FRP, com particular enfoque na sua aplicação à flexão.

O comportamento destes sistemas é fortemente condicionado pela interação entre o betão, o aço e o material compósito, sendo determinante a forma como são modelados os mecanismos de transferência de esforços e os modos de rotura associados, nomeadamente o destacamento do FRP e o esmagamento do betão na zona comprimida.

Neste contexto, têm sido desenvolvidos diferentes modelos de dimensionamento, propostos por diversos documentos regulamentares internacionais, que apresentam abordagens distintas na quantificação da contribuição do FRP e na limitação da sua deformação eficaz.

Assim, o presente capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos necessários à compreensão do comportamento de elementos reforçados à flexão com FRP, bem como descrever os principais modelos de dimensionamento adotados pelos regulamentos considerados neste estudo.

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS FRP

Os materiais compósitos do tipo FRP são constituídos por fibras de elevada resistência mecânica incorporadas numa matriz polimérica, formando um material com comportamento anisotrópico. As fibras são responsáveis pela resistência e rigidez do compósito, enquanto a matriz assegura a transferência de tensões entre fibras e a proteção contra agentes ambientais ([2], [9]).

As fibras mais utilizadas em aplicações de engenharia civil incluem fibras de carbono (CFRP), vidro (GFRP) e aramida (AFRP), sendo o CFRP o material mais frequentemente utilizado no reforço estrutural devido à sua elevada resistência à tração, elevado módulo de elasticidade e boa durabilidade ([4], [9]). O GFRP apresenta um custo inferior, mas menor rigidez e maior sensibilidade a fenómenos ambientais, enquanto o AFRP, apesar da elevada resistência ao impacto, tem aplicação mais limitada [5].

A matriz polimérica é geralmente constituída por resinas termoplásticas ou termoendurecíveis, como as resinas epoxídicas, que desempenham um papel fundamental na transferência de esforços entre o FRP e o substrato de betão ([2], [9]). A Tabela 2.1 apresenta intervalos típicos de valores para algumas das propriedades mais relevantes das resinas epoxídicas utilizadas nestes sistemas. O comportamento global do compósito depende das propriedades dos seus constituintes e da orientação das fibras, sendo esta última determinante em aplicações estruturais, nas quais as fibras são orientadas na direção principal dos esforços.

Tabela 2.1 - Principais características de resinas epóxicas (adaptado de [7]).

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

Do ponto de vista mecânico, os FRP apresentam comportamento linear elástico até à rotura, sem fase de plastificação, o que lhes confere uma natureza frágil. Esta característica implica que a rotura ocorre de forma súbita, sendo necessário garantir, no dimensionamento, mecanismos de rotura controlados no sistema estrutural reforçado ([4], [9]).

Os materiais FRP apresentam ainda elevada resistência à corrosão e boa durabilidade, tornando-os particularmente adequados para aplicações de reabilitação estrutural. No entanto, o seu desempenho depende de fatores como a temperatura, a humidade e, sobretudo, da qualidade da ligação ao substrato de betão, sendo este um dos aspetos mais relevantes na resposta global do sistema [5].

Adicionalmente, os materiais FRP utilizados em reforço estrutural são disponibilizados sob diferentes formas, sendo as mais comuns os laminados (sistemas pré-fabricados) e os sistemas de fibras sob a forma de mantas ou tecidos (sistemas curados “*in situ*”). Os laminados são elementos pultrudidos, com propriedades mecânicas bem definidas e controlo de qualidade industrial, sendo geralmente utilizados em aplicações onde se pretende elevada rigidez e capacidade resistente. Por sua vez, as mantas (fibras unidirecionais) ou tecidos (fibras multidirecionais) são constituídos por fibras secas impregnadas com resina no momento da aplicação (“*in situ*”), permitindo maior adaptabilidade a geometrias complexas e superfícies irregulares. A escolha entre estas soluções influencia não só o processo construtivo, mas também o comportamento estrutural do sistema reforçado, nomeadamente ao nível da aderência e da distribuição de tensões na interface FRP-betão [9].

No reforço à flexão de elementos de betão armado, os sistemas FRP são tipicamente aplicados sob a forma de laminados ou mantas pela técnica EBR [10] ou NSM [11]. Em ambos os casos, a eficácia do reforço depende não só das propriedades do compósito, mas também da capacidade de transferência de esforços na interface FRP-betão, a qual condiciona fortemente os modos de rotura e a capacidade resistente do elemento.

2.3 TÉCNICAS DE REFORÇO: EBR E NSM

Os sistemas de reforço com materiais FRP podem ser aplicados em elementos de betão armado através de diferentes técnicas, sendo as mais utilizadas no reforço à flexão as soluções de EBR e NSM. Estas técnicas distinguem-se essencialmente pelo modo de aplicação do material compósito e pelo mecanismo de transferência de esforços entre o FRP e o elemento estrutural.

A técnica EBR consiste na aplicação de laminados ou mantas de FRP na superfície externa do elemento estrutural, geralmente na zona tracionada, recorrendo a resinas epoxídicas como meio de ligação. Esta solução apresenta como principais vantagens a simplicidade de execução, reduzida interferência com a geometria original da estrutura e elevada eficiência no aumento da capacidade resistente à flexão ([2], [4]). No entanto, o seu desempenho é fortemente condicionado pela qualidade da aderência entre o FRP e o betão, sendo frequente a ocorrência de modos de rotura associados ao destacamento prematuro do reforço (debonding). Exemplos da aplicação desta técnica em vigas e lajes reforçadas à flexão são apresentados nas Fig. 2.1 e Fig. 2.2.



Laminados



Mantas

Fig. 2.1 - Técnica EBR: reforço de lajes à flexão com sistemas unidireccionais, o Laminado e a Manta (adaptado de [15]).



Fig. 2.2 - Técnica EBR: reforço de viga à flexão (Laminado) e ao corte (Manta) (adaptado de [15]).

Por outro lado, a técnica NSM baseia-se na inserção de laminados ou varões de FRP em ranhuras previamente abertas no recobrimento de betão, sendo posteriormente preenchidas com resina adesiva. Esta solução permite uma melhor proteção do reforço e uma maior eficiência na transferência de esforços, conduzindo, em muitos casos, a uma mobilização mais elevada da capacidade do FRP. Adicionalmente, a técnica NSM apresenta menor suscetibilidade a fenómenos de destacamento precoce, devido ao confinamento proporcionado pelo betão envolvente [11]. A Fig. 2.3 apresenta um exemplo da aplicação desta técnica em elementos reforçados à flexão.



Fig. 2.3 - Técnica NSM: Reforço de laje à flexão aplicando o Laminado (adaptado de [15]).

Do ponto de vista do comportamento estrutural, ambas as técnicas contribuem para o aumento da capacidade resistente à flexão, atuando através da introdução de uma armadura adicional na zona tracionada. No entanto, as diferenças no mecanismo de aderência e na distribuição de tensões ao longo da interface FRP-betão conduzem a comportamentos distintos, nomeadamente ao nível da deformação eficaz mobilizada no compósito e dos modos de rotura associados [3].

A escolha entre as técnicas EBR e NSM depende de diversos fatores, incluindo as condições de execução, a geometria do elemento estrutural e os requisitos de desempenho. No entanto, do ponto de vista do dimensionamento, a principal diferença reside na forma como cada técnica é modelada nos diferentes regulamentos, em particular no que se refere à limitação da deformação do FRP e à consideração dos mecanismos de destacamento.

No reforço à flexão de elementos de betão armado, os sistemas FRP são tipicamente aplicados sob a forma de laminados ou mantas, via técnica EBR ou NSM. Em ambos os casos, a eficácia do reforço depende não só das propriedades do compósito, mas também da capacidade de transferência de esforços na interface FRP-betão, a qual condiciona fortemente os modos de rotura e a capacidade resistente do elemento [3].

2.4 MODOS DE ROTURA EM ELEMENTOS REFORÇADOS COM FRP

O comportamento de elementos de betão armado reforçados à flexão com sistemas FRP é condicionado por diferentes modos de rotura, que resultam da interação entre o betão, o aço e o material compósito. A identificação do mecanismo de rotura dominante assume particular importância no dimensionamento, uma vez que influencia diretamente a capacidade resistente e a deformação mobilizada no reforço.

De forma geral, os modos de rotura podem ser agrupados em duas categorias principais: roturas controladas pela capacidade da secção (admitindo a perfeita aderência entre os materiais da secção) e roturas associadas à perda de aderência entre o FRP e o betão. Esta distinção é particularmente relevante no contexto dos modelos de dimensionamento, uma vez que os diferentes regulamentos limitam a deformação do FRP em função do modo de rotura esperado.

A rotura por esmagamento do betão na zona comprimida corresponde, em muitos casos, ao mecanismo de rotura desejável, ocorrendo após a plastificação das armaduras de aço e a mobilização significativa da capacidade resistente do FRP. Este tipo de comportamento permite um melhor aproveitamento dos materiais e está associado a uma resposta estrutural mais previsível [4].

Por outro lado, os modos de rotura associados à perda de aderência com destacamento do FRP, designados por *debonding*, constituem um dos aspetos mais críticos no reforço com FRP. Estes mecanismos podem ocorrer de forma prematura, limitando a deformação mobilizada no compósito e, consequentemente, a contribuição efetiva do reforço para a capacidade resistente do elemento.

Os principais modos de destacamento incluem o destacamento na zona de ancoragem, o destacamento induzido por fissuração intermédia e o destacamento do recobrimento de betão. Estes mecanismos estão fortemente associados à distribuição de fissuras ao longo do elemento e à capacidade de transferência de tensões na interface FRP-betão, conforme ilustrado na Fig. 2.4.

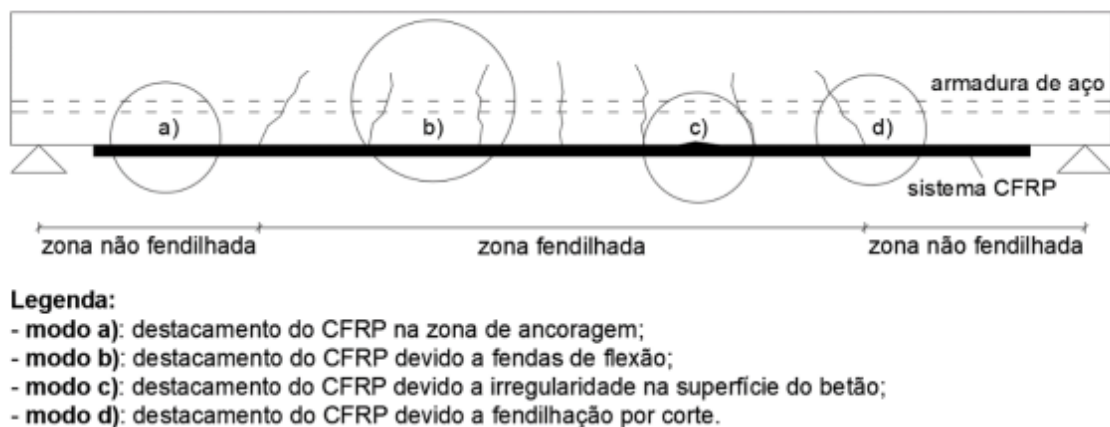
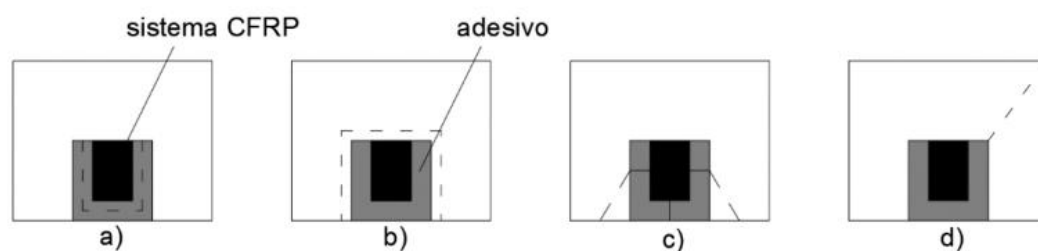


Fig. 2.4 - Modos de destacamento do FRP em vigas de betão armado reforçadas através da técnica EBR (adaptado de [7]).

No caso da técnica EBR, devido à natureza superficial da ligação, os mecanismos de destacamento assumem particular relevância, sendo frequentemente responsáveis pela limitação da deformação mobilizada no FRP. Por este motivo, a maioria dos modelos de dimensionamento introduz limitações à deformação de cálculo do compósito com base em critérios de aderência.

Por outro lado, na técnica NSM, a inserção do reforço em ranhuras no betão permite melhorar a transferência de esforços e reduzir a probabilidade de destacamento prematuro. Como consequência, é possível mobilizar níveis de deformação mais elevados no FRP, conduzindo, em muitos casos, a uma utilização mais eficiente do material.

Na técnica NSM, os mecanismos de rotura podem também ocorrer ao nível da interface entre o compósito, o adesivo e o betão envolvente, podendo verificar-se destacamento na interface FRP-adesivo, destacamento entre o adesivo e o betão, rotura do adesivo ou destacamento do betão de recobrimento, conforme ilustrado na Fig. 2.5.



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.

Fig. 2.5 - Modos de rotura na interface na técnica NSM (adaptado de [7]).

A consideração destes modos de rotura é fundamental na análise comparativa dos diferentes regulamentos, uma vez que as diferenças entre os modelos adotados resultam, em grande parte, das distintas abordagens na modelação dos fenómenos de aderência e na limitação da deformação eficaz do FRP.

2.5 MODELOS DE DIMENSIONAMENTO PARA REFORÇO À FLEXÃO DE SISTEMAS COM FRP

No âmbito do reforço à flexão de elementos de betão armado com sistemas FRP, têm sido desenvolvidos diversos modelos de dimensionamento, propostos por diferentes entidades regulamentares e científicas. Apesar das diferenças entre estas metodologias, a maioria baseia-se em princípios comuns de análise de secções, sendo as principais divergências observadas na forma como é considerada a contribuição do FRP, em particular no que se refere à definição do valor de cálculo da máxima deformação do compósito compatível no reforço.

Neste contexto, o presente capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os modelos de dimensionamento propostos pelos documentos considerados neste estudo, com foco na avaliação da capacidade resistente à flexão em estado limite último (ELU), na secção correspondente ao momento fletor máximo.

A análise incide, em particular, sobre os seguintes aspetos:

- definição da deformação limite ou de cálculo do FRP;
- determinação da posição da linha neutra;
- avaliação do momento resistente da secção;
- identificação do modo de rotura previsto.

A comparação entre os diferentes regulamentos permitirá evidenciar as principais diferenças metodológicas, bem como o seu impacto nos resultados de dimensionamento.

2.5.1 HIPÓTESES DE CÁLCULO

Os modelos de dimensionamento para reforço à flexão com FRP baseiam-se, de forma geral, em hipóteses simplificadas associadas à análise de secções de betão armado em estado limite último. Estas hipóteses, comuns à maioria dos regulamentos analisados, permitem estabelecer o equilíbrio interno de forças e momentos na secção, constituindo a base para a determinação da capacidade resistente.

De entre as hipóteses adotadas, destacam-se as seguintes:

- Assume-se que as secções planas permanecem planas após deformação, o que implica uma distribuição linear das deformações ao longo da altura da secção. Esta hipótese permite estabelecer relações diretas entre as deformações no betão, no aço e no FRP, sendo fundamental para a determinação da posição da linha neutra e do estado de deformação da secção;
- Considera-se que existe aderência perfeita entre o betão, o aço e o FRP, não ocorrendo escorregamento relativo entre os materiais. Desta forma, é garantida a compatibilidade de deformações, permitindo assumir que o FRP apresenta a mesma deformação que o betão na sua posição;
- Após a fissuração, o betão não contribui para a resistência à tração da secção, sendo esta assegurada exclusivamente pelas armaduras de aço e pelo reforço em FRP. Esta simplificação é consistente com a análise clássica de secções em betão armado;
- O aço de armadura é geralmente modelado com um comportamento elasto-plástico, admitindo-se que atinge o escoamento a partir de uma determinada deformação limite. Após o escoamento, a tensão mantém-se aproximadamente constante, permitindo uma redistribuição de esforços na secção;
- O material compósito apresenta comportamento linear elástico até à rotura, não existindo fase de plastificação. Assim, a tensão no FRP é diretamente proporcional à deformação, sendo a sua contribuição limitada pela deformação de cálculo definida em cada regulamento, frequentemente condicionada por fenómenos de destacamento;
- A rotura da secção é considerada quando se atinge a deformação limite do betão na zona comprimida ou a deformação de cálculo do FRP. O modo de rotura dominante depende da relação entre estas duas condições, sendo determinante para a avaliação da capacidade resistente.

Estas hipóteses são amplamente utilizadas nos modelos de dimensionamento propostos pelo *Bulletin 14* [2], *Bulletin 90* [3], *ACI 440.2R-17* [4] e *CNR-DT 200 R1/2013* [5], constituindo a base comum para a análise comparativa desenvolvida no presente trabalho.

2.5.2 DOCUMENTO BULLETIN 14 DA FIB

O *Bulletin 14* da fib (2001) apresenta recomendações de dimensionamento exclusivamente aplicáveis a sistemas de reforço com CFRP através da técnica EBR, não contemplando qualquer abordagem à técnica NSM [2]. Apesar desta limitação, constitui um dos primeiros documentos de referência nesta área, tendo servido de base ao desenvolvimento de metodologias posteriores.

A abordagem proposta baseia-se na análise da secção em estado limite último, recorrendo ao equilíbrio de forças internas e à compatibilidade de deformações. Tal como na análise clássica de elementos de betão armado, admite-se uma distribuição linear de deformações ao longo da altura da secção, permitindo relacionar diretamente o estado de deformação no betão, no aço e no CFRP.

Neste contexto, a deformação mobilizada no CFRP depende da posição da linha neutra e da geometria da secção, sendo obtida a partir da compatibilidade de deformações. A tensão no compósito é, por sua vez, determinada assumindo comportamento linear elástico até à rotura, sendo diretamente proporcional à deformação.

No entanto, o modelo introduz uma limitação à deformação de cálculo do CFRP, com o objetivo de evitar a ocorrência de roturas prematuras associadas a fenómenos de destacamento. Esta limitação constitui um dos aspetos centrais da metodologia, condicionando diretamente a contribuição do reforço para a capacidade resistente da secção.

A avaliação da capacidade resistente à flexão é efetuada com base no equilíbrio entre as forças internas, nomeadamente a força de compressão no betão e as forças de tração no aço e no CFRP. A determinação destas forças depende do estado de deformação da secção, sendo, por isso, necessário proceder à determinação da posição da linha neutra através da seguinte equação,

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

onde $\psi = 0,8$, 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 no 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 Fig. 2.6.

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x - d_2}{x} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \quad (2.3)$$

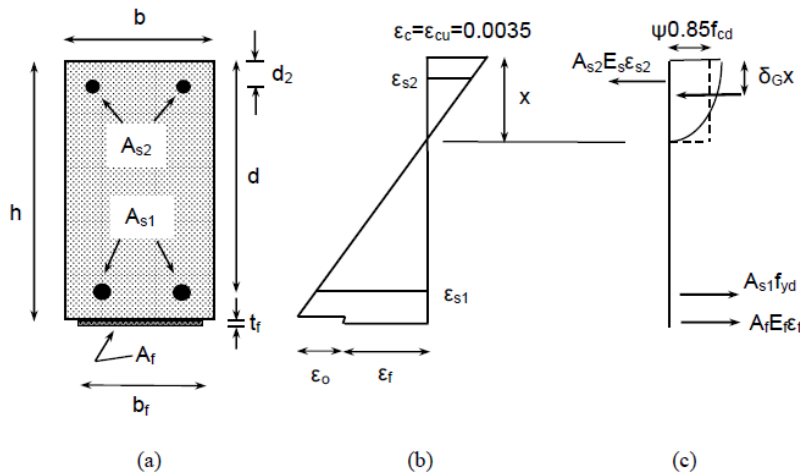


Fig. 2.6 - Secção para estado limite último de flexão: (a) geometria; (b) distribuição de extensões e (c) distribuição de tensões [2].

Na figura anterior é necessário definir o conjunto de parâmetros que caracterizam o estado de deformação e a geometria da secção. Estes parâmetros são utilizados ao longo do presente capítulo nos diferentes modelos de dimensionamento.

- ε_c – Deformação de compressão do betão, que deverá no máximo ser 3,5‰;
- ε_{s2} – Deformação das armaduras comprimidas;
- ε_{s1} – Deformação das armaduras tracionadas;
- ε_0 – Deformação na fibra inferior no momento de aplicação do reforço;
- ε_f – Deformação do compósito de CFRP;
- A_f – Área de secção do compósito de CFRP;
- b_f – Largura do compósito de CFRP;
- t_f – Espessura do compósito de CFRP;
- b – Largura da secção de betão;
- h – Altura da secção de betão;
- d – Distância entre a fibra superior da secção e o centro de massa das armaduras tracionadas;

- d_2 – Distância entre a fibra superior da secção e o centro de massa das armaduras comprimidas;
- A_{s1} – Área das armaduras tracionadas;
- A_{s2} – Área das armaduras comprimidas.

O momento fletor resistente da secção reforçada é dado pela seguinte expressão:

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

em que $\delta_G = 0,4$. Para que se verifique o modo de rotura por esmagamento do betão após cedência das armaduras, devem ser verificadas as seguintes condições:

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

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud} \quad (2.6)$$

Para a condição (2.6) importa referir que ε_{fud} corresponde à deformação limite antes que ocorra rotura por destacamento do CFRP. O *Bulletin 14* recomenda que este valor se situe no intervalo compreendido entre 0,0065 e 0,0085, não sendo, no entanto, explicitado se estes limites já incorporam coeficientes de segurança.

$$\varepsilon_{f,lim} \leq 6,5\text{‰} \text{ a } 8,5\text{‰} \quad (2.7)$$

A ocorrência de rotura por destacamento do CFRP verifica-se quando a condição (2.6) deixa de ser satisfeita. Nessa situação, o procedimento de cálculo do momento resistente mantém-se semelhante ao anteriormente descrito, sendo, contudo, necessário ajustar os parâmetros considerados. Em particular, a deformação limite do betão ε_{cu} é substituída por ε_c , enquanto a deformação do CFRP passa a ser limitada por ε_{fud} . Adicionalmente, os coeficientes δ_G e ψ são determinados com base nas seguintes expressões:

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

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

Para as expressões anteriores, ε_c determina-se da seguinte forma:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{fud} \frac{x}{h - x} \quad (2.10)$$

2.5.3 DOCUMENTO BULLETIN 90 DA FIB

O *Bulletin 90* da fib, publicado em 2019, surge como uma evolução significativa relativamente ao *Bulletin 14*, incorporando o desenvolvimento científico e experimental ocorrido nas últimas décadas no domínio do reforço de estruturas de betão com sistemas FRP. Ao contrário do documento anterior, que se centrava essencialmente em sistemas FRP aplicados pela técnica EBR, o *Bulletin 90* apresenta recomendações mais abrangentes, incluindo também a técnica NSM.

Para além disso, introduz formulações mais detalhadas para a avaliação dos mecanismos de aderência e destacamento, permitindo uma definição mais fundamentada da deformação mobilizável no FRP. Neste contexto, a deformação limite do compósito deixa de ser definida apenas através de um intervalo de valores fixo, passando a ser obtida a partir de relações associadas ao comportamento de aderência entre o FRP e o betão. Desta forma, o documento procura representar de forma mais realista o comportamento dos elementos reforçados, mantendo, contudo, a mesma base geral de análise da secção em estado limite último, assente na compatibilidade de deformações e no equilíbrio de forças internas.

Nesta análise serão apenas abordadas as alterações mais relevantes introduzidas pelo *Bulletin 90* relativamente ao *Bulletin 14*.

A avaliação do momento resistente da secção reforçada mantém uma formulação global semelhante à anteriormente apresentada, embora com algumas modificações ao nível da definição dos parâmetros do bloco comprimido de betão. Os coeficientes δ_G e ψ , anteriormente adotados no *Bulletin 14*, passam a ser representados pelos coeficientes k_1 e k_2 , respetivamente, deixando de assumir valores fixos para determinados modos de rotura e passando a ser obtidos através das expressões (2.8) e (2.9), aplicáveis a todos os mecanismos de rotura considerados [3].

Adicionalmente, a posição da linha neutra continua a ser determinada a partir da equação (2.1). No entanto, ao contrário da abordagem adotada no *Bulletin 14*, o cálculo passa a considerar diretamente as tensões desenvolvidas nas armaduras longitudinais, em substituição da formulação baseada nas deformações multiplicadas pelos respetivos módulos de elasticidade. O mesmo acontece com o cálculo do momento fletor resistente através da expressão (2.4) mas em função das tensões cujas expressões se apresentam em seguida. A Fig. 2.7 apresenta o modelo de cálculo adotado pelo *Bulletin 90*, incluindo a geometria da secção, a distribuição de deformações e o diagrama de tensões utilizado na determinação da capacidade resistente.

$$\sigma_{s1} = \min \left(\varepsilon_c \frac{d_{s1} - x}{x}, \frac{f_{yd}}{E_s} \right) E_s \quad (2.11)$$

$$\sigma_{s2} = \min \left(\varepsilon_c \frac{x - d_{s2}}{x}, \frac{f_{yd}}{E_s} \right) E_s \quad (2.12)$$

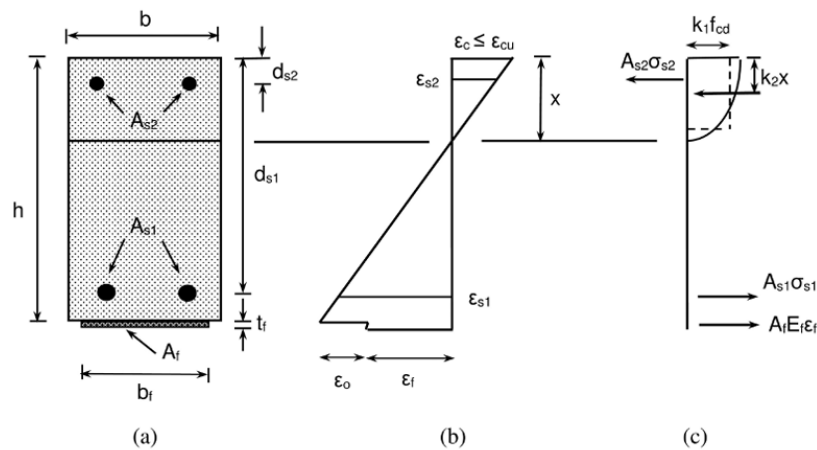


Fig. 2.7 - Secção para o estado limite último de flexão: (a) geometria; (b) distribuição de extensões e (c) distribuição de forças [3].

A extensão no CFRP pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \quad (2.13)$$

O *Bulletin 90* apresenta duas abordagens distintas para a determinação da deformação limite do CFRP associada à rotura por destacamento. A primeira baseia-se em formulações empíricas calibradas a partir de resultados experimentais, enquanto a segunda recorre a modelos analíticos de aderência, considerando explicitamente os mecanismos de transferência de tensões na interface CFRP-betão [3].

No âmbito do presente trabalho será adotada a primeira abordagem, mais simplificada, por apresentar uma formulação mais direta e uma aplicação mais compatível com os objetivos da análise comparativa entre modelos de dimensionamento. Nesta abordagem, em estado limite último, considera-se que o momento máximo fletor num elemento reforçado à flexão pode ser calculado assumindo que a tensão no CFRP não excede o valor da tensão resistente de aderência ($f_{fbd,IC}$), que é obtido através da seguinte expressão,

$$f_{fbd,IC} = \beta_l \frac{k_{cr} k k_b \sqrt{\frac{2 E_f}{t_f} f_{cm}^{2/3}}}{\gamma_{fb}} \quad (2.14)$$

onde β_l representa o fator que depende do comprimento de aderência definido em seguida na expressão (2.15), k_{cr} assume valores de 1,8 e 2,1 para os valores caraterístico e médio, respetivamente, enquanto o coeficiente k toma os valores de 0,17 para o valor caraterístico e 0,25 para o valor médio. O parâmetro k_b é determinado em seguida pela expressão (2.16), f_{cm} corresponde ao valor médio da resistência à compressão do betão e γ_{fb} representa o coeficiente parcial de segurança do CFRP, adotando-se o valor de 1,5 [3].

$$\beta_l = \begin{cases} \frac{l_b}{l} \left(2 - \frac{l_b}{l_e} \right) < 1 & \text{se } l_b < l_e \\ 1 & \text{se } l_b \geq l_e \end{cases} \quad (2.15)$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \geq 1 \quad (2.16)$$

A partir deste valor de tensão, é possível obter a extensão máxima admissível do CFRP para a técnica EBR (ε_{fbd}) através da seguinte expressão.

$$\varepsilon_{f,lim} \leq \varepsilon_{fbd} = \frac{f_{fbd,IC}}{E_f} \quad (2.17)$$

Relativamente à técnica NSM, a extensão máxima de dimensionamento do CFRP é dada pela seguinte expressão,

$$\varepsilon_{f,lim} \leq \varepsilon_{fbd} = \eta \frac{f_{fk}}{\gamma_f E_f} \quad (2.18)$$

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

Nesta técnica NSM a profundidade efetiva do reforço (d_f) é definida pela expressão seguinte,

$$d_f = h - \left(t_s - \frac{b_f}{2} \right) \quad (2.19)$$

estando estas variáveis definidas anteriormente e representadas esquematicamente na Fig. 2.8.

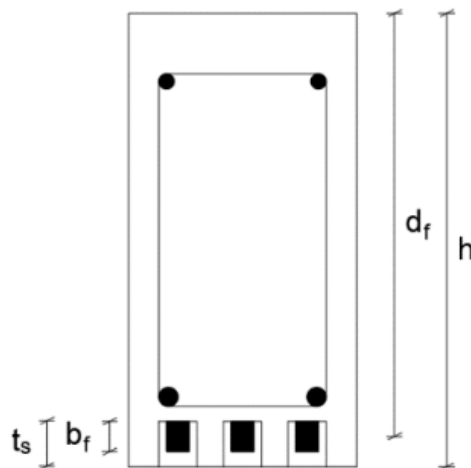


Fig. 2.8 - Representação esquemática da profundidade efetiva do sistema CFRP para a técnica NSM [7].

2.5.4 DOCUMENTO ACI-440.2R-17

O documento normativo americano *ACI 440.2R-17* apresenta recomendações para o dimensionamento de sistemas de reforço com CFRP aplicados segundo as técnicas EBR e NSM em elementos de betão armado [4]. Tal como nos documentos anteriormente analisados, a metodologia baseia-se na verificação da secção em estado limite último, admitindo as hipóteses de cálculo previamente definidas na Secção 2.5.1.

Relativamente aos modelos anteriormente apresentados, destaca-se o facto de o *ACI 440.2R-17* limitar a deformação máxima de compressão do betão ao valor de 3‰, contrariamente ao valor de 3,5‰ adotado nos restantes documentos analisados. Adicionalmente, o modelo não considera a contribuição das armaduras comprimidas na avaliação da capacidade resistente da secção.

A verificação de segurança ao estado limite último de flexão é feita através da seguinte condição:

$$\phi M_n = M_u \quad (2.20)$$

em que M_n representa o momento fletor resistente nominal e M_u o momento fletor atuante de cálculo resultante da aplicação de um carregamento majorado obtido pela seguinte expressão:

$$w_u = 1,4 w_{DL} + 1,7 w_{LL} \quad (2.21)$$

onde w_u corresponde ao valor de carga de dimensionamento e w_{DL} e w_{LL} correspondem aos valores de carga permanente e variável, respetivamente.

O momento resistente nominal, M_n , é calculado através do método do diagrama retangular simplificado. A Fig. 2.9 apresenta uma secção retangular genérica reforçada à flexão com um laminado de CFRP, assim como os diagramas de extensões e tensões em estado limite último de flexão.

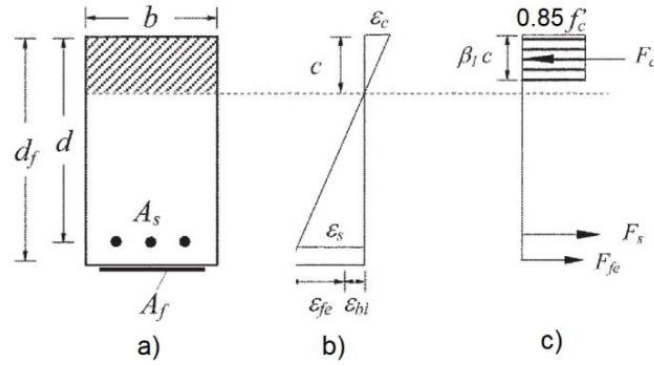


Fig. 2.9 - Secção em estado limite último de flexão: (a) geometria, (b) extensões e (c) tensões [4].

O coeficiente β_1 , representado na Fig. 2.9, assume o valor de 0,85 para betões com resistência característica à compressão inferior ou igual a 35 MPa. Para valores superiores, o regulamento prevê uma redução linear de 0,05 por cada incremento de 7 MPa, até ao valor mínimo de 0,65.

A partir da definição do bloco equivalente de tensões de compressão no betão, é possível determinar as forças resultantes de compressão no betão e de tração nas armaduras e no laminado CFRP, respetivamente, através das seguintes expressões:

$$F_c = 0,85 f'_c \beta_1 c b \quad (2.22)$$

$$F_s = A_s f_s \quad (2.23)$$

$$F_f = A_f E_f \epsilon_f \quad (2.24)$$

em que f_s representa a tensão de tração das armaduras e as restantes variáveis estão definidas na Fig. 2.9 e já foram discutidas anteriormente.

Devido à possibilidade de ocorrência de fenómenos de destacamento prematuro do CFRP em reforços pela técnica EBR, o ACI 440.2R-17 estabelece uma limitação para a deformação admissível do compósito, definida através da seguinte inequação:

$$\epsilon_{f,lim} \leq \epsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{E_f t_f}} \leq 0,9 \epsilon_{fu} \quad (2.25)$$

sendo que ϵ_{fd} corresponde ao valor de extensão limite de dimensionamento do laminado.

Por outro lado, a extensão de dimensionamento do reforço na técnica NSM deve ser a seguinte:

$$\varepsilon_{f,lim} \leq \varepsilon_{fd} = 0,7 \varepsilon_{fu} \quad (2.26)$$

sendo que ε_{fu} corresponde à extensão máxima do sistema CFRP à tração.

Para determinação do momento resistente nominal, M_n , torna-se necessário calcular previamente a posição da linha neutra, c . Esta é obtida através do equilíbrio entre as forças internas atuantes na secção, nomeadamente a força de compressão no betão, F_c , a força de tração nas armaduras, F_s , e a força de tração no reforço em CFRP, F_f .

No entanto, a determinação da linha neutra depende do modo de rotura assumido para a secção. De acordo com o regulamento, podem ser considerados quatro modos de rotura principais:

- 1º modo – rotura por esmagamento do betão após cedência a das armaduras;
- 2º modo – rotura por esmagamento do betão antes da cedência das armaduras;
- 3º modo – rotura por destacamento ou rotura do reforço em CFRP após a cedência das armaduras;
- 4º modo – rotura por destacamento ou rotura do reforço em CFRP antes da cedência das armaduras.

O procedimento geral de verificação dos diferentes modos de rotura encontra-se esquematizado na Fig. 2.10.

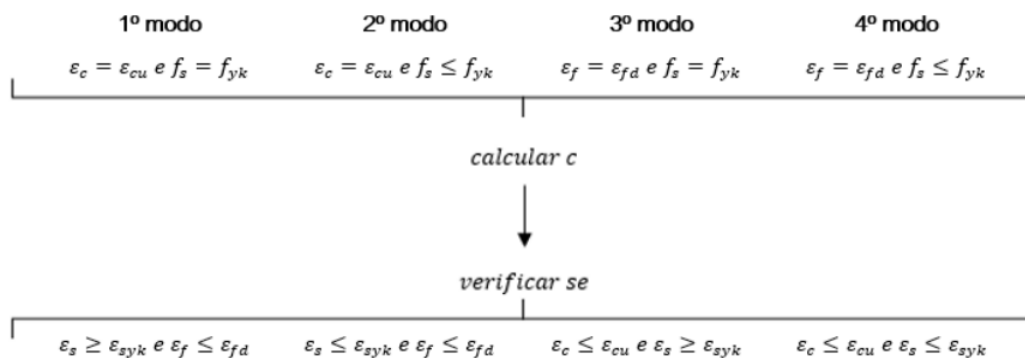


Fig. 2.10 - Procedimento de cálculo e verificação dos modos de rotura segundo o ACI 440.2R-17 [7].

No primeiro modo de rotura, admite-se que as armaduras tracionadas atingem a tensão de cedência, enquanto o betão comprimido atinge a deformação limite de 3‰. Considerando a hipótese de distribuição linear de deformações, a deformação no CFRP pode ser determinada a partir da compatibilidade geométrica entre a deformação no betão e a posição da linha neutra. Após a determinação da posição da linha neutra, c , deve verificar-se se as condições assumidas para este modo de rotura são efetivamente satisfeitas, nomeadamente se a deformação nas armaduras é superior à deformação de cedência e se a deformação no CFRP não ultrapassa o valor limite, ε_{fd} .

Caso estas condições não se verifiquem, deve ser analisado outro modo de rotura, repetindo-se o procedimento de equilíbrio e compatibilidade de deformações até se identificar o mecanismo válido para a secção em estudo.

Após a identificação do modo de rotura que caracteriza a secção reforçada, pode proceder-se à determinação do momento resistente nominal, M_n , obtido através da seguinte expressão:

$$M_n = A_s f_{yk} \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f E_f \varepsilon_f \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.27)$$

em que ψ_f representa o fator de redução da capacidade mecânica do CFRP, sendo o valor recomendado pelo regulamento 0,85.

Adicionalmente, o fator de redução da resistência, ϕ , pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$\phi = \begin{cases} 0,9 & \text{para } \varepsilon_s > 0,5\% \\ 0,65 & \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_{syk} \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{syk})}{0,005 - \varepsilon_{syk}} & \text{para } 0,5\% > \varepsilon_s > \varepsilon_{syk} \end{cases} \quad (2.28)$$

2.5.5 DOCUMENTO CNR-DT 200 R1/2013

O documento *CNR-DT 200 R1/2013* [5] apresenta recomendações para o dimensionamento de sistemas de reforço com materiais FRP aplicados externamente em elementos de betão armado, sendo exclusivamente aplicável para dimensionamento de sistemas pela técnica EBR. Tal como nos documentos anteriormente analisados, a metodologia proposta baseia-se na verificação da secção em estado limite último, assumindo as hipóteses de cálculo definidas na Secção 2.5.1.

A formulação adotada apresenta uma abordagem global semelhante à dos documentos *Bulletin 14* e *Bulletin 90*, tanto ao nível do procedimento de cálculo da capacidade resistente da secção como na consideração dos modos de rotura associados ao reforço em CFRP. Neste contexto, são considerados mecanismos de rotura associados ao esmagamento do betão comprimido e ao destacamento do compósito, sendo a deformação mobilizável no CFRP limitada em função do modo de rotura condicionante.

Relativamente à avaliação da deformação de cálculo do CFRP, o documento considera a possibilidade de ocorrência de rotura por destacamento do reforço, definindo a deformação admissível do compósito como o menor valor entre a deformação correspondente à rotura do material e a deformação associada ao destacamento do sistema de reforço.

A verificação da segurança da secção reforçada em estado limite último de flexão é efetuada através da seguinte inequação:

$$M_{sd} \leq M_{rd} \quad (2.29)$$

sendo que, M_{sd} representa o momento atuante e M_{rd} o momento resistente da secção.

A extensão máxima de tração do reforço é obtida a partir da seguinte equação:

$$\varepsilon_{f,lim} \leq \varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{ffd} \right\} \quad (2.30)$$

em que ε_{fk} representa a deformação característica de rotura à tração do sistema FRP, γ_f corresponde ao coeficiente parcial de segurança do material, adotando o valor de 1,1 e ε_{ffd} representa a deformação máxima do FRP associada à ocorrência de destacamento, determinada em seguida através da expressão (2.31). O coeficiente η traduz a influência das condições ambientais na capacidade resistente do sistema, assumindo os valores recomendados de 0,95 para ambientes interiores e 0,85 para ambientes exteriores ou agressivos. As restantes variáveis consideradas encontram-se definidas anteriormente.

$$\varepsilon_{ffd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} \geq \varepsilon_{sy} - \varepsilon_0 \quad (2.31)$$

Na expressão (2.31), ε_{sy} representa a extensão de cedência do aço, $f_{fdd,2}$ corresponde à tensão máxima do sistema CFRP obtida através da expressão (2.32). As restantes variáveis encontram-se definidas anteriormente.

$$f_{fdd,2} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{E_f}{t_f} \frac{2 k_b k_{G,2}}{FC} \sqrt{f_{cm} f_{ctm}}} \quad (2.32)$$

Na expressão anterior, $k_{G,2}$ corresponde a um fator corretivo com valor de 0,10 mm, enquanto k_q representa um coeficiente associado à distribuição do carregamento, assumindo o valor de 1,25 para cargas distribuídas e 1,0 para os restantes casos. O parâmetro $\gamma_{f,d}$ corresponde ao coeficiente parcial de segurança do CFRP, podendo variar entre 1,2 e 1,5 em função da probabilidade de ocorrência de destacamento e da qualidade de execução do reforço. O coeficiente k_b é definido pela expressão (2.16), enquanto f_{cm} e f_{ctm} representam, respetivamente, os valores médios da resistência do betão à compressão e à tração. Por fim, o parâmetro FC corresponde ao fator de confiança, usualmente adotado com o valor unitário.

No âmbito da análise à flexão de elementos reforçados com CFRP, a rotura da secção crítica pode ocorrer segundo um dos dois modos de rotura, representados esquematicamente na Fig. 2.11.

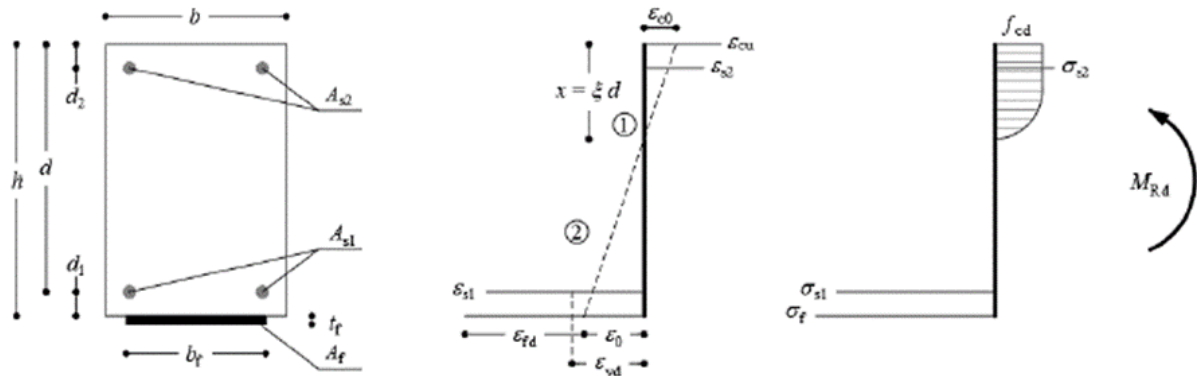


Fig. 2.11 - Modos de rotura de um elemento reforçado com sistema FRP (modo 1 e modo 2) [5].

A determinação das deformações nos diferentes elementos da secção depende do modo de rotura considerado para a secção reforçada, encontrando-se a respetiva formulação resumida na tabela em seguida:

Tabela 2.2 - Deformações nos elementos para os dois modos de rotura (adaptado de [7]).

	Modo 1	Modo 2
FRP	$\epsilon_f = \frac{\epsilon_{cu}}{x} (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$	$\epsilon_f = \epsilon_{fd}$
Betão à compressão	$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$	$\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \frac{x}{(h - x)} \leq \epsilon_{cu}$
Aço à compressão	$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \frac{x - d_2}{x}$	$\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \frac{x - d_2}{(h - x)}$
Aço à tração	$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \frac{d - x}{x}$	$\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \frac{d - x}{(h - x)}$

Para ambos os modos de rotura considerados. Admite-se uma distribuição linear das deformações ao longo da altura da secção, em conformidade com as hipóteses de cálculo anteriormente definidas.

A posição da linha neutra x e a capacidade resistente à flexão M_{rd} da secção reforçada podem ser determinadas através das expressões (2.33) e (2.34), respetivamente:

$$0 = \psi b x f_{cd} + A_{s2} \sigma_{s2} - A_{s1} \sigma_{s1} - A_f \sigma_f \quad (2.33)$$

$$M_{rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} [\psi b x f_{cd} (d - \lambda x) + A_{s2} \sigma_{s2} (d - d_2) + A_f \sigma_f d_1] \quad (2.34)$$

em que os coeficientes adimensionais ψ e λ assumem, respetivamente, valores aproximados de 0,8 e 0,4. O parâmetro γ_{Rd} é adotado igual a 1, sendo as restantes variáveis representadas na Figura 2.11.

Uma vez que o sistema CFRP apresenta comportamento linear elástico até à rotura, a tensão no compósito é obtida a partir do produto entre o módulo de elasticidade do material e a deformação correspondente anteriormente determinada.

Importa referir que, durante a fase final de elaboração da presente dissertação, foi publicada a segunda revisão do documento CNR-DT 200, designada por *CNR-DT 200 R2/2026* [14]. Esta revisão introduz diversas alterações e desenvolvimentos relativamente à versão R1/2013.

No âmbito dos temas abordados neste trabalho, destacam-se dois aspetos em particular. Em primeiro lugar, verifica-se um ajustamento dos parâmetros utilizados na expressão (2.32) correspondente ao cálculo da tensão $f_{fdd,2}$, mantendo-se, contudo, a filosofia geral da metodologia de cálculo adotada para a técnica EBR. Em segundo lugar, a nova revisão passa a contemplar explicitamente a técnica NSM, propondo uma expressão para a determinação da extensão máxima mobilizável no FRP em tração, baseada em princípios semelhantes aos adotados na expressão (2.30), mas ajustada às especificidades do comportamento dos sistemas NSM.

Atendendo ao carácter recente desta publicação e às limitações temporais associadas ao desenvolvimento da presente dissertação, optou-se por utilizar como referência o documento *CNR-DT 200 R1/2013*, sobre o qual foi desenvolvida toda a análise regulamentar apresentada neste trabalho.

2.5.6 DOCUMENTO ANNEX J DO EC2 – PARTE 1

O Documento *Annex J* da nova geração do Eurocódigo 2 [6] introduz uma metodologia de dimensionamento para elementos de betão armado reforçados com sistemas FRP, incorporando diversos desenvolvimentos recentes no âmbito da modelação da aderência e da interação entre os diferentes materiais constituintes do sistema de reforço.

Comparativamente aos regulamentos analisados nas secções anteriores, esta metodologia apresenta um grau de complexidade significativamente superior, envolvendo um maior número de parâmetros mecânicos e geométricos associados não só ao compósito, mas também ao adesivo e à interface de ligação ao substrato de betão. Esta abordagem permite uma representação mais detalhada do comportamento do sistema reforçado, mas implica igualmente uma maior exigência ao nível da informação necessária para a sua aplicação.

Durante a fase de seleção dos casos de estudo experimentais utilizados na presente dissertação, verificou-se que grande parte dos trabalhos publicados não disponibiliza todos os parâmetros requeridos pelo *Annex J* do EC2, nomeadamente propriedades específicas dos sistemas adesivos utilizados nos ensaios. Esta limitação impossibilita a aplicação consistente da metodologia a uma parte significativa da base de dados experimental considerada.

Face a estas condicionantes, optou-se por não incluir o *Annex J* na análise comparativa desenvolvida no capítulo seguinte. Esta decisão permite assegurar a uniformidade da informação disponível para todos os modelos analisados, garantindo uma comparação coerente entre os diferentes regulamentos considerados.

2.5.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES DOCUMENTOS DE DIMENSIONAMENTO

Após a apresentação dos diferentes modelos de dimensionamento para o reforço à flexão com sistemas CFRP, torna-se pertinente efetuar uma análise comparativa das principais abordagens adotadas pelos documentos normativos considerados no presente trabalho.

De um modo geral, todos os regulamentos analisados baseiam-se nos mesmos princípios fundamentais de análise de secções em estado limite último, recorrendo à compatibilidade de deformações e ao equilíbrio das forças internas para a determinação da posição da linha neutra e da capacidade resistente da secção reforçada. Consequentemente, as diferenças observadas entre os diversos modelos não se encontram associadas ao procedimento geral de cálculo, mas sobretudo à forma como é avaliada a deformação máxima mobilizável no CFRP.

Os documentos *Bulletin 14* e *Bulletin 90*, ambos da fib, apresentam metodologias conceptualmente semelhantes, distinguindo-se principalmente pela forma de determinação da deformação limite do CFRP. Enquanto o *Bulletin 14* adota valores recomendados para a deformação máxima admissível do compósito, o *Bulletin 90* recorre a formulações baseadas nos mecanismos de aderência e destacamento, conduzindo a uma avaliação mais fundamentada deste parâmetro.

Por sua vez, o *ACI 440.2R-17* introduz 4 diferentes cenários de rotura para a secção reforçada, associando a cada um deles procedimentos específicos para a determinação da posição da linha neutra e da capacidade resistente. Adicionalmente, este documento considera um fator de redução da resistência da secção, constituindo uma das principais diferenças relativamente às abordagens europeias.

O documento *CNR-DT 200 R1/2013* apresenta uma filosofia de cálculo próxima da adotada pelo *Bulletin 90*, considerando explicitamente os fenómenos de destacamento do reforço e limitando a deformação no CFRP em função dos mecanismos de rotura associados à aderência.

As Tabelas 2.3 e 2.4, em seguida, apresentam uma síntese dos critérios adotados pelos diferentes regulamentos para a determinação da deformação limite do CFRP nas técnicas EBR e NSM. Atendendo ao comportamento linear elástico do compósito até à rotura, a deformação considerada no dimensionamento influencia diretamente a tensão desenvolvida no reforço e, consequentemente, a capacidade resistente prevista para a secção. Deste modo, espera-se que as diferenças observadas na determinação deste parâmetro se reflitam nos resultados apresentados no capítulo seguinte.

Tabela 2.3 - Diferentes valores limite da extensão do CFRP para a técnica EBR conforme os regulamentos (adaptado de [7]).

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

Tabela 2.4 - Diferentes valores limite da extensão do CFRP para a técnica NSM conforme os regulamentos (adaptado de [7]).

Documento	Valor limite da extensão do CFRP para a técnica NSM
Bulletin 90	$\varepsilon_{f,lim} = \eta \frac{f_{fk}}{\gamma_f E_f}$
ACI-440.2R-17	$\varepsilon_{f,lim} = \varepsilon_{fd} = 0,7 \varepsilon_{fu}$
Annex J do EC2	$\varepsilon_{f,lim} = 0,95 b_f \tau_{b1d} \sqrt[4]{a_r} l_b (0,4 - 0,0015 l_b) / E_f \text{ para } l_b \leq 115 \text{ mm}$ $\varepsilon_{f,lim} = 0,95 b_f \tau_{b1d} \sqrt[4]{a_r} (26,2 + 0,065 \tanh\left(\frac{a_r}{70}\right) (l_b - 115)) / E_f \text{ para } l_b > 115 \text{ mm}$

3

APLICAÇÃO DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO À TÉCNICA EBR

3.1 INTRODUÇÃO

Após a apresentação dos diferentes modelos de dimensionamento para reforço à flexão com sistemas CFRP, procede-se neste capítulo à sua aplicação a um conjunto de resultados experimentais disponíveis na literatura relativos à técnica EBR.

O principal objetivo consiste em avaliar a capacidade dos diferentes regulamentos para prever a deformação mobilizada no CFRP, a capacidade resistente à flexão dos elementos reforçados e identificando o modo de ruína, comparando os resultados teóricos obtidos com os valores experimentais observados nos ensaios. Para tal, serão aplicadas as metodologias propostas pelo *Bulletin 14*, *Bulletin 90*, *ACI 440.2R-17* e *CNR-DT 200 R1/2013* aos diferentes casos de estudo considerados.

Os documentos analisados foram originalmente desenvolvidos para fins de dimensionamento, recorrendo, por esse motivo, a coeficientes parciais de segurança e a valores característicos ou de cálculo das propriedades dos materiais. Contudo, uma vez que o objetivo da presente dissertação consiste na comparação entre as previsões dos modelos e os resultados experimentais obtidos em ensaios laboratoriais, optou-se por reduzir, sempre que possível, a influência dos fatores de segurança inerentes aos procedimentos regulamentares. Para esse efeito, foram adotados valores unitários para os coeficientes parciais de segurança e utilizados os valores médios das propriedades dos materiais sempre que disponíveis.

Os valores recomendados pelos diferentes documentos normativos e os valores efetivamente adotados na presente análise encontram-se resumidos na Tabela 3.1. Esta abordagem permitiu avaliar de forma mais direta o desempenho dos modelos de cálculo, minimizando o conservadorismo associado ao dimensionamento regulamentar e promovendo uma comparação mais adequada com os resultados experimentais.

Tabela 3.1 - Valores recomendados para os coeficientes pelos regulamentos e valores adotados na presente análise para a técnica EBR.

Documento	Parâmetro	Valor Proposto	Valor Utilizado
Bulletin 90	γ_{fb}	1,5	1,0
	k_{cr}	1,8 - 2,1	2,1
	k	0,17 - 0,25	0,25
ACI 440.2R-17	ψ_f	0,85	1,0
	ϕ	Calculado	1,0
CNR-DT 200 R1/2013	γ_f	1,1	1,0
	γ_{fd}	1,2 - 1,5	1,0
	η	0,85 - 0,95	1,0
	γ_{rd}	1,0	1,0

Importa salientar que esta adaptação teve como único objetivo permitir uma comparação mais adequada entre os resultados teóricos e experimentais, não correspondendo à aplicação dos regulamentos para fins de dimensionamento em contexto de projeto.

3.2 BASE DE DADOS EXPERIMENTAL

A validação dos modelos de dimensionamento apresentados no capítulo anterior foi realizada com recurso a resultados experimentais disponíveis na literatura relativos a elementos de betão armado reforçados à flexão com sistemas CFRP aplicados segundo a técnica EBR. Os casos de estudo selecionados foram obtidos a partir dos trabalhos desenvolvidos por Juvandes [9] e Dias [10], abrangendo diferentes configurações geométricas, propriedades dos materiais e sistemas de reforço.

A base de dados experimental utilizada é constituída por ensaios realizados sobre vigas e lajes de betão armado reforçadas à flexão com sistemas CFRP aplicados segundo a técnica EBR. No total, foram analisados 22 elementos estruturais, seleccionados a partir dos trabalhos de Juvandes [9] e Dias [10]. A distribuição dos casos de estudo em função do tipo de elemento estrutural e do sistema de reforço utilizado encontra-se resumida na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Distribuição dos casos de estudo considerados na base de dados experimental da técnica EBR.

Modelos	CFRP	Total
Vigas	Laminados	7
	Mantas	1
Lajes	Laminados	8
	Mantas	6

3.2.1 VIGAS DE BETÃO ARMADO

Os casos de estudo relativos a vigas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas CFRP totalizam 8 ensaios, abrangendo diferentes geometrias, taxas de armadura e configurações de reforço. Dos 8 elementos analisados, 7 correspondem a vigas reforçadas com laminados CFRP e 1 a uma viga reforçada com mantas CFRP. Os sistemas de reforço foram aplicados na zona tracionada das vigas, com o objetivo de aumentar a sua capacidade resistente à flexão.

Os ensaios de Juvandes [9] incluem as vigas das séries B e C. A série B é constituída por seis vigas reforçadas com laminados CarboDur S512, apresentando secções transversais e sistemas de reforço semelhantes, mas diferentes propriedades mecânicas dos materiais e disposições de armadura. A série C é representada pelo provete C5, distinguindo-se pela sua geometria, maior taxa de armadura longitudinal e betão menos resistente.

Os ensaios de Dias [10] incluem as vigas V2 e V4. Estes elementos apresentam características geométricas idênticas, diferindo essencialmente no tipo de reforço utilizado, correspondendo V2 a uma viga reforçada com mantas CFRP e V4 a uma viga reforçada com laminados CFRP.

A Fig. 3.1 apresenta uma representação esquemática da secção transversal de uma viga reforçada à flexão com laminados CFRP instalados segundo a técnica EBR, identificando os principais parâmetros geométricos, de armadura e de reforço utilizados ao longo do presente estudo. As características específicas dos diferentes casos de estudo e respetivas referências estão resumidas nas Tabelas 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6.

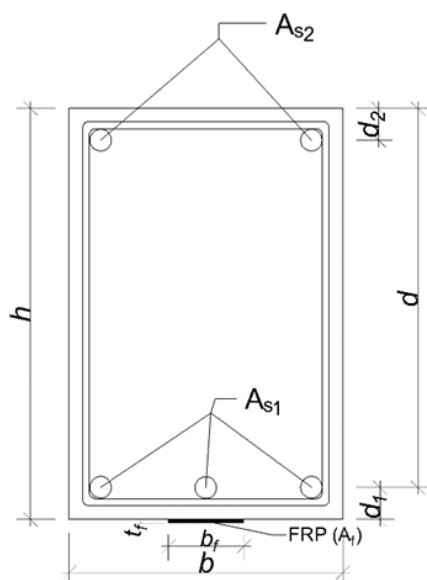


Fig. 3.1 - Geometria da secção transversal e definição dos parâmetros geométricos, das armaduras longitudinais e do reforço CFRP adotados na caracterização das vigas reforçadas segundo a técnica EBR.

Tabela 3.3 - Identificação dos casos de estudo considerados na análise das vigas reforçadas segundo a técnica EBR.

Modelos	CFRP	Séries		
		Ref.	Total	Documento
Vigas	Laminados	B03, B05, B08, B10, B09, C5	6	[9]
		V4	1	[10]
	Mantas	V2	1	[10]

Tabela 3.4 - Características geométricas e propriedades mecânicas do betão das vigas consideradas (adaptado de [9][10]).

Casos de Estudo	b [mm]	h [mm]	d [mm]	d1 [mm]	d2 [mm]	fcm [MPa]	fctm [MPa]	Ec [GPa]	
Laminados	B03	75	150	138,5	11,5	14,0	41,8	3,1	33,7
	B05	75	150	138,5	11,5	14,0	38,1	2,9	32,5
	B08	75	150	138,5	11,5	14,0	36	2,8	31,7
	B10	75	150	138,5	11,5	14,0	34,2	2,7	31,3
	B09	75	150	136,0	14,00	11,5	34,2	2,7	31,3
	C5	150	150	123,0	27,00	27,0	20,7	1,6	27,1
	V4	120	180	166,0	14,00	13,0	41,0	4,2	31,1
Mantas	V2	120	180	166,0	14,00	13,0	41,0	4,2	31,1

Tabela 3.5 - Características mecânicas das armaduras longitudinais das vigas consideradas (adaptado de [9][10]).

Casos de Estudo		Armadura Inferior			Armadura Superior		
		As1 [cm2]	fsym [MPa]	Es [GPa]	As2 [cm2]	fsym [MPa]	Es [GPa]
Laminados	B03	0,8482	635,6	225,3	1,5080	497,1	174,0
	B05	0,8482	635,6	225,3	1,5080	497,1	174,0
	B08	0,8482	635,6	225,3	1,5080	497,1	174,0
	B10	0,8482	635,6	225,3	1,5080	497,1	174,0
	B09	1,5080	497,1	174,0	0,1414	192,3	195,0
	C5	2,2619	507,4	184,6	2,2619	507,4	184,6
	V4	1,0053	533	210,0	0,5655	555,0	218,9
Mantas	V2	1,0053	533	210,0	0,5655	555,0	218,9

Tabela 3.6 - Propriedades geométricas e mecânicas dos sistemas CFRP utilizados nas vigas consideradas (adaptado de [9][10]).

Casos de Estudo	bf [mm]	ef equiv. [mm]	Af total [cm2]	εfum [%]	Efm [GPa]	Referência	
Laminados	B03	50	1,2	0,6000	20,00	160,0	CarboDur S512
	B05	50	1,2	0,6000	20,00	160,0	CarboDur S512
	B08	50	1,2	0,6000	20,00	160,0	CarboDur S512
	B10	50	1,2	0,6000	20,00	160,0	CarboDur S512
	B09	50	1,2	0,6000	20,00	160,0	CarboDur S512
	C5	50	1,2	0,6000	20,00	160,0	CarboDur S512
	V4	20	1,4	0,2800	11,00	200,0	Mbrace Laminado HM
Mantas	V2	70	0,2	0,1540	15,00	240,0	Mbrace Manta C1-20 (2 camadas)

3.2.2 LAJES DE BETÃO ARMADO

As lajes consideradas na presente análise encontram-se agrupadas segundo o tipo de reforço de FRP. Primeiro, o grupo de lajes reforçadas com laminados de CFRP, resumindo as séries S, BL e I dos documentos [9] e [10]. Seguidamente, o grupo de lajes reforçadas com mantas de CFRP, incluindo as séries R e BM dos mesmos documentos. Adicionalmente, alguns dos provetes foram previamente fendilhados antes da aplicação do reforço, permitindo avaliar a influência do estado inicial de dano no comportamento estrutural dos elementos reforçados.

A Fig. 3.2 apresenta uma representação esquemática da secção transversal de uma laje reforçada à flexão com laminados CFRP instalados segundo a técnica EBR, identificando os principais parâmetros geométricos, de armadura e de reforço utilizados ao longo do presente estudo. As características específicas dos diferentes casos de estudo e respetivas referências estão resumidas nas Tabelas 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10.

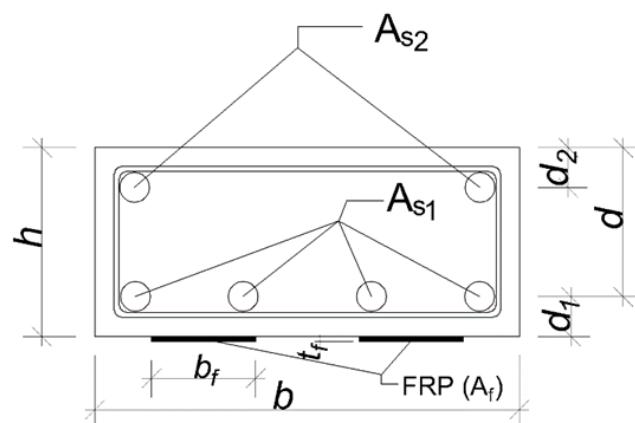


Fig. 3.2 - Geometria da secção transversal e definição dos parâmetros geométricos, das armaduras longitudinais e do reforço CFRP adotados na caracterização das lajes reforçadas segundo a técnica EBR.

Tabela 3.7 - Identificação dos casos de estudo considerados na análise das lajes reforçadas segundo a técnica EBR.

Modelos	CFRP	Séries		
		Ref.	Total	Documento
Lajes	Laminados	LC1S, LC2S	2	[9]
		LA4S, LB2S, LD3BL, LD4BL, LE3I, LE4I	6	[10]
		LC3R, LC4R	2	[9]
	Mantas	LA3R, LB1R, LD1BM, LD2BM	4	[10]

Tabela 3.8 - Características geométricas e propriedades mecânicas do betão das lajes consideradas (adaptado de [9][10]).

Casos de Estudo	b [mm]	h [mm]	d [mm]	d1 [mm]	d2 [mm]	f _{cm} [MPa]	f _{ctm} [MPa]	E _c [GPa]	
Laminados	LC1S	439	80,5	67,5	13,0	14,5	65,6	4,5	39,7
	LC2S	438	84,2	71,2	13,0	14,5	65,7	4,5	39,7
	LA4S	435	80,0	67,0	13,0	14,5	60,3	4,2	44,8
	LB2S	439	85,0	72,0	13,0	14,5	61,8	4,3	40,4
	LD3BL	433	85,0	72,0	13,0	14,5	49,2	3,9	36,0
	LD4BL	445	81,0	68,0	13,0	14,5	49,0	3,9	35,9
	LE3I	437	82,0	69,0	13,0	14,5	50,2	4,0	38,5
	LE4I	441	78,0	65,0	13,0	14,5	50,2	4,0	38,5
Mantas	LC3R	428	80,5	67,5	13,0	14,5	65,8	4,5	39,8
	LC4R	443	77,4	64,4	13,0	14,5	65,5	4,5	39,7
	LA3R	441	76,0	63,0	13,0	14,5	60,2	4,2	44,7
	LB1R	438	81,0	68,0	13,0	14,5	61,6	4,3	40,3
	LD1BM	441	80,0	67,0	13,0	14,5	49,0	3,9	35,9
	LD2BM	433	85,0	72,0	13,0	14,5	49,3	3,9	36,0

Tabela 3.9 - Características mecânicas das armaduras longitudinais das lajes consideradas (adaptado de [9][10]).

Casos de Estudo		Armadura Inferior			Armadura Superior		
		As1 [cm2]	fsym [MPa]	Es [GPa]	As2 [cm2]	fsym [MPa]	Es [GPa]
Laminados	LC1S	0,8482	635,6	225,3	0,2121	330,3	200,0
	LC2S	0,8482	635,6	225,3	0,2121	330,3	200,0
	LA4S	0,8482	635,6	225,3	0,2121	330,3	200,0
	LB2S	0,8482	635,6	225,3	0,2121	330,3	200,0
	LD3BL	0,8482	555,0	218,9	0,2121	330,3	200,0
	LD4BL	0,8482	555,0	218,9	0,2121	330,3	200,0
	LE3I	0,8482	555,0	218,9	0,2121	330,3	200,0
	LE4I	0,8482	555,0	218,9	0,2121	330,3	200,0
Mantas	LC3R	0,8482	635,6	225,3	0,2121	330,3	200,0
	LC4R	0,8482	635,6	225,3	0,2121	330,3	200,0
	LA3R	0,8482	635,6	225,3	0,2121	330,3	200,0
	LB1R	0,8482	635,6	225,3	0,2121	330,3	200,0
	LD1BM	0,8482	555,0	218,9	0,2121	330,3	200,0
	LD2BM	0,8482	555,0	218,9	0,2121	330,3	200,0

Tabela 3.10 - Propriedades geométricas e mecânicas dos sistemas CFRP utilizados nas lajes consideradas (adaptado de [9][10]).

Casos de Estudo	bf [mm]	ef equiv. [mm]	Af total [cm2]	εfum [%]	Efm [GPa]	Referência	
Laminados	LC1S	16	1,20	0,3840	20,00	160,0	CarboDur S512 (2 faixas)
	LC2S	16	1,20	0,3840	20,00	160,0	CarboDur S512 (2 faixas)
	LA4S	16	1,20	0,3840	20,00	160,0	CarboDur S512 (2 faixas)
	LB2S	16	1,20	0,3840	20,00	160,0	CarboDur S512 (2 faixas)
	LD3BL	16	1,40	0,4480	14,00	150,00	Mbrace Laminado LM (2
	LD4BL	16	1,40	0,4480	14,00	150,00	Mbrace Laminado LM (2
	LE3I	16	1,40	0,4480	15,00	160,00	INEGI Laminado (2 faixas)
	LE4I	16	1,40	0,4480	15,00	160,00	INEGI Laminado (2 faixas)
Mantas	LC3R	70	0,22	0,3080	15,00	230,00	Replark 20 (2 faixas)
	LC4R	70	0,22	0,3080	15,00	230,00	Replark 20 (2 faixas)
	LA3R	70	0,22	0,3080	15,00	230,00	Replark 20 (2 faixas)
	LB1R	70	0,22	0,3080	15,00	230,00	Replark 20 (2 faixas)
	LD1BM	70	0,22	0,3080	15,00	240,00	Mbrace Manta C1-20 (2 faixas)
	LD2BM	70	0,22	0,3080	15,00	240,00	Mbrace Manta C1-20 (2 faixas)

3.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS ÀS VIGAS

Os modelos de dimensionamento apresentados no Capítulo 2 foram aplicados aos casos de estudo descritos na secção anterior, com o objetivo de determinar a extensão mobilizada no CFRP e o momento resistente último previsto por cada documento normativo.

Os cálculos foram implementados em folhas de cálculo desenvolvidas para o efeito, permitindo automatizar o processo iterativo associado à determinação do estado de deformação da secção e à identificação do modo de rotura governante em cada regulamento. (Ver Anexo A.1)

Os resultados obtidos foram posteriormente comparados com os valores experimentais, de forma a avaliar a capacidade de cada modelo em prever o comportamento dos elementos reforçados.

3.3.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS VIGAS

Antes da aplicação dos modelos de dimensionamento, na Tabela 3.11 apresentam-se os resultados experimentais correspondentes às vigas consideradas na análise. Estes valores constituem a referência para a posterior comparação com os resultados teóricos obtidos através dos diferentes regulamentos. Para cada ensaio são indicados a extensão máxima registada no CFRP, ε_f , o momento resistente máximo, M_{max} , e respetivo modo de rotura.

Tabela 3.11 - Resultados experimentais para os casos de Vigas (adaptado de [9][10]).

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	B03	6,35	11,235	Destacamento CFRP
	B05	4,75	9,100	Destacamento CFRP
	B08	4,84	9,450	Destacamento CFRP
	B10	4,97	8,890	Destacamento CFRP
	B09	7,21	17,500	Destacamento CFRP
	C5	5,06	20,570	Destacamento CFRP
	V4	6,87	14,708	Destacamento CFRP
Mantas	V2	8,07	13,946	Destacamento CFRP

Observa-se que todas as vigas apresentaram rotura por destacamento do CFRP, evidenciando a importância dos mecanismos de aderência no comportamento de elementos reforçados pela técnica EBR. Este aspeto será posteriormente confrontado com os modos de rotura previstos pelos diferentes modelos regulamentares.

3.3.2 RESULTADOS OBTIDOS PELOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

Nas Tabelas 3.12 a 3.15 apresentam-se os resultados obtidos para cada regulamento, os quais serão posteriormente comparados com os valores experimentais de forma a analisar as diferenças entre os resultados teóricos e os resultados observados experimentalmente.

Tabela 3.12 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento *Bulletin 14*.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	B03	6,50	8,981	Destacamento CFRP
	B05	6,50	8,959	Destacamento CFRP
	B08	6,50	8,946	Destacamento CFRP
	B10	6,50	8,935	Destacamento CFRP
	B09	6,50	13,967	Esmagamento
	C5	6,50	19,312	Destacamento CFRP
	V4	6,50	14,346	Destacamento CFRP
Mantas	V2	6,50	12,340	Destacamento CFRP

Tabela 3.13 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento *Bulletin 90*.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	B03	5,88	8,178	Destacamento CFRP
	B05	5,70	7,928	Destacamento CFRP
	B08	5,59	7,779	Destacamento CFRP
	B10	5,50	7,647	Destacamento CFRP
	B09	4,52	13,517	Esmagamento
	C5	5,20	17,871	Destacamento CFRP
	V4	6,07	13,999	Destacamento CFRP
Mantas	V2	11,14	15,295	Destacamento CFRP

Tabela 3.14 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento *ACI-440.2R-17*.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	B03	6,05	8,394	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	B05	5,78	7,997	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	B08	5,61	7,763	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	B10	5,47	7,556	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	B09	4,22	13,215	Esmagamento c/armaduras em cedência
	C5	3,87	15,456	Esmagamento s/armaduras em cedência
	V4	4,96	13,104	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
Mantas	V2	11,43	15,398	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência

Tabela 3.15 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento CNR-DT 200 R1/2012.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	B03	3,44	5,882	Destacamento CFRP
	B05	3,31	5,638	Destacamento CFRP
	B08	3,23	5,501	Destacamento CFRP
	B10	3,16	5,374	Destacamento CFRP
	B09	3,16	12,354	Destacamento CFRP
	C5	2,75	12,651	Destacamento CFRP
	V4	3,43	13,681	Destacamento CFRP
Mantas	V2	7,05	24,632	Destacamento CFRP

Da observação das tabelas anteriores verifica-se que os diferentes regulamentos conduzem a previsões distintas da extensão mobilizada no CFRP e da capacidade resistente das vigas analisadas. Estas diferenças resultam essencialmente dos critérios adotados para a determinação da deformação limite do reforço e dos diferentes modos de rotura considerados por cada documento de dimensionamento.

3.3.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos diferentes modelos de dimensionamento, procedeu-se à comparação entre os resultados teóricos obtidos e os valores experimentais observados nos ensaios. Para tal, recorreu-se à representação gráfica da relação entre os valores previstos pelos regulamentos e os correspondentes experimentais.

Nos gráficos seguintes, a reta de igualdade ($y=x$) representa a concordância perfeita entre os resultados teóricos e experimentais. Assim, os pontos localizados abaixo desta reta correspondem a previsões conservativas, enquanto os pontos situados acima da reta indicam previsões não conservativas, uma vez que a capacidade resistente prevista excede a observada experimentalmente.

3.3.3.1 Extensão máxima do CFRP

A Fig. 3.3 evidencia diferenças significativas entre os regulamentos na estimativa da extensão máxima mobilizada no CFRP. Para a maioria dos elementos reforçados com laminados CFRP, o *Bulletin 90* e o *ACI 440.2R-17* apresentam uma boa concordância com os resultados experimentais, sendo capazes de acompanhar de forma satisfatória a variação observada entre os diferentes ensaios.

O *Bulletin 14* conduz igualmente a previsões próximas dos valores experimentais em vários casos de estudo, apesar da sua abordagem simplificada para a determinação da extensão limite do CFRP. Verifica-se, contudo, que a aproximação aos resultados experimentais não é uniforme para todos os elementos analisados, observando-se desvios mais significativos nos casos em que foram registadas as maiores deformações.

Por sua vez, o *CNR-DT 200 R1/2013* apresenta sistematicamente os menores valores de extensão máxima do CFRP, afastando-se dos resultados experimentais para a generalidade dos casos analisados. Esta tendência é particularmente evidente para os elementos que desenvolveram níveis de deformação mais elevados antes da ocorrência da rotura.

O ensaio V2 merece especial atenção por corresponder à única viga reforçada com mantas CFRP considerada nesta análise. Neste caso, tanto o *Bulletin 90* como o *ACI 440.2R-17* conduzem a extensões superiores às observadas experimentalmente, constituindo as previsões mais afastadas da reta de igualdade. Em contrapartida, o *Bulletin 14* e o *CNR-DT 200 R1/2013* mantêm previsões inferiores ao valor experimental registado.

De um modo geral, observa-se que os regulamentos apresentam desempenhos distintos na estimativa da extensão máxima do CFRP, sendo esta diferença particularmente visível nos elementos que desenvolveram maiores deformações antes da rotura. Tal resultado encontra-se em consonância com as diferentes metodologias adotadas por cada documento para a determinação da extensão limite mobilizável no reforço.

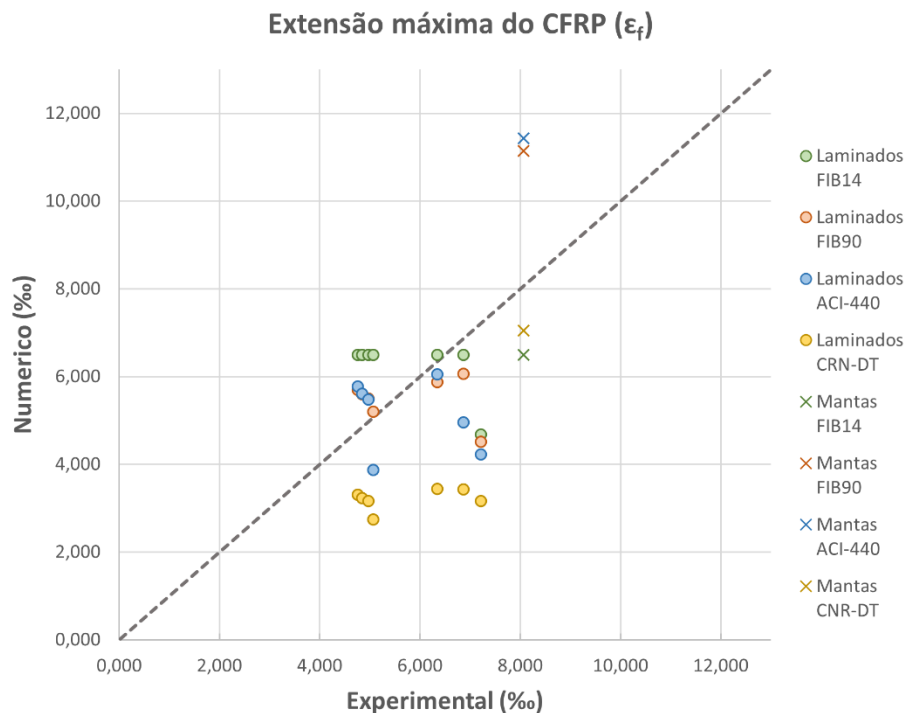


Fig. 3.3 - Comparação entre as extensões máximas experimentais e teóricas para as vigas analisadas.

3.3.3.2 Momento Resistente Máximo

A Fig. 3.4 apresenta a comparação entre os momentos resistentes experimentais e os valores previstos pelos diferentes documentos de dimensionamento para as vigas analisadas. De um modo geral, verifica-se que as diferenças observadas entre os regulamentos são menos pronunciadas do que as identificadas anteriormente para a extensão máxima do CFRP, conduzindo a uma maior proximidade global entre os resultados teóricos e experimentais. Observa-se ainda que a maioria das previsões regulamentares se situa abaixo dos valores experimentais, evidenciando uma tendência global para previsões conservativas e, consequentemente, favoráveis do ponto de vista da segurança estrutural.

Os documentos *Bulletin 14* e *Bulletin 90* apresentam, para a maioria dos casos analisados, as previsões mais próximas dos resultados experimentais. Apesar das diferenças observadas na determinação da extensão limite do CFRP, ambos os regulamentos conduzem a estimativas consistentes da capacidade resistente das vigas, acompanhando de forma satisfatória a tendência observada experimentalmente.

O documento *ACI 440.2R-17* apresenta igualmente uma boa concordância com os resultados experimentais, embora tenda a fornecer valores ligeiramente inferiores aos obtidos pelos documentos da fib para alguns casos de estudo. Ainda assim, as diferenças observadas são relativamente reduzidas quando comparadas com as verificadas para a deformação máxima do CFRP.

Por sua vez, o documento *CNR-DT 200 R1/2013* apresenta os maiores desvios relativamente aos resultados experimentais para a maioria das vigas analisadas, conduzindo a estimativas significativamente inferiores às observadas nos ensaios. Contudo, esta tendência não se verifica para o caso V4, no qual as previsões deste regulamento se aproximam dos resultados experimentais de forma comparável aos restantes documentos analisados, possivelmente devido à geometria do elemento reforçado.

O caso C5 merece particular destaque por corresponder ao elemento que apresentou a maior capacidade resistente experimental. Verifica-se que todos os regulamentos são conservadores em relação à resistência desta viga, embora com diferentes graus de conservadorismo. O *Bulletin 14* conduz ao resultado mais próximo do valor experimental, enquanto o *CNR-DT 200 R1/2013* apresenta o maior desvio.

Importa ainda salientar que, apesar das diferenças significativas observadas anteriormente na estimativa da extensão máxima do CFRP, os desvios entre regulamentos tornam-se menos pronunciados quando se analisa o momento resistente. Tal comportamento pode ser explicado pelo facto de a deformação do reforço constituir apenas um dos parâmetros envolvidos no cálculo da capacidade resistente da secção. Conforme apresentado no Capítulo 2, o momento resistente resultado do equilíbrio de forças e da compatibilidade de deformações na secção reforçada, sendo influenciado simultaneamente pelas propriedades do betão, das armaduras e do sistema CFRP. Consequentemente, verifica-se que as diferenças observadas entre os regulamentos na determinação da extensão máxima do CFRP são parcialmente atenuadas quando se analisa a capacidade resistente da secção, conduzindo a previsões de momento resistente relativamente próximas entre si.

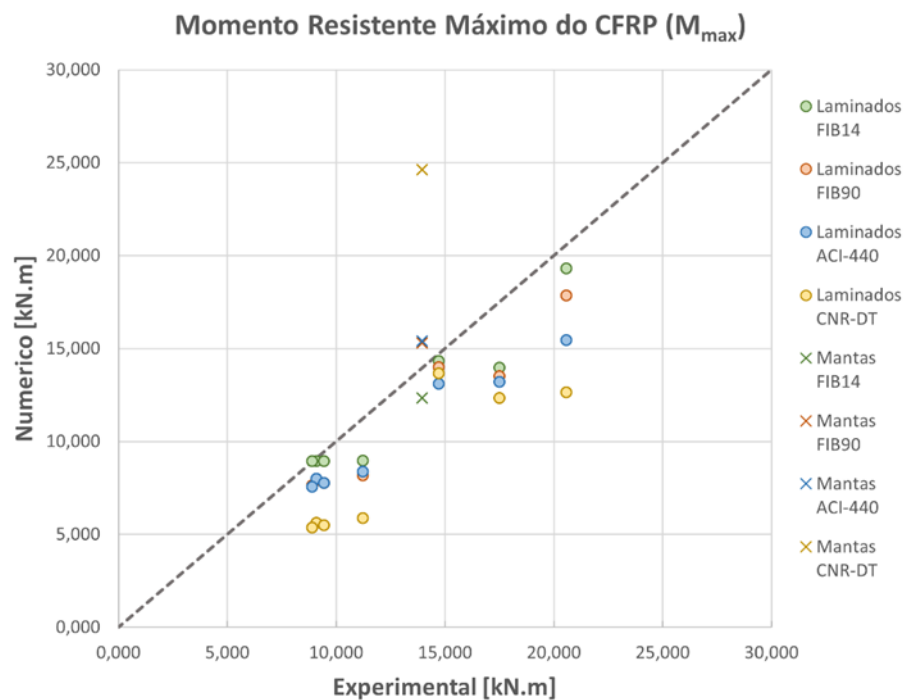


Fig. 3.4 - Comparação entre os momentos resistentes experimentais e os valores previstos pelos diferentes regulamentos para as vigas analisadas.

3.4 APLICAÇÃO DOS MODELOS ÀS LAJES

À semelhança do realizado para as vigas, procedeu-se à aplicação dos diferentes modelos de dimensionamento aos casos de estudo relativos às lajes reforçadas com CFRP pela técnica EBR. Com base nas características geométricas e mecânicas apresentadas anteriormente, foram determinados os valores de extensão máxima mobilizada no reforço e os correspondentes momentos resistentes previstos pelos diferentes regulamentos analisados. (Ver Anexo A.2)

Nas secções seguintes apresentam-se os resultados experimentais considerados, os valores obtidos através dos modelos de dimensionamento e a respetiva análise comparativa, com o objetivo de avaliar a adequação dos diferentes documentos normativos na previsão do comportamento de lajes reforçadas à flexão com CFRP.

3.4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES

A Tabela 3.16 apresenta os resultados experimentais considerados para as lajes reforçadas com CFRP pela técnica EBR, incluindo a extensão máxima registada no reforço, o momento resistente máximo e o respetivo modo de rotura.

Tabela 3.16 - Resultados experimentais para os casos de Lajes (adaptado de [9][10]).

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	LC1S	10,10	9,378	Destacamento CFRP
	LC2S	11,53	10,368	Destacamento CFRP
	LA4S	9,67	8,415	Destacamento CFRP
	LB2S	9,18	9,202	Destacamento CFRP
	LD3BL	9,57	9,083	Destacamento CFRP
	LD4BL	10,42	8,891	Destacamento CFRP
	LE3I	8,58	8,459	Destacamento CFRP
	LE4I	10,24	8,786	Destacamento CFRP
Mantas	LC3R	10,90	10,753	Destacamento CFRP
	LC4R	10,00	8,608	Ruína Mista
	LA3R	11,14	8,740	Ruína Mista
	LB1R	12,00	9,972	Ruína Mista
	LD1BM	7,92	7,761	Destacamento CFRP
	LD2BM	6,65	7,433	Destacamento CFRP

Verifica-se que a maioria das lajes apresentou rotura por destacamento do CFRP. No entanto, os ensaios LC4R, LA3R e LB1R evidenciaram uma rotura mista, distinguindo-se dos restantes casos de estudo analisados.

3.4.2 RESULTADOS OBTIDOS PELOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

Nas Tabelas 3.17 a 3.20 apresentam-se os resultados obtidos para cada regulamento, os quais serão posteriormente comparados com os valores experimentais, de forma a avaliar o grau de concordância entre as previsões teóricas e os resultados observados nos ensaios.

Tabela 3.17 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento *Bulletin 14*.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	LC1S	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LC2S	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LA4S	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LB2S	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LD3BL	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LD4BL	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LE3I	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LE4I	6,50	6,758	Destacamento CFRP
Mantas	LC3R	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LC4R	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LA3R	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LB1R	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LD1BM	6,50	6,758	Destacamento CFRP
	LD2BM	6,50	6,758	Destacamento CFRP

Tabela 3.18 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento *Bulletin 90*.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	LC1S	9,16	7,867	Destacamento CFRP
	LC2S	9,16	8,265	Destacamento CFRP
	LA4S	8,90	7,660	Destacamento CFRP
	LB2S	8,98	8,239	Destacamento CFRP
	LD3BL	7,95	7,553	Destacamento CFRP
	LD4BL	7,95	7,170	Destacamento CFRP
	LE3I	7,75	7,425	Destacamento CFRP
	LE4I	7,76	7,031	Destacamento CFRP
Mantas	LC3R	14,96	11,624	Destacamento CFRP
	LC4R	15,05	11,198	Destacamento CFRP
	LA3R	14,62	10,709	Destacamento CFRP
	LB1R	14,71	11,543	Destacamento CFRP
	LD1BM	13,36	10,446	Destacamento CFRP
	LD2BM	13,34	11,143	Destacamento CFRP

Tabela 3.19 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento *ACI-440.2R-17*.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	LC1S	7,58	6,964	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LC2S	7,58	7,326	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LA4S	7,27	6,966	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LB2S	7,36	7,510	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LD3BL	6,28	6,754	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LD4BL	6,26	6,396	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LE3I	6,14	6,633	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LE4I	6,14	6,271	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
Mantas	LC3R	13,50	10,661	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LC4R	13,50	10,221	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LA3R	13,50	10,169	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LB1R	13,50	10,925	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LD1BM	12,49	10,011	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	LD2BM	12,53	10,723	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência

Tabela 3.20 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento *CNR-DT 200 R1/2012*.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	LC1S	4,90	7,483	Destacamento CFRP
	LC2S	4,90	7,932	Destacamento CFRP
	LA4S	4,71	7,126	Destacamento CFRP
	LB2S	4,77	7,809	Destacamento CFRP
	LD3BL	4,20	6,915	Destacamento CFRP
	LD4BL	4,20	6,504	Destacamento CFRP
	LE3I	4,12	6,624	Destacamento CFRP
	LE4I	4,12	6,214	Destacamento CFRP
Mantas	LC3R	8,74	13,529	Destacamento CFRP
	LC4R	8,76	12,897	Destacamento CFRP
	LA3R	8,43	12,058	Destacamento CFRP
	LB1R	8,52	13,283	Destacamento CFRP
	LD1BM	7,69	11,658	Destacamento CFRP
	LD2BM	7,69	12,617	Destacamento CFRP

Da observação das tabelas anteriores verifica-se que os diferentes regulamentos conduzem a previsões distintas da extensão máxima mobilizada no CFRP e da capacidade resistente das lajes analisadas. Verificam-se igualmente diferenças relativamente aos mecanismos de rotura previstos, particularmente quando comparados com os modos de rotura observados experimentalmente.

3.4.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

Como objetivo de avaliar o desempenho dos diferentes modelos de dimensionamento, procedeu-se à comparação entre os resultados teóricos obtidos e os valores experimentais observados nos ensaios. Para tal, recorreu-se à representação gráfica da relação entre os valores previstos pelos regulamentos e os correspondentes resultados experimentais para as lajes analisadas.

3.4.3.1 Extensão máxima do CFRP

Observa-se, pela Fig. 3.5, uma maior dispersão dos resultados relativamente ao verificado anteriormente para as vigas, evidenciando diferenças mais significativas entre os documentos de dimensionamento na previsão da extensão máxima do CFRP.

No caso do documento *Bulletin 14*, a extensão máxima do CFRP assume o valor recomendado de 6,5‰ para todos os casos analisados (mantas e laminados). Consequentemente, os resultados representam-se por uma linha horizontal no gráfico, não refletindo a variabilidade observada experimentalmente entre os diferentes ensaios. Apesar da simplicidade desta abordagem, verifica-se que as previsões se situam abaixo da maioria dos valores experimentais obtidos para as lajes analisadas.

O documento *Bulletin 90* evidencia um comportamento distinto para os elementos reforçados com laminados e com mantas CFRP. Nos casos reforçados com laminados, as previsões obtidas apresentam uma aproximação globalmente satisfatória aos resultados experimentais. Por outro lado, à semelhança das vigas, os elementos reforçados com mantas conduzem a valores mais elevados de deformação prevista, evidenciando uma maior dispersão relativamente aos resultados experimentais. Esta diferença sugere que o modelo é sensível ao tipo de sistema de reforço considerado, conduzindo a respostas distintas para laminados e mantas CFRP.

O *ACI 440.2R-17* evidencia um comportamento semelhante ao do *Bulletin 90*, distinguindo igualmente os sistemas reforçados com laminados e mantas CFRP. Para os elementos reforçados com laminados, as previsões apresentam uma concordância razoável com os resultados experimentais (valores por defeito), enquanto para as mantas se verificam extensões significativamente superiores às observadas nos ensaios, traduzindo uma tendência não conservativa para este tipo de reforço.

Por sua vez, o documento *CNR-DT 200 R1/2013* apresenta as previsões mais reduzidas para a generalidade dos casos analisados (mantas e laminados). Esta tendência é particularmente evidente para as lajes reforçadas com laminados CFRP, para as quais os valores calculados se afastam significativamente dos resultados experimentais (por defeito). Embora se observe uma ligeira aproximação nos casos reforçados com mantas, o regulamento continua a apresentar valores predominantemente inferiores aos registados experimentalmente.

De uma forma geral, os resultados demonstram que a resposta dos diferentes regulamentos é fortemente influenciada pelo tipo de sistema de reforço considerado. Enquanto os documentos *Bulletin 90* e *ACI 440.2R-17* reproduzem de forma mais evidente as diferenças entre laminados e mantas, o *Bulletin 14* e o *CNR-DT 200 R1/2013* tendem a conduzir a previsões mais conservativas para a extensão máxima do CFRP.

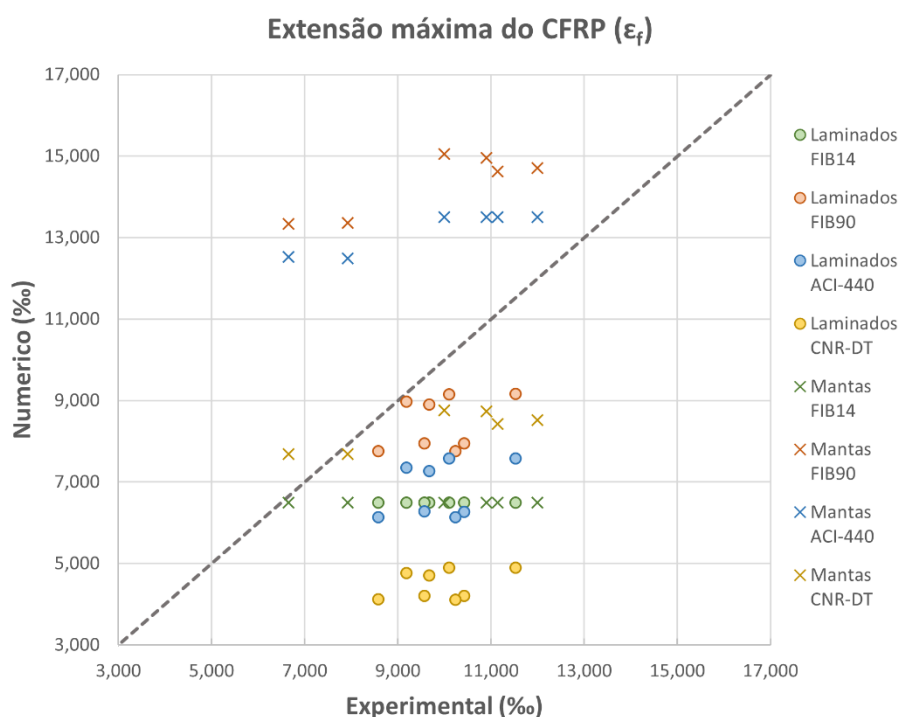


Fig. 3.5 - Comparação entre as extensões máximas experimentais e teóricas para as lajes analisadas.

3.4.3.2 Momento Resistente Máximo

A Fig. 3.6 apresenta a comparação entre os momentos resistentes experimentais e os valores previstos pelos diferentes documentos de dimensionamento para as lajes analisadas. Tal como observado anteriormente para as vigas, verifica-se que as diferenças entre regulamentos são menos pronunciadas do que aquelas observadas na estimativa da extensão máxima do CFRP, conduzindo a previsões de capacidade resistente relativamente mais próximas entre si.

O *Bulletin 14* conduz a um valor constante do momento resistente para todos os casos analisados, consequência direta da metodologia simplificada adotada pelo documento para a determinação da deformação limite do CFRP. Apesar da simplicidade desta abordagem, verifica-se uma subestimação generalizada da capacidade resistente experimental das lajes.

Os restantes regulamentos (*Bulletin 90*, *ACI 440.2R-17* e *CNR-DT 200 R1/2013*) apresentam uma maior sensibilidade às características dos elementos analisados, distinguindo claramente os casos reforçados com laminados dos reforçados com mantas CFRP. De um modo geral, os momentos resistentes previstos para as lajes reforçadas com mantas são superiores aos obtidos para as lajes reforçadas com laminados, acompanhando a tendência observada experimentalmente.

Analisando a distribuição dos resultados relativamente à reta de igualdade, verifica-se que nenhum dos regulamentos apresenta uma concordância perfeita com os resultados experimentais para a totalidade dos casos analisados. Contudo, observam-se diferenças relevantes na forma como cada documento estima a capacidade resistente das lajes reforçadas.

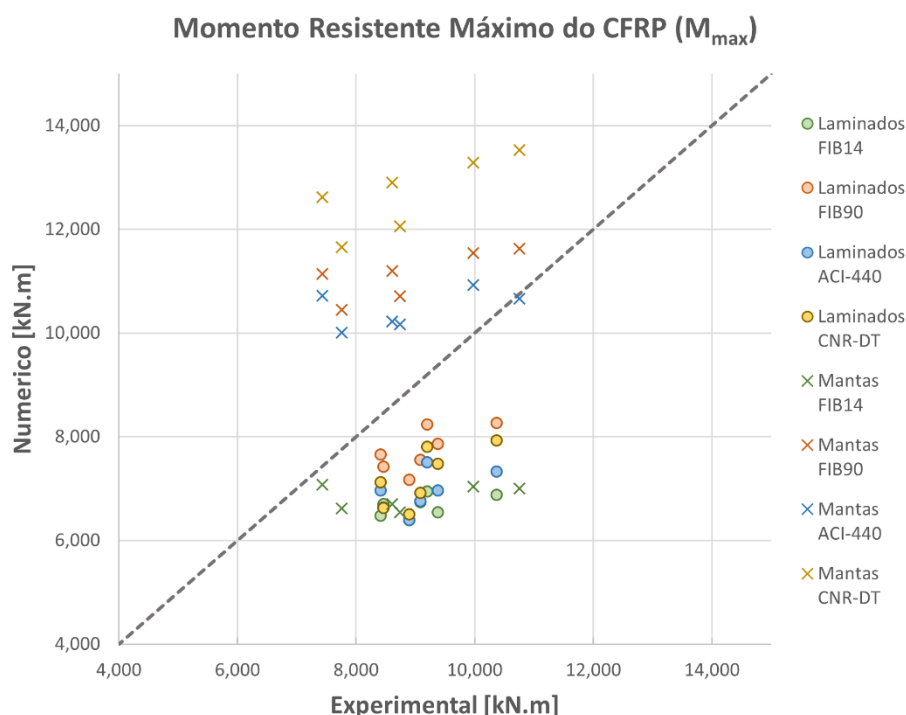


Fig. 3.6 - Comparação entre os momentos resistentes experimentais e os valores previstos pelos diferentes regulamentos para as lajes analisadas.

O *Bulletin 90* apresenta uma boa capacidade para reproduzir a variabilidade observada experimentalmente, distinguindo claramente os diferentes tipos de reforço considerados (laminados e mantas). No caso das mantas CFRP, verifica-se que os resultados se situam acima da reta de igualdade, evidenciando uma tendência para a sobrestimação da capacidade resistente. Embora esta característica contribua para uma maior proximidade global aos resultados experimentais, representa simultaneamente uma abordagem menos conservativa do ponto de vista do dimensionamento estrutural. No caso dos laminados verifica-se uma tendência para valores teóricos inferiores aos valores experimentais.

O *ACI 440.2R-17* apresenta um comportamento semelhante, distinguindo igualmente os elementos reforçados com laminados e mantas CFRP. Contudo, os desvios observados relativamente aos resultados experimentais tendem a ser inferiores aos verificados no *Bulletin 90*, conduzindo globalmente a uma distribuição mais equilibrada dos resultados em torno da reta de igualdade.

Por sua vez, o documento *CNR-DT 200 R1/2013* evidencia uma maior dispersão dos resultados obtidos. Verifica-se uma tendência para previsões conservativas nos casos reforçados com laminados CFRP, enquanto os elementos reforçados com mantas apresentam previsões relativamente mais elevadas. Apesar de apresentar alguns resultados próximos dos valores experimentais, a variabilidade observada é superior à dos restantes documentos, dificultando a identificação de uma tendência consistente.

De uma forma geral, verifica-se que a avaliação do desempenho dos regulamentos não deve basear-se exclusivamente na proximidade dos resultados à reta de igualdade. Para além da capacidade de reproduzir os valores experimentais, importa também analisar o carácter conservativo das previsões obtidas. Neste sentido, observou-se que alguns regulamentos conduzem a resultados mais próximos dos valores experimentais, enquanto outros tendem a fornecer previsões mais conservativas. Assim, a apreciação do desempenho de cada metodologia deve considerar simultaneamente a proximidade aos resultados experimentais e a posição relativa das previsões face à reta de igualdade.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS RELATIVAS À TÉCNICA EBR

Neste capítulo procedeu-se à aplicação dos diferentes modelos de dimensionamento a um conjunto de vigas e lajes reforçadas à flexão com CFRP através da técnica EBR, recorrendo posteriormente à comparação entre os resultados teóricos e os valores obtidos experimentalmente. A análise efetuada permitiu avaliar o desempenho dos diferentes documentos regulamentares na previsão da extensão máxima mobilizada no CFRP, da capacidade resistente dos elementos reforçados e dos mecanismos de rotura associados.

De uma forma geral, verificou-se que as maiores diferenças entre regulamentos ocorreram na estimativa da extensão máxima do CFRP. Tal resultado era expectável, uma vez que cada documento adota metodologias distintas para a determinação da deformação limite do reforço. Enquanto o *Bulletin 14* recorre a um valor recomendado constante, os restantes regulamentos estabelecem relações dependentes das características do elemento reforçado e das propriedades dos materiais envolvidos, conduzindo a previsões mais sensíveis às particularidades de cada caso de estudo.

Apesar destas diferenças, observou-se que os desvios entre regulamentos se tornam significativamente menos pronunciados quando se analisa o momento resistente. Tanto para as vigas como para as lajes, verificou-se que diferenças consideráveis na extensão prevista para o CFRP não se traduzem necessariamente em diferenças proporcionais na capacidade resistente estimada. Este comportamento resulta do facto de o momento resistente depender não apenas da deformação mobilizada no reforço, mas também do equilíbrio interno de forças e das restantes propriedades mecânicas da secção reforçada.

No que diz respeito ao tipo de elemento estrutural analisado, verificou-se que as lajes evidenciaram uma maior dispersão dos resultados quando comparadas com as vigas, particularmente na estimativa da extensão máxima do CFRP. Esta tendência permitiu identificar de forma mais clara as diferenças existentes entre os regulamentos, sobretudo no que respeita à forma como cada documento considera a deformação limite mobilizável no reforço. Nas vigas, embora também se observem diferenças relevantes entre modelos, os resultados apresentaram uma maior uniformidade global.

A distinção entre sistemas reforçados com laminados e com mantas CFRP revelou-se igualmente relevante. Os regulamentos *Bulletin 90* e o *ACI440.2R-17* demonstraram uma maior sensibilidade às características do sistema de reforço utilizado, distinguindo claramente os casos reforçados com laminados daqueles reforçados com mantas. Em contrapartida, o *Bulletin 14*, devido à sua abordagem simplificada, não reflete diretamente estas diferenças, conduzindo a previsões idênticas para elementos com características distintas. O *CNR-DT 200 R1/2013* apresenta um comportamento intermédio, evidenciando alguma capacidade de diferenciação entre sistemas de reforço. Contudo, para os casos reforçados com mantas CFRP, apesar de conduzir geralmente a previsões conservativas da deformação mobilizada no reforço, verifica-se uma sobrestimação da capacidade resistente, conduzindo a valores de momento resistente superiores aos observados experimentalmente.

Relativamente à comparação com os resultados experimentais, verificou-se que nenhum dos regulamentos analisados se destacou de forma inequívoca em todos os casos considerados. Cada documento apresenta vantagens e limitações próprias, evidenciando diferentes níveis de aproximação aos resultados experimentais e diferentes graus de conservadorismo. Desta forma, a avaliação do seu desempenho deve considerar simultaneamente a capacidade de reproduzir o comportamento observado nos ensaios e a segurança associada às previsões obtidas.

Globalmente, os resultados obtidos demonstram que os regulamentos analisados permitem reproduzir de forma satisfatória o comportamento resistente de elementos reforçados pela técnica EBR, embora apresentem diferenças relevantes na forma como estimam a deformação máxima mobilizável no CFRP. As observações efetuadas ao longo deste capítulo permitiram identificar as principais características, potencialidades e limitações associadas a cada modelo de dimensionamento quando aplicado a elementos reforçados pela técnica EBR.

Importa ainda salientar que a análise desenvolvida ao longo do presente capítulo teve como principal objetivo avaliar o desempenho intrínseco dos diferentes modelos de cálculo na previsão da deformação mobilizada no CFRP e da capacidade resistente dos elementos reforçados. Nesse sentido não foram consideradas as verificações específicas de destacamento do FRP recomendadas por alguns dos documentos regulamentares, tendo sido assumida uma perfeita aderência entre os materiais ao longo de toda a análise. Estas simplificações permitiram estabelecer uma comparação direta entre os diferentes modelos e os resultados experimentais, não correspondendo, contudo, à aplicação integral dos regulamentos em contexto de dimensionamento de estruturas reais.

4

APLICAÇÃO DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO À TÉCNICA NSM

4.1 INTRODUÇÃO

Após a apresentação dos diferentes modelos de dimensionamento aplicáveis ao reforço à flexão com sistemas CFRP instalados segundo a técnica NSM, procede-se neste capítulo à sua aplicação a um conjunto de resultados experimentais disponíveis na literatura.

O principal objetivo consiste em avaliar a capacidade dos diferentes regulamentos para prever a deformação mobilizada no CFRP, a capacidade resistente à flexão dos elementos reforçados e o modo de ruína, comparando os resultados teóricos obtidos com os valores experimentais observados nos ensaios. Para tal, serão aplicadas as metodologias propostas pelo *Bulletin 90* da fib [3] e pelo *ACI 440.2R-17* [4] aos diferentes casos de estudo considerados.

À semelhança do capítulo anterior, os documentos analisados foram originalmente desenvolvidos para fins de dimensionamento, recorrendo a coeficientes parciais de segurança e a valores característicos ou de cálculo das propriedades dos materiais. Contudo, uma vez que o objetivo da presente dissertação consiste na comparação entre previsões teóricas e resultados experimentais obtidos em ensaios laboratoriais, optou-se por, sempre que possível, adotar coeficientes parciais de segurança com valor unitário e utilizar os valores médios das propriedades dos materiais disponibilizados pelos ensaios experimentais. Esta abordagem permitiu reduzir a influência das margens de segurança inerentes aos regulamentos, conduzindo a uma comparação mais direta entre os valores previstos pelos modelos e os resultados experimentais. Importa salientar que estas adaptações tiveram como único objetivo permitir uma avaliação mais adequada do desempenho dos modelos de cálculo, não correspondendo à

aplicação dos regulamentos para fins de dimensionamento em contexto de projeto. Os valores recomendados pelos diferentes documentos normativos e os valores efetivamente adotados na presente análise encontram-se resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores recomendados para os coeficientes pelos regulamentos e valores adotados na presente análise para a técnica NSM.

Documento	Parâmetro	Valor Proposto	Valor Utilizado
Bulletin 90	γ_{fb}	1,5	1,0
	k_{cr}	1,8 - 2,1	2,1
	k	0,17 - 0,25	0,25
ACI 440.2R-17	ψ_f	0,85	1,0
	ϕ	Calculado	1,0

4.2 BASE DE DADOS EXPERIMENTAL

A base de dados experimental utilizada é constituída por ensaios realizados sobre vigas e lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados CFRP instalados segundo a técnica NSM. No total, foram analisados 13 elementos estruturais, dos quais 9 correspondem a vigas e 4 a lajes. Os casos de estudo considerados foram obtidos a partir dos trabalhos de Canário [7], Dias et al. [11], Hosseini et al. [12] e Kotynia [13].

4.2.1 VIGAS DE BETÃO ARMADO

Os casos de estudo relativos às vigas reforçadas segundo a técnica NSM apresentam diferentes geometrias, disposições de armadura e configurações de reforço, permitindo abranger um conjunto diversificado de situações experimentais.

A Fig. 4.1 apresenta uma representação esquemática da secção transversal de uma viga reforçada à flexão com laminados CFRP instalados segundo a técnica NSM, identificando os principais parâmetros geométricos, de armadura e de reforço utilizados ao longo do presente estudo. As características específicas e respetivas referências dos diferentes casos de estudo estão resumidas nas Tabelas 4.2 a 4.5.

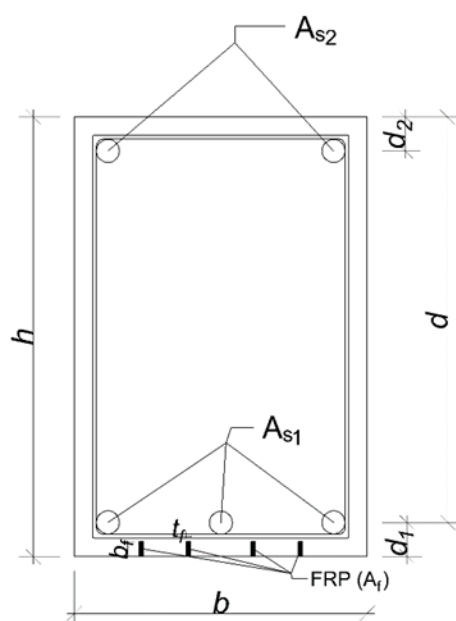


Fig. 4.1 - Geometria da secção transversal e definição dos parâmetros geométricos, das armaduras longitudinais e do reforço CFRP adotados na caracterização das vigas reforçadas segundo a técnica NSM.

Tabela 4.2 - Identificação dos casos de estudo considerados na análise das vigas reforçadas segundo a técnica NSM.

Modelos	CFRP	Séries		
		Ref.	Total	Documento
Vigas	Laminados	CASO 1, CASO 2	2	[7]
		S1L, S2L, S3L	3	[11]
		A2, A4, B2, B4	4	[13]

Tabela 4.3 - Características geométricas e propriedades mecânicas do betão das vigas consideradas (adaptado de [7][11][13]).

Casos de Estudo	b [mm]	h [mm]	d [mm]	d1 [mm]	d2 [mm]	f _{cm} [MPa]	f _{ctm} [MPa]	E _c [GPa]
CASO 1	150	300	280	20,0	20,0	50,2	4,08	30
CASO 2	200	300	280	20,0	20,0	53,1	4,24	31,17
S1L	150	300	275	25	24,0	50,2	4,1	35,7
S2L	150	300	275	25	24,0	50,2	4,1	35,7
S3L	150	300	275	25	24,0	50,2	4,1	35,7
A2	180	360	315	45,0	25,0	24,2	2,0	19,2
A4	180	360	315	45,0	25,0	24,8	2,1	20,0
B2	180	340	315	25,0	25,0	26,5	2,2	21,8
B4	180	340	315	25,0	25,0	26,1	2,1	21,3

Tabela 4.4 - Características mecânicas das armaduras longitudinais das vigas consideradas (adaptado de [7][11][13]).

Casos de Estudo	Armadura Inferior			Armadura Superior		
	As1 [cm ²]	f _{sym} [MPa]	E _s [GPa]	As2 [cm ²]	f _{sym} [MPa]	E _s [GPa]
CASO 1	1,5700	534,5	210	1,0100	534,5	210,0
CASO 2	2,3560	465,8	200,3	1,5708	465,8	200,3
S1L	1,5708	566,7	200,0	1,0053	534,5	200,0
S2L	1,5708	566,7	200,0	1,0053	534,5	200,0
S3L	1,5708	566,7	200,0	1,0053	534,5	200,0
A2	1,5708	530,0	204,0	1,5708	530,0	204,0
A4	1,5708	530,0	204,0	1,5708	530,0	204,0
B2	1,5708	530,0	204,0	1,5708	530,0	204,0
B4	1,5708	530,0	204,0	1,5708	530,0	204,0

Tabela 4.5 - Propriedades geométricas e mecânicas dos sistemas CFRP utilizados nas vigas consideradas (adaptado de [7][11][13]).

Casos de Estudo	b _f [mm]	e _f equiv. [mm]	A _f total [cm ²]	ε _{fum} [%]	E _{fm} [GPa]	Referência
CASO 1	10	1,4	0,280	18,10	175,0	CFK 150/2000 S&P (2 faixas)
CASO 2	15	1,4	0,846	15,40	158,0	CFK 150/2000 S&P (4 faixas)
S1L	10	1,4	0,140	18,00	175,00	CFK 150/2000 S&P (1 faixa)
S2L	10	1,4	0,280	18,00	175,00	CFK 150/2000 S&P (2 faixas)
S3L	10	1,4	0,420	18,00	175,00	CFK 150/2000 S&P (3 faixas)
A2	25	1,2	0,600	17,00	172,00	Sika Carbodur S512 (2 laminados)
A4	25	1,2	1,200	17,00	172,00	Sika Carbodur S512 (4 laminados)
B2	25	1,2	0,600	17,00	172,00	Sika Carbodur S512 (2 laminados)
B4	25	1,2	1,200	17,00	172,00	Sika Carbodur S512 (4 laminados)

4.2.2 LAJES DE BETÃO ARMADO

Os casos de estudo relativos às lajes reforçadas segundo a técnica NSM apresentam diferentes configurações de reforço e características mecânicas, permitindo avaliar o desempenho dos modelos de dimensionamento sob distintas condições experimentais.

A Fig. 4.2 apresenta uma representação esquemática da secção transversal de uma laje reforçada à flexão com laminados CFRP instalados segundo a técnica NSM, identificando os principais parâmetros geométricos, de armadura e de reforço utilizados ao longo do presente estudo. As características específicas e respetivas referências dos diferentes casos de estudo estão resumidas nas Tabelas 4.6 a 4.9.

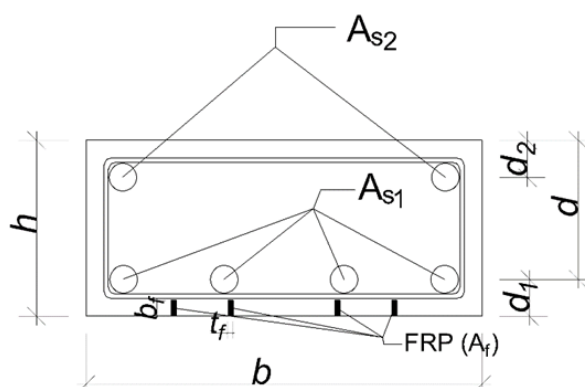


Fig. 4.2 - Geometria da secção transversal e definição dos parâmetros geométricos, das armaduras longitudinais e do reforço CFRP adotados na caracterização das lajes reforçadas segundo a técnica NSM.

Tabela 4.6 - Identificação dos casos de estudo considerados na análise das lajes reforçadas segundo a técnica NSM.

Modelos	CFRP	Séries		
		Ref.	Total	Documento
Lajes	Laminados	CASO 3	1	[7]
		A-S0, B-S0, C-S0	3	[12]

Tabela 4.7 - Características geométricas e propriedades mecânicas do betão das lajes consideradas (adaptado de [7][12]).

Casos de Estudo	b [mm]	h [mm]	d [mm]	d1 [mm]	d2 [mm]	f _{cm} [MPa]	f _{ctm} [MPa]	E _c [GPa]
CASO 3	250	110	90	20	20,0	29,5	1,7	30
Laminados A-S0	600	120	89	31	20,0	39,5	3,5	32,6
B-S0	600	120	89	31	20,0	15,0	1,8	25,0
C-S0	600	120	89	31	20,0	39,5	3,5	32,6

Tabela 4.8 - Características mecânicas das armaduras longitudinais das lajes consideradas (adaptado de [7][12]).

Casos de Estudo	Armadura Inferior			Armadura Superior		
	As1 [cm2]	f _{sym} [MPa]	E _s [GPa]	As2 [cm2]	f _{sym} [MPa]	E _s [GPa]
CASO 3	0,8500	594,0	201,9	0,8500	594,0	201,9
Laminados A-S0	2,0106	556,0	200,0	0,8482	528,0	200,0
B-S0	2,0106	556,0	200,0	0,8482	528,0	200,0
C-S0	3,1416	548,0	200,0	0,8482	528,0	200,0

Tabela 4.9 - Propriedades geométricas e mecânicas dos sistemas CFRP utilizados nas lajes consideradas (adaptado de [7][12]).

Casos de Estudo	b _f [mm]	e _f equiv. [mm]	A _f total [cm2]	ε _{fum} [%]	E _{fm} [GPa]	Referência
CASO 3	10	1,4	0,2800	17,00	168,0	CFK 150/2000 S&P (2 faixas)
Laminados A-S0	20	1,4	0,5600	15,80	176,0	CFK 150/2000 S&P (2 faixas)
B-S0	20	1,4	0,5600	15,80	176,0	CFK 150/2000 S&P (2 faixas)
C-S0	20	1,4	0,5600	15,80	176,0	CFK 150/2000 S&P (2 faixas)

4.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS ÀS VIGAS

Os modelos de dimensionamento apresentados no Capítulo 2 para a técnica NSM foram aplicados aos casos de estudo descritos na secção anterior, com o objetivo de determinar a extensão mobilizada nos laminados CFRP, o momento resistente último e o modo de ruína previsto por cada documento normativo. (Ver Anexo B.1)

Os cálculos foram implementados em folhas de cálculo desenvolvidas para o efeito, permitindo automatizar o processo iterativo associado à determinação do estado de deformação da secção e à identificação do modo de rotura governante previsto por cada modelo.

Os resultados obtidos foram posteriormente comparados com os valores experimentais, de forma a avaliar a capacidade de cada modelo em reproduzir o comportamento dos elementos reforçados segundo a técnica NSM.

4.3.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS VIGAS

Antes da aplicação dos modelos de dimensionamento, apresentam-se os resultados experimentais correspondentes às vigas consideradas na análise. Estes valores constituem a referência para a posterior comparação com os valores teóricos obtidos através dos diferentes regulamentos. Para cada ensaio, na Tabela 4.10, são indicados a extensão máxima registada no laminado CFRP, o momento resistente máximo e o respetivo modo de rotura.

Tabela 4.10 - Resultados experimentais para os casos de Vigas (adaptado de [7][11][13]).

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
CASO 1	17,40	50,355	Destacamento CFRP	
CASO 2	9,76	66,285	Destacamento CFRP	
Laminados	S1L	17,90	39,780	Ruina do FRP + Aço em cedência
	S2L	17,40	50,360	Destacamento FRP + Aço em cedência
	S3L	14,90	56,970	Destacamento FRP + Aço em cedência
	A2	12,44	67,200	Destacamento FRP + Aço em cedência
	A4	9,12	91,000	Destacamento FRP + Aço em cedência
	B2	13,66	67,200	Destacamento FRP + Aço em cedência
	B4	11,12	91,000	Destacamento FRP + Aço em cedência

Observa-se que o mecanismo de rotura predominante em todos os casos de estudo está associado ao destacamento do reforço CFRP. Em vários ensaios, este fenómeno ocorreu após a cedência das armaduras longitudinais, evidenciando uma mobilização significativa da capacidade resistente da secção antes da perda de aderência do sistema de reforço.

Os resultados sugerem que, para as vigas analisadas, o comportamento último é fortemente condicionado pelos mecanismos de ancoragem e transferência de esforços entre o laminado CFRP e o betão envolvente.

4.3.2 RESULTADOS OBTIDOS PELOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

Nas Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam-se os resultados obtidos através da aplicação das metodologias propostas pelo *Bulletin 90* [3] e pelo *ACI 440.2R-17* [4] aos casos de estudo considerados. Para cada elemento, à semelhança dos dados experimentais, são indicadas a extensão máxima mobilizada no laminado CFRP, o momento resistente previsto e o respetivo modo de rotura.

Tabela 4.11 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento *Bulletin 90*.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura
CASO 1	14,47	42,484	Destacamento CFRP
CASO 2	12,33	74,584	Destacamento CFRP
S1L	14,47	32,158	Destacamento CFRP
S2L	14,47	41,883	Destacamento CFRP
S3L	14,47	51,474	Destacamento CFRP
A2	13,59	69,498	Destacamento CFRP
A4	11,91	104,219	Esmagamento do betão
B2	13,59	69,739	Destacamento CFRP
B4	12,24	106,632	Esmagamento do betão

Tabela 4.12 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento *ACI-440.2R-17*.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura
CASO 1	12,67	40,594	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
CASO 2	10,78	70,384	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
S1L	12,60	32,618	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
S2L	12,60	41,226	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
S3L	12,60	49,686	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
A2	11,90	64,701	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
A4	9,48	86,439	Esmagamento c/armaduras em cedência
B2	11,90	65,199	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
B4	9,82	88,955	Esmagamento c/armaduras em cedência

Da observação das tabelas anteriores verifica-se que os dois modelos de dimensionamento conduzem a previsões distintas da extensão mobilizada no laminado CFRP e da capacidade resistente das vigas. Estas diferenças resultam essencialmente dos critérios adotados por cada regulamento para a determinação da deformação limite do reforço e para a avaliação dos mecanismos de rotura associados ao comportamento da secção reforçada.

Verifica-se ainda que ambos os regulamentos preveem predominantemente roturas associadas ao destacamento do CFRP, embora para alguns casos de estudo com maiores níveis de reforço (A4 e B4) seja prevista a ocorrência de esmagamento do betão.

4.3.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

À semelhança do efetuado para a técnica EBR, a avaliação do desempenho dos modelos de dimensionamento foi realizada através da comparação entre os resultados teóricos e os valores experimentais obtidos para as vigas analisadas. Esta comparação foi efetuada recorrendo à representação gráfica da relação entre os valores previstos pelos regulamentos e os correspondentes resultados experimentais.

4.3.3.1 Extensão Máxima do CFRP

A Fig. 4.3 apresenta a comparação entre as extensões máximas previstas pelos modelos de dimensionamento e os valores observados experimentalmente para as vigas reforçadas segundo a técnica NSM. Verifica-se que os dois regulamentos reproduzem de forma distinta os resultados experimentais, sendo possível identificar diferenças tanto na proximidade à reta de referência como na capacidade de acompanhar a variação das extensões observadas nos diferentes casos de estudo.

O *Bulletin 90*, por impor uma deformação máxima de 80%, evidencia uma aproximação globalmente satisfatória aos resultados experimentais, apresentando previsões distribuídas em torno da reta de referência. Para os casos com menores extensões experimentais observa-se uma tendência para a sobrestimação da deformação mobilizada, enquanto para os valores experimentais mais elevados se verifica uma tendência inversa. Ainda assim, o regulamento apresenta uma boa capacidade para reproduzir os resultados experimentais em diversos casos

de estudo, destacando-se particularmente os casos A2, B2 e S3L, para os quais se observa uma maior proximidade à reta de igualdade.

O documento *ACI 440.2R-17* apresenta um comportamento semelhante, mas conduz, de um modo geral, a extensões inferiores às previstas pelo *Bulletin 90*. Esta diferença torna-se particularmente evidente nos casos correspondentes às maiores extensões experimentais, para os quais o regulamento evidencia uma maior tendência conservativa. Este comportamento pode ser justificado pelo critério de limitação da deformação mobilizável no FRP adotado pelo documento, que impõe que o destacamento do reforço ocorra para 70% da deformação última do material. Apesar deste conservadorismo, observam-se boas aproximações aos resultados experimentais nos casos A2, A4, B2 e B4.

De forma geral, ambos os modelos conseguem reproduzir a ordem de grandeza das extensões observadas experimentalmente. O *Bulletin 90* apresenta uma melhor capacidade para acompanhar a dispersão dos resultados experimentais, enquanto o *ACI 440.2R-17* conduz sistematicamente a previsões mais conservativas, particularmente para os casos com maiores extensões mobilizadas no CFRP.

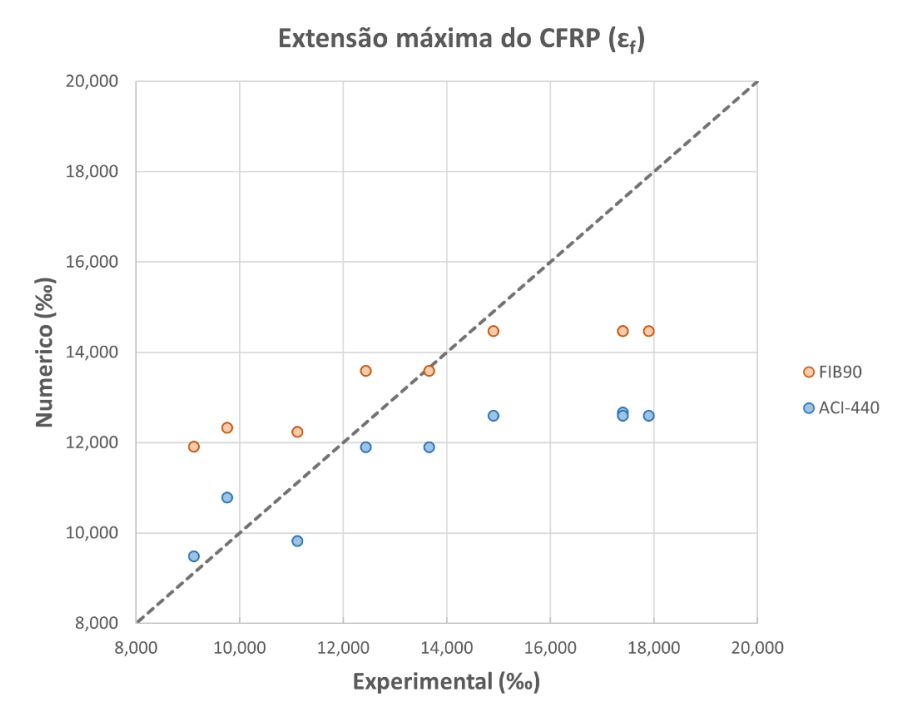


Fig. 4.3 - Comparação entre as extensões máximas experimentais e teóricas para as vigas analisadas.

4.3.3.2 Momento Resistente Máximo

A Fig. 4.4 apresenta a comparação entre os momentos resistentes previstos pelos modelos de dimensionamento e os valores observados experimentalmente para as vigas reforçadas segundo a técnica NSM. Verifica-se que ambos os regulamentos conseguem reproduzir de forma satisfatória a tendência geral dos resultados experimentais, observando-se uma distribuição dos pontos relativamente próxima da reta de referência.

O *Bulletin 90* evidencia uma boa aproximação aos resultados experimentais para a maioria dos casos analisados, apresentando previsões próximas da reta de referência. Contudo, nos casos correspondentes aos maiores momentos resistentes experimentais observa-se uma tendência para a sobrestimação da capacidade resistente, conduzindo a previsões superiores aos valores observados nos ensaios.

O documento *ACI 440.2R-17* apresenta igualmente uma aproximação satisfatória aos resultados experimentais, evidenciando uma tendência globalmente conservativa na estimativa da capacidade resistente. Apesar de conduzir, de forma geral, a previsões ligeiramente inferiores às obtidas pelo *Bulletin 90*, os resultados revelam uma boa concordância com os valores experimentais, sugerindo uma calibração adequada do modelo para a previsão do momento resistente. Esta tendência torna-se particularmente evidente nos casos associados aos maiores níveis de capacidade resistente, para os quais as previsões permanecem próximas dos resultados experimentais, mantendo simultaneamente um posicionamento favorável do ponto de vista da segurança.

Comparativamente ao observado para a extensão máxima do CFRP, verifica-se uma maior proximidade entre os resultados teóricos e experimentais quando se analisa o momento resistente. Tal comportamento sugere que as diferenças verificadas na previsão da deformação mobilizada no reforço não se refletem de forma proporcional na estimativa da capacidade resistente da secção, conduzindo a resultados globalmente mais próximos entre os diferentes modelos.

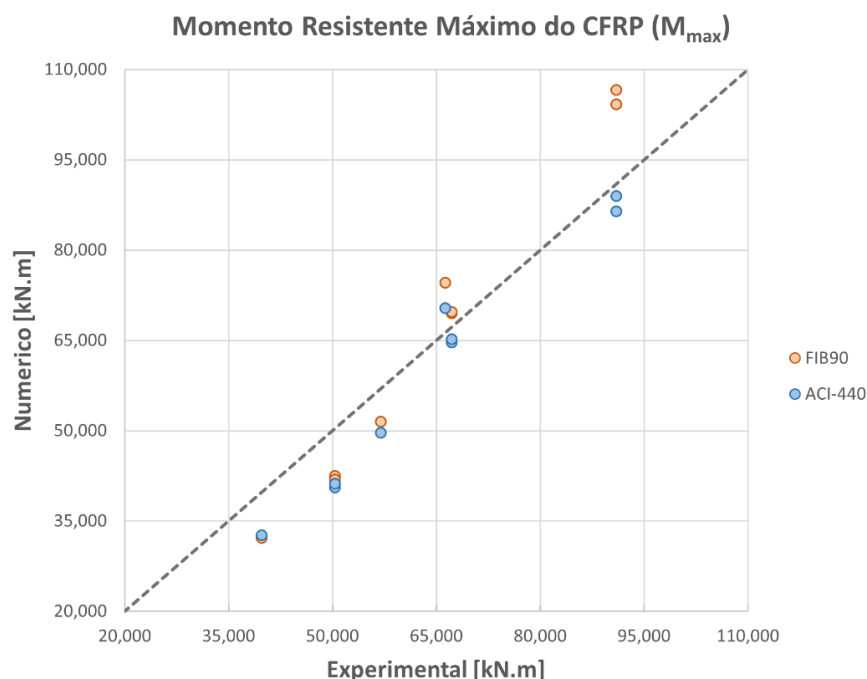


Fig. 4.4 - Comparação entre os momentos resistentes experimentais e os valores previstos pelos diferentes regulamentos para as vigas analisadas.

4.4 APLICAÇÃO DOS MODELOS ÀS LAJES

À semelhança do realizado para as vigas, os modelos de dimensionamento apresentados no Capítulo 2 para a técnica NSM foram aplicados aos casos de estudo relativos às lajes reforçadas. Os cálculos foram implementados em folhas de cálculo desenvolvidas para o efeito, permitindo automatizar o processo iterativo associado à determinação do estado de deformação da secção e à identificação do mecanismo de rotura previsto por cada modelo. (Ver Anexo B.2)

4.4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS LAJES

Antes da aplicação dos modelos de dimensionamento, apresentam-se os resultados experimentais correspondentes às lajes consideradas na análise. Estes valores constituem a referência para a posterior comparação com os resultados teóricos obtidos através dos diferentes regulamentos. Para cada ensaio, na Tabela 4.13, são indicados a extensão máxima registada no laminado CFRP, o momento resistente máximo e o respetivo modo de rotura.

Tabela 4.13 - Resultados experimentais para os casos de Lajes (adaptado de [7][12]).

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	CASO 3	11,60	10,763	Destacamento CFRP
	A-S0	15,10	27,320	Ruina do FRP + Aço em cedência
	B-S0	14,60	23,000	Ruina do FRP + Aço em cedência
	C-S0	15,00	32,000	Ruina do FRP + Aço em cedência

Verifica-se uma variabilidade significativa nos resultados experimentais das lajes analisadas, quer ao nível da extensão máxima mobilizada no CFRP, quer da capacidade resistente alcançada. Esta variabilidade constitui um aspeto relevante para a avaliação da capacidade dos modelos de dimensionamento de reproduzir o comportamento observado experimentalmente.

4.4.2 RESULTADOS OBTIDOS PELOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

Nas Tabelas 4.14 a 4.15 apresentam-se os resultados obtidos através da aplicação das metodologias propostas pelo *Bulletin 90* [3] e pelo *ACI 440.2R-17* [4] aos casos de estudo considerados. Para cada elemento, à semelhança dos dados experimentais, são indicadas a extensão máxima mobilizada no laminado CFRP, o momento resistente previsto e o respetivo modo de rotura.

Tabela 4.14 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento *Bulletin 90*.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	CASO 3	13,57	10,165	Destacamento CFRP
	A-S0	12,59	22,145	Destacamento CFRP
	B-S0	9,59	18,078	Esmagamento do betão
	C-S0	12,59	26,542	Destacamento CFRP

Tabela 4.15 - Extensão máxima do sistema CFRP, Momento resistente de cálculo e modo de rotura associado para o Documento *ACI-440.2R-17*.

Caso de Estudo	ϵ_f (‰)	Mmax [kN.m]	Modo de Rotura	
Laminados	CASO 3	11,90	9,798	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	A-S0	11,06	21,820	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência
	B-S0	8,79	17,776	Esmagamento do betão c/armaduras em cedência
	C-S0	11,06	26,441	Destacamento CFRP c/armaduras em cedência

Da observação das tabelas anteriores verifica-se que os dois modelos de dimensionamento conduzem a previsões distintas da extensão mobilizada no laminado CFRP e da capacidade resistente das lajes analisadas. Estas diferenças resultam essencialmente dos critérios adotados por cada regulamento para a determinação da deformação limite do reforço e para a avaliação dos mecanismos de rotura associados ao comportamento da secção reforçada.

Verifica-se ainda que o *Bulletin 90* conduz sistematicamente a valores superiores de extensão máxima do CFRP e de momento resistente quando comparado com o *ACI 440.2R-17*. Relativamente aos modos de rotura, ambos os regulamentos apontam predominantemente para mecanismos associados ao destacamento do reforço, prevendo simultaneamente o esmagamento do betão para o caso B-S0. Apesar das diferenças observadas entre as previsões dos dois documentos, ambos conduzem a estimativas inferiores aos valores experimentais para a generalidade dos casos analisados, evidenciando uma abordagem globalmente conservativa na avaliação da capacidade resistente das lajes reforçadas.

4.4.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

À semelhança da análise realizada para as vigas, procedeu-se à comparação entre os resultados teóricos e os valores experimentais obtidos para as lajes reforçadas segundo a técnica NSM. Para tal, recorreu-se à representação gráfica da relação entre os valores previstos pelos diferentes regulamentos e os correspondentes resultados observados experimentalmente.

4.4.3.1 Extensão Máxima do CFRP

A Fig. 4.5 apresenta a comparação entre as extensões máximas previstas pelos modelos de dimensionamento e os valores observados experimentalmente para as lajes reforçadas segundo a técnica NSM. Verifica-se que ambos os regulamentos representam de forma distinta os resultados experimentais, sendo possível identificar diferenças tanto na proximidade à reta de referência como na estimativa da deformação mobilizada no CFRP.

O *Bulletin 90* apresenta, globalmente, uma maior aproximação aos resultados experimentais, embora evidencie comportamentos distintos consoante o caso analisado. Para o Caso 3 observa-se uma sobrestimação da deformação mobilizada no CFRP, enquanto para os casos A-S0, B-S0 e C-S0 as extensões previstas são inferiores às observadas experimentalmente. Importa, contudo, destacar o caso B-S0, para o qual o regulamento prevê o esmagamento do betão como mecanismo de rotura. Esta previsão poderá justificar o maior afastamento relativamente aos resultados experimentais, nos quais se verificou rotura por destacamento do reforço.

Por sua vez, o documento *ACI 440.2R-17* conduz sistematicamente a previsões mais conservativas, apresentando valores inferiores aos obtidos pelo *Bulletin 90* em todos os casos analisados. Apesar disso, ambos os regulamentos reproduzem tendências semelhantes, evidenciando uma redução da deformação mobilizável no CFRP para os casos A-S0, B-S0 e C-S0 relativamente aos valores observados experimentalmente. Esta diferença reflete a abordagem mais conservativa adotada pelo *ACI 440.2R-17* na limitação da deformação máxima mobilizável no reforço.

A influência do modo de rotura previsto pelos regulamentos torna-se particularmente evidente no caso B-S0. Para este elemento, ambos os documentos preveem o esmagamento do betão como mecanismo de rotura, ao contrário do observado experimentalmente, onde ocorreu destacamento do reforço. Este mecanismo limita a extensão mobilizável no CFRP e poderá justificar o maior afastamento entre as previsões regulamentares e o resultado experimental observado para este caso de estudo.

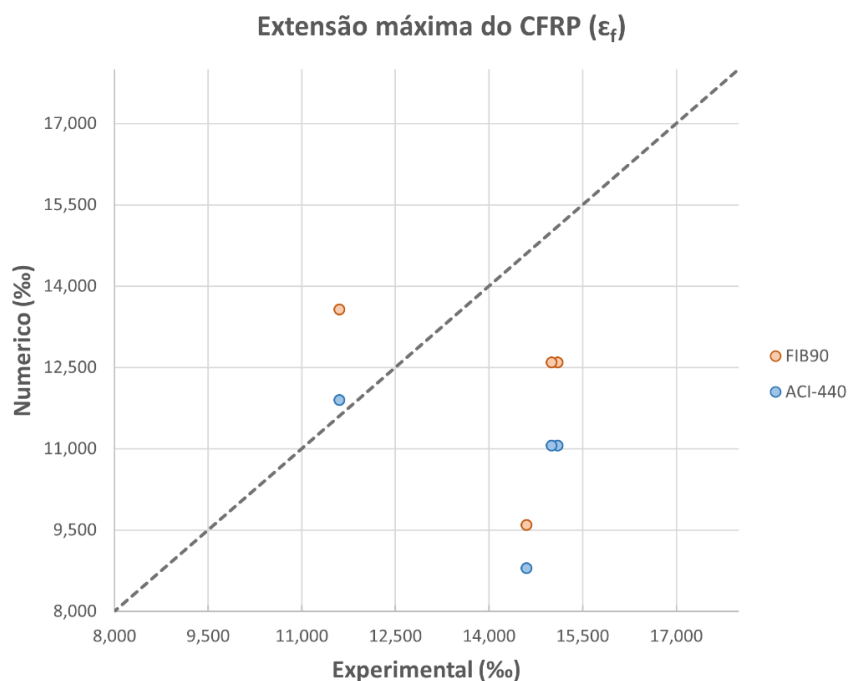


Fig. 4.5 - Comparação entre as extensões máximas experimentais e teóricas para as lajes analisadas.

4.4.3.2 Momento Resistente Máximo

A Fig. 4.6 apresenta a comparação entre os momentos resistentes previstos pelos modelos de dimensionamento e os valores observados experimentalmente para as lajes reforçadas segundo a técnica NSM. Verifica-se que ambos os regulamentos conduzem a previsões globalmente conservativas da capacidade resistente, apresentando valores inferiores aos resultados experimentais para a generalidade dos casos analisados. Esta tendência é mais evidente nos casos A-S0, B-S0 e C-S0, correspondentes aos maiores níveis de capacidade resistente experimental.

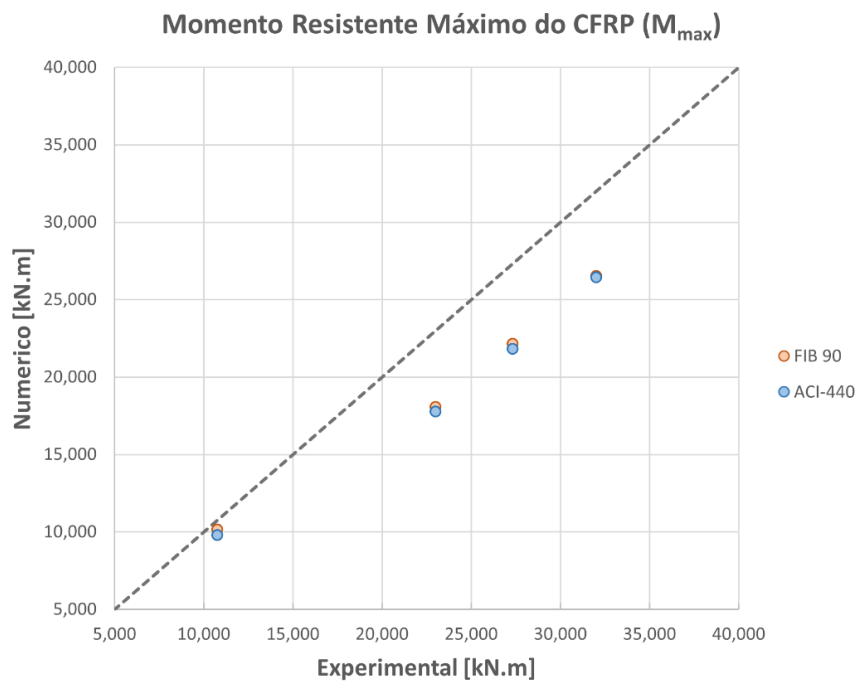


Fig. 4.6 - Comparação entre os momentos resistentes experimentais e os valores previstos pelos diferentes regulamentos para as lajes analisadas.

Observa-se uma elevada proximidade entre as previsões do *Bulletin 90* e do *ACI 440.2R-17*, verificando-se apenas diferenças reduzidas entre os valores obtidos pelos dois regulamentos. O *Bulletin 90* conduz sistematicamente a previsões ligeiramente superiores às do *ACI 440.2R-17*, mas ambos reproduzem de forma semelhante a tendência observada experimentalmente.

A melhor aproximação aos resultados experimentais verifica-se no Caso 3, para o qual os dois regulamentos apresentam previsões muito próximas do valor observado. Nos restantes casos, embora se mantenha uma tendência conservativa, a proximidade entre as previsões dos dois documentos sugere que as diferenças observadas na estimativa da deformação mobilizada no CFRP não se refletem de forma significativa na previsão da capacidade resistente das lajes analisadas.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS RELATIVAS À TÉCNICA NSM

A aplicação dos modelos de dimensionamento propostos pelo *Bulletin 90* e pelo *ACI 440.2R-17* aos casos de estudo reforçados segundo a técnica NSM permitiu avaliar a capacidade destes documentos em reproduzir o comportamento observado experimentalmente, quer ao nível da deformação mobilizada nos laminados CFRP quer da capacidade resistente dos elementos analisados.

Relativamente à previsão da extensão máxima do CFRP, verificou-se que o *Bulletin 90* conduziu, de um modo geral, a previsões mais próximas dos resultados experimentais. Por sua vez, o *ACI 440.2R-17* apresentou uma tendência mais conservativas, limitando a deformação mobilizada no reforço e conduzindo frequentemente a valores inferiores aos observados experimentalmente. Esta diferença encontra-se associada aos critérios adotados por cada regulamento para a limitação da deformação máxima mobilizável no CFRP, sendo esta limitada a aproximadamente 80% da deformação última no *Bulletin 90* e a 70% no *ACI 440.2R-17*.

No que diz respeito ao momento resistente, ambos os regulamentos revelaram uma capacidade globalmente satisfatória para reproduzir a tendência dos resultados experimentais, observando-se, contudo, diferenças na proximidade às capacidades resistentes medidas nos ensaios. De forma geral, o *Bulletin 90* apresentou resultados ligeiramente mais próximos dos valores experimentais, enquanto o *ACI 440.2R-17* manteve uma abordagem mais conservativa. Verificou-se ainda que as diferenças observadas na previsão da extensão mobilizada no CFRP nem sempre se refletiram de forma proporcional na estimativa do momento resistente, conduzindo a resultados globalmente mais próximos entre os dois modelos quando analisada a capacidade resistente dos elementos.

A comparação entre vigas e lajes evidencia diferenças na resposta dos modelos de dimensionamento para os diferentes tipos de elementos estruturais. Nas lajes analisadas observou-se uma tendência mais consistente para previsões inferiores aos valores experimentais, enquanto nas vigas se verificou uma distribuição mais equilibrada dos resultados em torno da reta de referência. Estas diferenças sugerem que a resposta dos modelos é influenciada não apenas pelas propriedades dos materiais e do reforço, mas também pelas características geométricas e mecânicas dos elementos analisados.

Relativamente aos modos de rotura, verificou-se que as previsões dos regulamentos influenciam diretamente os valores de deformação e capacidade resistente obtidos. Destaca-se o caso B-S0, para o qual ambos os regulamentos preveem o esmagamento do betão como mecanismo de rotura. A limitação da capacidade resistente associada a este mecanismo conduz a previsões mais próximas entre os dois documentos, evidenciando a influência da definição do modo de rotura na resposta final dos modelos.

Em termos globais, o *Bulletin 90* apresentou uma aproximação geralmente mais próxima dos resultados experimentais, particularmente na previsão da deformação mobilizada no CFRP. Por sua vez, o *ACI 440.2R-17* evidenciou uma abordagem tendencialmente mais conservativa, conduzindo frequentemente a previsões inferiores às observadas experimentalmente.

Importa ainda salientar que a análise apresentada neste capítulo teve como principal objetivo avaliar o desempenho dos modelos de cálculo na previsão da deformação mobilizada no CFRP e da capacidade resistente dos elementos reforçados segundo a técnica NSM. Para esse efeito, foram adotados coeficientes parciais de segurança unitários e utilizados, sempre que possível, os valores médios das propriedades dos materiais disponibilizados pelos programas experimentais, reduzindo a influência dos fatores de segurança e dos valores característicos habitualmente considerados em contexto de dimensionamento.

Adicionalmente, foi assumida uma perfeita aderência entre os materiais ao longo de toda a análise. Estas simplificações permitiram estabelecer uma comparação mais direta entre as previsões dos modelos e os resultados experimentais, não correspondendo, contudo, à aplicação integral dos documentos regulamentares em contexto de projeto.

5

CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

A presente dissertação teve como principal objetivo analisar e comparar diferentes modelos de dimensionamento aplicáveis ao reforço à flexão de elementos de betão armado com sistemas CFRP, recorrendo às técnicas EBR e NSM. Foram analisadas as metodologias propostas pelos documentos *Bulletin 14*, *Bulletin 90*, *ACI 440.2R-17* e *CNR-DT 200 R1/2013* para a técnica EBR, e pelos documentos *Bulletin 90* e *ACI 440.2R-17* para a técnica NSM. O estudo incidiu na avaliação da capacidade resistente à flexão, da deformação mobilizada no CFRP e dos modos de rotura previstos, recorrendo à comparação com resultados experimentais.

Da análise efetuada verificou-se que todos os regulamentos considerados assentam nos mesmos princípios fundamentais da teoria da flexão de secções de betão armado, baseando-se na compatibilidade de deformações, no equilíbrio interno de forças e no comportamento linear elástico do CFRP até à rotura. As principais diferenças entre metodologias resultam da forma como é determinada a deformação máxima mobilizável no CFRP e da consideração dos mecanismos de destacamento do reforço, aspeto identificado desde a análise teórica dos regulamentos.

Um dos aspetos mais relevantes observados ao longo deste trabalho foi o facto de diferenças significativas na deformação mobilizada no CFRP não conduzirem necessariamente a diferenças igualmente significativas na capacidade resistente prevista. Embora a determinação da extensão limite do CFRP constitua o principal elemento diferenciador entre regulamentos, os resultados demonstram que a influência deste parâmetro no momento resistente é menos expressiva do que poderia ser inicialmente esperado.

No caso da técnica EBR, verificou-se que os regulamentos que incorporam modelos explícitos de aderência e destacamento, nomeadamente o *Bulletin 90* e o *ACI 440.2R-17*, apresentam uma maior capacidade para refletir a influência das características geométricas e mecânicas dos sistemas de reforço. Por outro lado, o *Bulletin 14*, devido à sua formulação simplificada baseada em limites recomendados para a deformação do CFRP, tende a produzir previsões menos sensíveis às particularidades de cada caso de estudo.

Relativamente à técnica NSM, verificou-se que tanto o *Bulletin 90* como o *ACI 440.2R-17* apresentam capacidade para reproduzir de forma satisfatória o comportamento resistente dos elementos analisados. Contudo, observaram-se diferenças na forma como cada documento avalia a deformação mobilizada no CFRP, conduzindo a distintos níveis de conservadorismo em determinadas situações.

A comparação com os resultados experimentais permitiu concluir que nenhum dos regulamentos analisados se destacou de forma inequívoca em todos os casos estudados. Cada metodologia apresenta vantagens e limitações próprias, verificando-se que o desempenho de um determinado regulamento pode variar em função das características do elemento estrutural, do sistema de reforço adotado e do modo de rotura dominante. Adicionalmente, alguns dos documentos analisados recorrem a parâmetros de calibração ou coeficientes ajustáveis, cuja seleção pode influenciar significativamente as previsões obtidas. Assim, a seleção de uma metodologia de dimensionamento não deve basear-se exclusivamente na proximidade aos resultados experimentais, devendo igualmente considerar os níveis de segurança e conservadorismo pretendidos em contexto de projeto.

De uma forma global, os resultados obtidos confirmam que os regulamentos atualmente disponíveis permitem reproduzir adequadamente o comportamento à flexão de elementos de betão armado reforçados com CFRP. As diferenças observadas concentram-se sobretudo na avaliação da deformação eficaz do reforço e na modelação dos mecanismos de destacamento, aspetos que continuam a constituir um dos principais desafios na formulação de modelos de dimensionamento para sistemas FRP. Importa, contudo, salientar que no presente trabalho não foi aprofundada a análise das verificações específicas de destacamento do FRP propostas por alguns dos regulamentos, tendo sido privilegiada a comparação das previsões relativas à deformação mobilizada e à capacidade resistente dos elementos reforçados.

5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Apesar dos resultados obtidos permitirem atingir os objetivos inicialmente definidos, importa reconhecer algumas limitações associadas ao âmbito da presente investigação.

Em primeiro lugar, o estudo incidiu exclusivamente sobre o reforço à flexão de elementos de betão armado, não tendo sido analisado o comportamento associado a outros mecanismos resistentes relevantes, como o reforço ao corte ou à torção.

Adicionalmente, a análise foi efetuada para elementos com geometrias e condições de apoio específicas, correspondentes aos casos experimentais disponíveis. Embora a base de dados considerada apresente uma dimensão adequada para os objetivos do trabalho, a sua constituição resulta da compilação de casos experimentais desenvolvidos por diferentes investigadores, com objetivos distintos, não permitindo isolar de forma sistemática a influência individual de cada parâmetro.

Por último, importa referir que a avaliação efetuada incidiu exclusivamente sobre o comportamento em estado limite último, não tendo sido considerados efeitos associados ao comportamento em serviço, à durabilidade dos sistemas de reforço ou aos efeitos diferidos ao longo da vida útil da estrutura. Adicionalmente, não foram objeto de análise detalhada as verificações específicas de destacamento do FRP propostas por alguns dos regulamentos, tendo sido assumida uma perfeita aderência entre os materiais para efeitos da comparação entre modelos e resultados experimentais.

5.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados obtidos permitem identificar diversas linhas de investigação que poderão contribuir para aprofundar o conhecimento sobre o dimensionamento de estruturas reforçadas com CFRP.

Uma primeira linha de trabalho consiste na extensão da análise a outros modos de reforço estrutural, nomeadamente ao corte ou à torção, permitindo avaliar a consistência das diferentes metodologias regulamentares em situações distintas daquelas consideradas nesta dissertação.

Seria igualmente relevante realizar estudos experimentais especificamente concebidos para a validação e comparação dos modelos regulamentares, nos quais apenas um parâmetro seja alterado de cada vez. A variação controlada de parâmetros como a taxa de armadura, a resistência do betão, o comprimento de ancoragem, a quantidade de CFRP ou a geometria da secção permitiria compreender de forma mais rigorosa a sensibilidade dos diferentes regulamentos às variáveis que influenciam o comportamento resistente.

Outra possível linha de investigação consiste na ampliação da base de dados experimental permitindo consolidar as conclusões obtidas e avaliar o desempenho dos regulamentos numa gama mais alargada de configurações estruturais.

Uma linha de investigação particularmente relevante consiste na análise detalhada do *Annex J* do Eurocódigo 2, recentemente introduzido no âmbito da revisão do regulamento europeu para estruturas de betão. Apesar de não ter sido considerado na presente dissertação devido à reduzida disponibilidade de informação relativa a alguns dos parâmetros necessários à sua aplicação e à ainda limitada validação experimental disponível, este documento apresenta potencial para assumir um papel de destaque no dimensionamento de estruturas reforçadas com FRP. Assim, será importante avaliar o seu desempenho face aos documentos atualmente mais utilizados e verificar a sua capacidade para reproduzir os resultados observados experimentalmente.

Adicionalmente, a recente publicação do documento *CNR-DT 200 R2/2026* abre novas oportunidades de investigação. Para além de introduzir alterações na formulação aplicável à técnica EBR, esta revisão passa a contemplar explicitamente a técnica NSM. Neste contexto, seria interessante desenvolver uma análise comparativa entre as versões *R1/2013* e *R2/2026*, de forma a avaliar o impacto das alterações introduzidas na previsão da deformação mobilizada no FRP, da capacidade resistente e dos modos de rotura previstos para elementos reforçados com CFRP.

Por fim seria igualmente interessante avaliar o desempenho dos diferentes modelos regulamentares em condições de serviço e ao longo da vida útil da estrutura, incluindo a influência de fenómenos de fadiga, fluência, retração e degradação ambiental dos sistemas de reforço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Juvandes, L (2011) *Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas*. 1^{as} Jornadas de Materiais de Construção. FEUP-DEC, 239-270.
- [2] Fédération Internationale du Béton (fib) (2001) *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. fib Bulletin 14, Lausanne. ISBN: 2-88394-054-1
- [3] Fédération Internationale du Béton (fib) (2019) *Externally applied FRP reinforcement for concrete structures*. fib Bulletin 90, Task Group 5.1 FRP, Lausanne. ISBN: 978-2-88394-131-1
- [4] American Concrete Institute (ACI) (2017) *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures* (1st Ed. ACI 440.2R-17, Farmington Hills. ISBN: 978-1-945487-59-0
- [5] Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) (2014) *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Materials, RC and PC structures, masonry structures*. CNR-DT 200 R1/2013, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome.
- [6] EN 1992-1-1:2020 (E) (1992) Eurocode 2: *Annex J – Strengthening of Existing Concrete Structures with CFRP*.
- [7] Mariana, C (2021) *Avaliação das metodologias de dimensionamento para reforços à flexão de estruturas de betão armado com sistemas CFRP*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico.
- [8] Felipe, W (2025) *Análise comparativa de modelos de dimensionamento de betão armado reforçado à flexão com compósitos de FRP*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [9] Juvandes, L (1999) *Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão usando materiais compósitos de “CFRP”*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [10] Dias, S (2001) *Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- [11] Dias, S.J.E., Barros, J.A.O. & Janwaen, W (2018) *Behavior of RC Beams Flexurally Strengthened with NSM CFRP Laminates*. Composite Structures, 201, 363-376.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.126>
- [12] Hosseini, M.R.M., Dias, S.J.E., Barros, J.A.O (2020) *Behavior of One-Way RC Slabs Flexurally Strengthened with Prestressed NSM CFRP Laminates – Assessment of Influencing Parameters*. Composite Structures, 245, 112259.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112259>
- [13] Kotynia, R. (2005) *Effectiveness of Near Surface Mounted CFRP Reinforcement for Strengthening of Reinforced Concrete Structures*. Technical University of Lodz, Poland.
- [14] Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) (2026) *Guidelines for the Design, Execution and Inspection of Structural Strengthening Interventions Using Fiber-Reinforced Composites*. CNR-DT 200 R2/2026, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome.
- [15] Juvandes, L, Marques, N. (2009) *Reforço de Estruturas por Colagem Exterior de Sistemas Compósitos de FRP- Manual de Procedimentos e de Controlo de Qualidade para Construção*. Publicação LEMC-JUV/003-2007 e LEMC-JUV/004-2007, FEUP Edições, Porto.

ANEXOS

ANEXO A - CASOS ESTUDADOS TÉCNICA EBR

ANEXO A.1 - VIGAS

Anexo A.1.1 – Folha de cálculo do documento *Bulletin 14* para a viga B03.

Características de Reforço (CFRP)		Cálculo do Eixo Neutro (esmagamento)		Eixo Neutro (Rotura por Destacamento)	
ϵ_{fd}	0,0065	x [mm]		32,83	x [mm]
E_f [MPa]	160000	ϵ_f		0,0125	ϵ_c
A_f [mm ²]	60	ϵ_{s2}		0,0020	ϵ_f
b_f [mm]	50	ϵ_{s1}		0,0113	ϵ_{s2}
t_f [mm]	1,2	Eq. de Forças		0,00	ϵ_{s1}
ϵ_{fuk}	0,02	Mrd [KN.m]		16,71	ψ
Propriedades Gerais - Aço				δG	0,362
E_{s2} [MPa]	174000			Eq. Forças	-
f_{ym2} [MPa]	497,1			Mrd [KN.m]	8,98
f_{yd} [MPa]	497,10	Esmagamento ou Destacamento?			
A_{s2} [mm ²]	150,8	ϵ_{s1}		0,0113	
A_{s1} [mm ²]	14,14	ϵ_{s2}		0,0020	
ϵ_{sym2}	0,002856897	ϵ_f		0,0125	
E_{s1} [MPa]	195000	f_{yd}/E_s		0,002549231	
f_{ym1} [MPa]	192,3	ϵ_{fd}		0,0065	
ϵ_{sym1}	0,000986154	Modo de Rotura	Destacamento		
Propriedades Gerais - Betão					
E_c [MPa]	33700				
f_{cm} [MPa]	41,80				
f_{cd} [MPa]	41,80				
ϵ_{cu}	0,0035				
f_{ctm} [MPa]	3,1				
Propriedades Geométricas					
h [mm]	150				
d [mm]	138,5				
b [mm]	75				
$d2$ [mm]	14				

Anexo A.1.2 – Folha de cálculo do documento *Bulletin 90* para a viga B03.

Características de Reforço (CFRP)		Parâmetros Iniciais	Eixo Neutro (destacamento)	
Ef [MPa]	160000	γ_{fb}	1 x [mm]	24,38
Af [mm ²]	60	km	0,25 ϵ_f	0,00588
bf [mm]	50	kcr	2,1 ϵ_c	0,00114
tf [mm]	1,2	ϵ_{fuk}	0,02 σ_{s1} [MPa]	192,30
ϵ_{fuk}	0,02	kb	1,000 σ_{s2} [MPa]	193,25
Propriedades Gerais - Aço		β_l	1 k1	0,462
Es2 [MPa]	174000	ffbd, IC [MPa]	940,88 k2	0,353
fym2 [MPa]	497,1	ϵ_{fbd}	0,0059 Eq. De Forças	0,00
fyd [MPa]	497,10		Mrd [KN.m]	8,1781
As2 [mm ²]	150,8	Eixo Neutro (esmagamento)		
As1 [mm ²]	14,14	x [mm]	32,72	
ϵ_{sym2}	0,002856897	σ_{s1} [MPa]	192,30	
Es1 [MPa]	195000	σ_{s2} [MPa]	348,45	
fym1 [MPa]	192,3	k1	0,810	
ϵ_{sym1}	0,000986154	k2	0,416	
Propriedades Gerais - Betão		Eq. De Forças	0,00	
Ec [MPa]	33700	Mrd [KN.m]	16,74	
fcm [MPa]	41,80			
fcd [MPa]	41,80			
ϵ_{cu}	0,0035	Verificações/Modo de Rotura		
fctm [MPa]	3,1	ϵ_f	0,0125	
Propriedades Geométricas		ϵ_{s2}	0,0020	
h [mm]	150	ϵ_{s1}	0,0113	
d [mm]	138,5	$\epsilon_f < \epsilon_{fbd}$	NÃO	
b [mm]	75			
d2 [mm]	14	Modo de Rotura	Destacamento	
ϵ_f	0,0125			

Anexo A.1.3 – Folha de cálculo do documento ACI 440.2R-17 para a viga B03.

Características de Reforço (CFRP)		Esmagamento c/cedência nas armaduras		Destacamento c/aço em cedência	
Ef [MPa]	160000	c [mm]	38,29	c [mm]	26,8
Af [mm ²]	60	$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$	0,003	$\epsilon_f = \epsilon_{fd}$	0,0060
bf [mm]	50	Fc [KN]	86,7	Fc [KN]	60,8
tf [mm]	1,2	Fs [KN]	2,7	Fs [KN]	2,7
ϵ_{fuk}	0,02	Ff [KN]	84,02	Ff [KN]	58,08
Propriedades Gerais - Aço		Eq. De Forças	0,00	Eq. De Forças	-
Es [MPa]	195000	Verificações		Verificações	
fym [MPa]	192,3	ϵ_f	0,0088	ϵ_c	0,0013
fyd [MPa]	192,30	ϵ_s	0,0079	ϵ_s	0,0055
As2 [mm ²]	150,8	$\epsilon_f \leq \epsilon_{fd}$	KO!	$\epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$	OK!
As1 [mm ²]	14,14	$\epsilon_s \geq \epsilon_{sym}$	OK!	$\epsilon_s \geq \epsilon_{sym}$	OK!
ϵ_{sym}	0,000986154	Mrd [KN.m]	11,57	Mrd [KN.m]	8,39
Propriedades Gerais - Betão					
Ec [MPa]	33700	$\emptyset$	0,9000	$\emptyset$	0,9000
fcm [MPa]	41,80				
fcd [MPa]	41,80	$\emptyset$ Mrd	10,4106	$\emptyset$ Mrd	7,5550
ϵ_{cu}	0,003				
fctm [MPa]	3,1				
Propriedades Geométricas		Esmagamento s/cedência nas armaduras		Destacamento s/aço em cedência	
h [mm]	150	c [mm]	41,62	c [mm]	32,3
d [mm]	138,5	$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$	0,003	$\epsilon_f = \epsilon_{fd}$	0,0060
b [mm]	75	Fc [KN]	94,3	Fc [KN]	73,1
d2 [mm]	14	Fs [KN]	19,3	Fs [KN]	15,1
		Ff [KN]	75,01	Ff [KN]	58,08
		Eq. De Forças	0,00	Eq. De Forças	-
Dados Iniciais		Verificações		Verificações	
Ce	1	ϵ_f	0,0078	ϵ_c	0,0017
β_1	0,85	ϵ_s	0,0070	ϵ_s	0,0055
ϵ_{fd}	0,0060	$\epsilon_f \leq \epsilon_{fd}$	KO!	$\epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$	OK!
ϵ_{fu}	0,020	$\epsilon_s \leq \epsilon_{sym}$	KO!	$\epsilon_s \leq \epsilon_{sym}$	KO!
ψ_f	1	Mrd [KN.m]	10,25	Mrd [KN.m]	8,25

Anexo A.1.5 – Tabela com resumo de resultados para as vigas analisadas.

CASOS		Norma	ϵ_f (‰)			Modo Ruína		M _{max} [kN.m]	
CFRP	Ref.		Est.	Exp.	Efu	Est.	Exp.	Est.	Exp.
LAMINADOS	B03	FIB 14	6,50	6,35	20,0	Dest. FRP	Dest. FRP	8,981	11,235
		FIB 90	5,88			Dest. FRP		8,178	
		ACI	6,05			Dest. FRP		8,394	
		CNR	3,44			Dest. FRP		5,882	
	B05	FIB 14	6,50	4,75	20,0	Dest. FRP	Dest. FRP	8,959	9,100
		FIB 90	5,70			Dest. FRP		7,928	
		ACI	5,78			Dest. FRP		7,997	
		CNR	3,31			Dest. FRP		5,638	
	B08	FIB 14	6,50	4,84	20,0	Dest. FRP	Dest. FRP	8,946	9,450
		FIB 90	5,59			Dest. FRP		7,779	
		ACI	5,61			Dest. FRP		7,763	
		CNR	3,23			Dest. FRP		5,501	
	B10	FIB 14	6,50	4,97	20,0	Dest. FRP	Dest. FRP	8,935	8,890
		FIB 90	5,50			Dest. FRP		7,647	
		ACI	5,47			Dest. FRP		7,556	
		CNR	3,16			Dest. FRP		5,374	
	B09	FIB 14	4,68	7,21	20,0	Esmag.	Dest. FRP	13,967	17,500
		FIB 90	4,52			Esmag.		13,517	
		ACI	4,22			Esmag.		13,215	
		CNR	3,16			Dest. FRP		12,354	
	C5	FIB 14	6,50	5,06	20,0	Dest. FRP	Dest. FRP	19,312	20,570
		FIB 90	5,20			Dest. FRP		17,871	
		ACI	3,87			Esmag.		15,456	
		CNR	2,75			Dest. FRP		12,651	
	V4	FIB 14	6,50	6,87	11,0	Dest. FRP	Dest. FRP	14,346	14,708
		FIB 90	6,07			Dest. FRP		13,999	
		ACI	4,96			Dest. FRP		13,104	
		CNR	3,43			Dest. FRP		13,681	
MANTAS	V2	FIB 14	6,50	8,07	15,0	Dest. FRP	Dest. FRP	12,340	13,946
		FIB 90	11,14			Dest. FRP		15,295	
		ACI	11,43			Dest. FRP		15,398	
		CNR	7,05			Dest. FRP		24,632	

ANEXO A.2 – LAJES

Anexo A.2.1 – Folha de cálculo do documento *Bulletin 14* para a laje LC3R.

Características de Reforço (CFRP)		Cálculo do Eixo Neutro (esmagamento)		Eixo Neutro (Rotura por Destacamento)	
ϵ_{fd}	0,0065	x [mm]	11,12	x [mm]	10,44
Ef [MPa]	230000	ϵ_f	0,0218	ϵ_c	0,0010
Af [mm ²]	30,8	ϵ_{s2}	-0,0011	ϵ_f	0,0065
bf [mm]	70	ϵ_{s1}	0,0177	ϵ_{s2}	-0,0004
tf [mm]	0,22	Eq. de Forças	0,00	ϵ_{s1}	0,0053
ϵ_{fuk}	0,015	Mrd [KN.m]	15,20	ψ	0,406
Propriedades Gerais - Aço				δG	0,349
Es2 [MPa]	200000			Eq. Forças	0,00
fym2 [MPa]	330,3			Mrd [KN.m]	6,76
fyd [MPa]	330,30	Esmagamento ou Destacamento?			
As2 [mm ²]	21,21	ϵ_{s1}	0,0177		
As1 [mm ²]	84,82	ϵ_{s2}	-0,0011		
ϵ_{sym2}	0,0016515	ϵ_f	0,0218		
Es1 [MPa]	225300	fyd/Es	0,002821127		
fym1 [MPa]	635,6	ϵ_{fd}	0,0065		
ϵ_{sym1}	0,002821127	Modo de Rotura	Destacamento		
Propriedades Gerais - Betão					
Ec [MPa]	39800				
fcm [MPa]	65,80				
fcd [MPa]	65,80				
ϵ_{cu}	0,0035				
fctm [MPa]	4,5				
Propriedades Geométricas					
h [mm]	80,5				
d [mm]	67,5				
b [mm]	428				
d2 [mm]	14,5				

Anexo A.2.2 – Folha de cálculo do documento *Bulletin 90* para a laje LC3R.

Características de Reforço (CFRP)		Parâmetros Iniciais		Eixo Neutro (destacamento)	
Ef [MPa]	230000	yfb		1 x [mm]	10,07
Af [mm ²]	30,8	km		0,25 εf	0,01496
bf [mm]	70	kr		2,1 εc	0,00214
tf [mm]	0,22	εfuk		0,02 σs1 [MPa]	635,60
εfuk	0,015	kb		1,123 σs2 [MPa]	-280,67
Propriedades Gerais - Aço		βl		1 k1	0,688
Es2 [MPa]	200000	ffbd,lc [MPa]		3441,00 k2	0,379
fym2 [MPa]	330,3	εfbd		Eq. De Forças	0,00
fyd [MPa]	330,30			Mrd [KN.m]	11,6235
As2 [mm ²]	21,21	Eixo Neutro (esmagamento)			
As1 [mm ²]	84,82	x [mm]		11,06	
esym2	0,0016515	σs1 [MPa]		635,60	
Es1 [MPa]	225300	σs2 [MPa]		-218,00	
fym1 [MPa]	635,6	k1		0,810	
esym1	0,002821127	k2		0,416	
Propriedades Gerais - Betão		Eq. De Forças			0,00
Ec [MPa]	39800	Mrd [KN.m]		15,26	
fcm [MPa]	65,80				
fcd [MPa]	65,80				
εcu	0,0035	Verificações/Modo de Rotura			
fctm [MPa]	4,5	εf		0,0220	
Propriedades Geométricas		εs2		-0,0011	
h [mm]	80,5	εs1		0,0179	
d [mm]	67,5	εf < εfbd		NÃO	
b [mm]	428				
d2 [mm]	14,5	Modo de Rotura			
εf	0,0220			Destacamento	

Anexo A.2.3 – Folha de cálculo do documento ACI 440.2R-17 para a laje LC3R.

Características de Reforço (CFRP)		Esmagamento c/cedência nas armaduras		Destacamento c/aço em cedência	
Ef [MPa]	230000	c [mm]	11,47	c [mm]	9,4
Af [mm ²]	30,8	$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$	0,003	$\epsilon_f = \epsilon_{fd}$	0,0135
bf [mm]	70	Fc [KN]	178,4	Fc [KN]	146,1
tf [mm]	0,22	Fs [KN]	50,5	Fs [KN]	50,5
ϵ_{fuk}	0,015	Ff [KN]	127,94	Ff [KN]	95,63
Propriedades Gerais - Aço		Eq. De Forças	0,00	Eq. De Forças	0,0000
Es [MPa]	201900	Verificações		Verificações	
fym [MPa]	594	ϵ_f	0,0181	ϵ_c	0,0018
fyd [MPa]	594,00	ϵ_s	0,0147	ϵ_s	0,0110
As2 [mm ²]	85	$\epsilon_f \leq \epsilon_{fd}$	KO!	$\epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$	OK!
As1 [mm ²]	85	$\epsilon_s \geq \epsilon_{sym}$	OK!	$\epsilon_s \geq \epsilon_{sym}$	OK!
ϵ_{sym}	0,002942051	Mrd [KN.m]	13,04	Mrd [KN.m]	10,66
Propriedades Gerais - Betão					
Ec [MPa]	39800	$\emptyset$	0,9000	$\emptyset$	0,9000
fcm [MPa]	65,80				
fcd [MPa]	65,80	$\emptyset$ Mrd	11,7378	$\emptyset$ Mrd	9,5946
ϵ_{cu}	0,003				
fctm [MPa]	4,5				
Propriedades Geométricas		Esmagamento s/cedência nas armaduras		Rotura por destacamento s/aço em cedência	
h [mm]	80,5	c [mm]	16,07	c [mm]	17,9
d [mm]	67,5	$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$	0,003	$\epsilon_f = \epsilon_{fd}$	0,0135
b [mm]	428	Fc [KN]	250,0	Fc [KN]	279,2
d2 [mm]	14,5	Fs [KN]	164,8	Fs [KN]	183,5
		Ff [KN]	85,22	Ff [KN]	95,63
		Eq. De Forças	0,00	Eq. De Forças	0,0000
Dados Iniciais		Verificações		Verificações	
Ce	1	ϵ_f	0,0120	ϵ_c	0,0039
β_1	0,65	ϵ_s	0,0096	ϵ_s	0,0107
ϵ_{fd}	0,0135	$\epsilon_f \leq \epsilon_{fd}$	OK!	$\epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$	KO!
ϵ_{fu}	0,015	$\epsilon_s \leq \epsilon_{sym}$	KO!	$\epsilon_s \leq \epsilon_{sym}$	KO!
ψ_f	1	Mrd [KN.m]	9,56	Mrd [KN.m]	10,25

Anexo A.2.5 – Tabela com resumo de resultados para as lajes analisadas.

CASOS		Norma	ϵ_f (‰)		Efu	Modo Ruína		Mmax [kN.m]	
CFRP	Ref.		Est.	Exp.		Est.	Exp.	Est.	Exp.
LAMINADOS	LC1S	FIB 14	6,50	10,10	20,0	Dest. FRP	Dest. FRP	6,758	9,378
		FIB 90	9,16			Dest. FRP		7,867	
		ACI	7,58			Dest. FRP		6,964	
		CNR	4,90			Dest. FRP		7,483	
	LC2S	FIB 14	6,50	11,53	20,0	Dest. FRP	Dest. FRP	6,758	10,368
		FIB 90	9,16			Dest. FRP		8,265	
		ACI	7,58			Dest. FRP		7,326	
		CNR	4,90			Dest. FRP		7,932	
	LA4S	FIB 14	6,50	9,67	20,0	Dest. FRP	Dest. FRP	6,758	8,415
		FIB 90	8,90			Dest. FRP		7,660	
		ACI	7,27			Dest. FRP		6,966	
		CNR	4,71			Dest. FRP		7,126	
	LB2S	FIB 14	6,50	9,18	20,0	Dest. FRP	Dest. FRP	6,758	9,202
		FIB 90	8,98			Dest. FRP		8,239	
		ACI	7,36			Dest. FRP		7,510	
		CNR	4,77			Dest. FRP		7,809	
	LD3BL	FIB 14	6,50	9,57	14,0	Dest. FRP	Dest. FRP	6,758	9,083
		FIB 90	7,95			Dest. FRP		7,553	
		ACI	6,28			Dest. FRP		6,754	
		CNR	4,20			Dest. FRP		6,915	
	LD4BL	FIB 14	6,50	10,42	14,0	Dest. FRP	Dest. FRP	6,758	8,891
		FIB 90	7,95			Dest. FRP		7,170	
		ACI	6,26			Dest. FRP		6,396	
		CNR	4,20			Dest. FRP		6,504	
	LE3I	FIB 14	6,50	8,58	15,0	Dest. FRP	Dest. FRP	6,758	8,459
		FIB 90	7,75			Dest. FRP		7,425	
		ACI	6,14			Dest. FRP		6,633	
		CNR	4,12			Dest. FRP		6,624	
	LE4I	FIB 14	6,50	10,24	15,0	Dest. FRP	Dest. FRP	6,758	8,786
		FIB 90	7,76			Dest. FRP		7,031	
		ACI	6,14			Dest. FRP		6,271	
		CNR	4,12			Dest. FRP		6,214	
MANTAS	LC3R	FIB 14	6,50	10,90	15,0	Dest. FRP	Dest. FRP	6,758	10,753
		FIB 90	14,96			Dest. FRP		11,624	
		ACI	13,50			Dest. FRP		10,661	
		CNR	8,74			Dest. FRP		13,529	
	LC4R	FIB 14	6,50	10,00	15,0	Dest. FRP	Ruína Mista	6,758	8,608
		FIB 90	15,05			Dest. FRP		11,198	
		ACI	13,50			Dest. FRP		10,221	
		CNR	8,76			Dest. FRP		12,897	
	LA3R	FIB 14	6,50	11,14	15,0	Dest. FRP	Ruína Mista	6,758	8,740
		FIB 90	14,62			Dest. FRP		10,709	
		ACI	13,50			Dest. FRP		10,169	
		CNR	8,43			Dest. FRP		12,058	
	LB1R	FIB 14	6,50	12,00	15,0	Dest. FRP	Ruína Mista	6,758	9,972
		FIB 90	14,71			Dest. FRP		11,543	
		ACI	13,50			Dest. FRP		10,925	
		CNR	8,52			Dest. FRP		13,283	
	LD1BM	FIB 14	6,50	7,92	15,0	Dest. FRP	Dest. FRP	6,758	7,761
		FIB 90	13,36			Dest. FRP		10,446	
		ACI	12,49			Dest. FRP		10,011	
		CNR	7,69			Dest. FRP		11,658	
	LD2BM	FIB 14	6,50	6,65	15,0	Dest. FRP	Dest. FRP	6,758	7,433
		FIB 90	13,34			Dest. FRP		11,143	
		ACI	12,53			Dest. FRP		10,723	
		CNR	7,69			Dest. FRP		12,617	

ANEXO B – CASOS ESTUDADOS TÉCNICA NSM

ANEXO B.1 – VIGAS

Anexo B.1.1 – Folha de cálculo do documento *Bulletin 90* para a viga S1L.

Características de Reforço (CFRP) Parâmetros Iniciais		Eixo Neutro (destacamento)	
Ef [MPa]	175000 γ_{fb}	1,5 x [mm]	29,99
Af [mm ²]	14 km	0,25 ϵ_f	0,01447
bf [mm]	1,4 kcr	2,1 ϵ_c	0,00161
tf [mm]	10 ϵ_{fuk}	0,018 σ_{s1} [MPa]	534,50
ϵ_{fuk}	0,018 kb	1,404 σ_{s2} [MPa]	64,24
Propriedades Gerais - Aço	β_l	1 k1	0,588
Es2 [MPa]	200000 $f_{fbd,IC}$ [MPa]	339,22 k2	0,364
fym2 [MPa]	534,5 ϵ_{fbd}	0,0145 Eq. De Forças	0,02
fyd [MPa]	534,50	Mrd [KN.m]	32,1584
As2 [mm ²]	100,53 Eixo Neutro (esmagamento)		
As1 [mm ²]	157,08 x [mm]	29,17	
ϵ_{sym2}	0,00267 σ_{s1} [MPa]	534,50	
Es1 [MPa]	200000 σ_{s2} [MPa]	123,99	
fym1 [MPa]	566,7 k1	0,810 γ_f	1
ϵ_{sym1}	0,00283 k2	0,416 η	0,8
Propriedades Gerais - Betão	Eq. De Forças	0,01 f_{fum} [Mpa]	3165
Ec [MPa]	35700 Mrd [KN.m]	44,84 df	295
fcm [MPa]	50,20		
fcd [MPa]	50,20		
ϵ_{cu}	0,0035 Verificações/Modo de Rotura		
fctm [MPa]	4,1 ϵ_f	0,0325	
Propriedades Geométricas	ϵ_{s2}	0,0006	
h [mm]	300 ϵ_{s1}	0,0295	
d [mm]	275 $\epsilon_f < \epsilon_{fbd}$	NÃO	
b [mm]	150		
d2 [mm]	24		
ϵ_f [mm]	0,0325	Modo de Rotura	Destacamento
ts [mm]	10,0000		
df [mm]	295,0000		

Anexo B.1.2 – Folha de cálculo do documento ACI 440.2R-17 para a viga S1L.

Características de Reforço (CFRP)ura por esmagamento c/cedência nas armadu Rotura por destacamento c/aço em cedência				
Ef [MPa]	175000	c [mm]	31,56	c [mm] 25,0
Af [mm ²]	14	$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$	0,003	$\epsilon_f = \epsilon_{fd}$ 0,0126
bf [mm]	1,4	Fc [KN]	151,5	Fc [KN] 119,9
tf [mm]	10	Fs [KN]	89,0	Fs [KN] 89,0
ϵ_{fuk}	0,018	Ff [KN]	62,51	Ff [KN] 30,87
Propriedades Gerais - Aço		Eq. De Forças	0,00	Eq. De Forças - 0,0000
Es [MPa]	200000	Verificações		Verificações
fym [MPa]	566,7	ϵ_f	0,0255	ϵ_c 0,0011
fyd [MPa]	566,70	ϵ_s	0,0231	ϵ_s 0,0115
As2 [mm ²]	100,53	$\epsilon_f \leq \epsilon_{fd}$	KO!	$\epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$ OK!
As1 [mm ²]	157,08	$\epsilon_s \geq \epsilon_{sym}$	OK!	$\epsilon_s \geq \epsilon_{sym}$ OK!
ϵ_{sym}	0,00283	Mrd [KN.m]	41,44	Mrd [KN.m] 32,62
Propriedades Gerais - Betão				
Ec [MPa]	35700	$\emptyset$	0,9000	$\emptyset$ 0,9000
fcm [MPa]	50,20			
fcd [MPa]	50,20	$\emptyset$ Mrd	37,2942	$\emptyset$ Mrd 29,3561
ϵ_{cu}	0,003			
fctm [MPa]	4,1			
Propriedades Geométricas				
h [mm]	300	ura por esmagamento s/cedência nas armadu	Rotura por destacamento s/aço em cedência	
d [mm]	275	c [mm]	66,69	c [mm] 79,5
b [mm]	150	$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$	0,003	$\epsilon_f = \epsilon_{fd}$ 0,0126
d2 [mm]	24	Fc [KN]	320,1	Fc [KN] 381,8
ϵ_f [mm]	0,0255	Fs [KN]	294,4	Fs [KN] 351,0
ts [mm]	10,0000	Ff [KN]	25,71	Ff [KN] 30,87
df [mm]	295,0000	Eq. De Forças	0,00	Eq. De Forças - 0,0000
Dados Iniciais		Verificações		Verificações
Ce	1	ϵ_f	0,0105	ϵ_c 0,0045
β_1	0,75	ϵ_s	0,0094	ϵ_s 0,0112
ϵ_{fd}	0,0126	$\epsilon_f \leq \epsilon_{fd}$	KO!	$\epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$ KO!
ϵ_{fu}	0,0180	$\epsilon_s \geq \epsilon_{sym}$	OK!	$\epsilon_s \geq \epsilon_{sym}$ OK!
ψ_f	1	Mrd [KN.m]	29,33	Mrd [KN.m] 30,16

Anexo B.1.3 – Tabela com resumo de resultados para as vigas analisadas.

CASOS		Norma	ϵ_f (‰)			Modo Ruína		M _{max} [kN.m]	
CFRP	Ref.		Est.	Exp.	Efu	Est.	Exp.	Est.	Exp.
LAMINADOS	CASO 1	FIB 90	14,47	17,40	18,1	Dest. FRP	Dest. FRP	42,48	50,36
		ACI	12,67			Dest. FRP		40,59	
	CASO 2	FIB 90	12,33	9,76	15,4	Dest. FRP	Dest. FRP	74,58	66,29
		ACI	10,78			Dest. FRP		70,38	
	S1L	FIB 90	14,47	17,90	18,0	Dest. FRP	Dest. FRP	32,16	39,78
		ACI	12,60			Dest. FRP		32,62	
	S2L	FIB 90	14,47	17,40	18,0	Dest. FRP	Dest. FRP	41,88	50,36
		ACI	12,60			Dest. FRP		41,23	
	S3L	FIB 90	14,47	14,90	18,0	Dest. FRP	Dest. FRP	51,47	56,97
		ACI	12,60			Dest. FRP		49,69	
	A2	FIB 90	13,59	12,44	17,0	Dest. FRP	Dest. FRP	69,50	67,20
		ACI	11,90			Dest. FRP		64,70	
	A4	FIB 90	11,91	9,12	17,0	Esmag.	Dest. FRP	104,22	91,00
		ACI	9,48			Esmag.		86,44	
	B2	FIB 90	13,59	13,66	17,0	Dest. FRP	Dest. FRP	69,74	67,20
		ACI	11,90			Dest. FRP		65,20	
	B4	FIB 90	12,24	11,12	17,0	Esmag.	Dest. FRP	106,63	91,00
		ACI	9,82			Esmag.		88,96	

ANEXO B.2 – LAJES

Anexo B.2.1 – Folha de cálculo do documento *Bulletin 90* para a laje A-S0.

Características de Reforço (CFRP) Parâmetros Iniciais		Eixo Neutro (destacamento)	
Ef [MPa]	176000 γ_{fb}	1,5 x [mm]	18,16
Af [mm ²]	56 km	0,25 ϵ_f	0,01259
bf [mm]	1,4 kcr	2,1 ϵ_c	0,00225
tf [mm]	20 ϵ_{fuk}	0,0158 σ_{s1} [MPa]	528,00
ϵ_{fuk}	0,0158 kb	1,409 σ_{s2} [MPa]	-317,51
Propriedades Gerais - Aço β_l		1 k1	0,703
Es2 [MPa]	200000 $f_{fbd,IC}$ [MPa]	222,85 k2	0,383
fym2 [MPa]	528 ϵ_{fbd}	0,01259 Eq. De Forças	0,00
fyd [MPa]	528,00	Mrd [KN.m]	22,1455
As2 [mm ²]	84,82 Eixo Neutro (esmagamento)		
As1 [mm ²]	201,06 x [mm]	19,53	
ϵ_{sym2}	0,00264 σ_{s1} [MPa]	528,00	
Es1 [MPa]	200000 σ_{s2} [MPa]	-411,11 γ_f	1
fym1 [MPa]	566 k1	0,810 η	0,8
ϵ_{sym1}	0,00283 k2	0,416 f_{fum} [Mpa]	2770
Propriedades Gerais - Betão Eq. De Forças		0,00 d_f	110
Ec [MPa]	32600 Mrd [KN.m]	29,24	
fcm [MPa]	39,50		
fcd [MPa]	39,50		
ϵ_{cu}	0,0035 Verificações/Modo de Rotura		
fctm [MPa]	3,5 ϵ_f	0,0180	
Propriedades Geométricas ϵ_{s2}		-0,0021	
h [mm]	120 ϵ_{s1}	0,0124	
d [mm]	89 $\epsilon_f < \epsilon_{fbd}$	NÃO	
b [mm]	600		
d2 [mm]	31		
ϵ_f [mm]	0,0180	Modo de Rotura	Destacamento
ts [mm]	20,0000		
df [mm]	110,0000		

Anexo B.2.2 – Folha de cálculo do documento ACI 440.2R-17 para a laje A-S0.

Características de Reforço (CFRP)ura por esmagamento c/cedência nas armadu Rotura por destacamento c/aço em cedência					
Ef [MPa]	176000	c [mm]	16,99	c [mm]	12,9
Af [mm²]	56	εc = εcu	0,003	εf=εfd	0,0111
bf [mm]	1,4	Fc [KN]	291,0	Fc [KN]	220,8
tf [mm]	20	Fs [KN]	111,8	Fs [KN]	111,8
εfuk	0,0158	Ff [KN]	179,21	Ff [KN]	109,01
Propriedades Gerais - Aço		Eq. De Forças	0,00	Eq. De Forças	0,0000
Es [MPa]	200000	Verificações		Verificações	
fym [MPa]	556	εf	0,0182	εc	0,0013
fyd [MPa]	556,00	εs	0,0127	εs	0,0079
As2 [mm²]	84,82	εf ≤ εfd	KO!	εc ≤ εcu	OK!
As1 [mm²]	201,06	εs ≥ εsym	OK!	εs ≥ εsym	OK!
εsym	0,00278	Mrd [KN.m]	29,35	Mrd [KN.m]	21,82
Propriedades Gerais - Betão					
Ec [MPa]	32600	Ø	0,9000	Ø	0,9000
fcu [MPa]	39,50				
fcd [MPa]	39,50	Ø Mrd	26,4177	Ø Mrd	19,6381
εcu	0,003				
fctm [MPa]	3,5				
Propriedades Geométricas ura por esmagamento s/cedência nas armadu Rotura por destacamento s/aço em cedência					
h [mm]	120	c [mm]	24,83	c [mm]	24,0
d [mm]	89	εc = εcu	0,003	εf=εfd	0,0111
b [mm]	600	Fc [KN]	425,1	Fc [KN]	410,2
d2 [mm]	31	Fs [KN]	311,8	Fs [KN]	301,2
εf [mm]	0,0182	Ff [KN]	113,34	Ff [KN]	109,01
ts [mm]	20,0000	Eq. De Forças	0,00	Eq. De Forças	-
df [mm]	110,0000	Verificações		Verificações	
Dados Iniciais	εf		0,0115	εc	0,0028
Ce	1	εs	0,0078	εs	0,0075
β1	0,85	εf ≤ εfd	KO!	εc ≤ εcu	KO!
εfd	0,0111	εs ≥ εsym	OK!	εs ≥ εsym	OK!
εfu	0,0158	Mrd [KN.m]	21,17	Mrd [KN.m]	20,78
ψf	1				

Anexo B.2.3 – Tabela com resumo de resultados para as lajes analisadas.

CASOS		Norma	εf (%)			Modo Ruína		Mmax [kN.m]	
CFRP	Ref.		Est.	Exp.	Efu	Est.	Exp.	Est.	Exp.
LAMINADOS	CASO 3	FIB 90	13,57	11,60	17,00	Dest. FRP	Dest. FRP	10,17	10,76
		ACI	11,90			Dest. FRP		9,80	
	A-S0	FIB 90	12,59	15,10	15,80	Dest. FRP	Dest. FRP	22,15	27,32
		ACI	11,06			Dest. FRP		21,82	
	B-S0	FIB 90	9,59	14,60	15,80	Esmag.	Dest. FRP	18,08	23,00
		ACI	8,79			Esmag.		17,78	
	C-S0	FIB 90	12,59	15,00	15,80	Dest. FRP	Dest. FRP	26,54	32,00
		ACI	11,06			Dest. FRP		26,44	